



TUGAS AKHIR - RE 184804

**KAJIAN DAMPAK PROSES EKSPLOITASI DAN
PRODUKSI SEMEN TERHADAP LINGKUNGAN
DENGAN METODE LIFE CYCLE ASSESSMENT
(LCA) DI PT. SEMEN INDONESIA (PERSERO)
TBK. PABRIK TUBAN**

ANWAR ROSYID
0321154000054

Dosen Pembimbing
Dr. Ir. RACHMAT BOEDISANTOSO, MT.

DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan, dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2019



TUGAS AKHIR - RE 184804

**KAJIAN DAMPAK PROSES EKSPLOITASI DAN
PRODUKSI SEMEN TERHADAP LINGKUNGAN
DENGAN METODE LIFE CYCLE ASSESSMENT
(LCA) DI PT. SEMEN INDONESIA (PERSERO)
TBK. PABRIK TUBAN**

**ANWAR ROSYID
0321154000054**

**Dosen Pembimbing
Dr. Ir. RACHMAT BOEDISANTOSO, MT.**

**DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan, dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2019**



FINAL PROJECT - RE 184804

**STUDY OF THE CEMENT EXPLOITATION AND
PRODUCTION PROCESS IMPACT ON THE
ENVIRONMENT USING LIFE CYCLE
ASSESSMENT METHOD AT PT. SEMEN
INDONESIA(PERSERO) TBK. TUBAN PLANT**

**ANWAR ROSYID
0321154000054**

**Supervisor
Dr. Ir. RACHMAT BOEDISANTOSO, MT.**

**DEPARTEMENT OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING
Faculty of Civil, Environment, and Geo-Engineering
Institute of Technology Sepuluh Nopember
Surabaya
2019**

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LEMBAR PENGESAHAN

KAJIAN DAMPAK PROSES EKSPLOITASI DAN PRODUKSI SEMEN TERHADAP LINGKUNGAN DENGAN METODE *LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA)* DI PT. SEMEN INDONESIA (PERSERO) TBK. PABRIK TUBAN

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar
Sarjana Teknik
Pada

Program Studi S-1 Departemen Teknik Lingkungan
Fakultas Teknik Sipil Lingkungan dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya

Oleh:

ANWAR ROSYID
NRP. 03211540000054

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir:



Dr. Ir. Rachmat Boedisantoso, MT.
NIP. 19660116 199703 1 001



“Halaman ini sengaja dikosongkan”

Kajian Dampak Proses Eksploitasi dan Produksi Semen terhadap Lingkungan dengan Metode *Life Cycle Assessment* (LCA) di PT. Semen Indonesia (Persero) Tbk. Pabrik Tuban

Nama Mahasiswa : Anwar Rosyid
NRP : 03211540000054
Departemen : Teknik Lingkungan
Dosen Pembimbing : Dr. Ir. Rachmat Boedisantoso, MT.

ABSTRAK

Berkembang pesatnya pembangunan di Indonesia menyebabkan produksi akan semen berbanding lurus dengan kebutuhannya. PT Semen Indonesia (Persero) Tbk. merupakan salah satu industri yang memproduksi semen komersil untuk kebutuhan pembangunan di dalam negeri. Semen dibuat dengan cara serangkaian proses yang meliputi proses eksploitasi dan produksi serta melibatkan proses utama dan proses penunjang dalam kegiatannya. Proses produksi semen memerlukan bahan baku, bahan bakar serta tambahan bahan kimia, dimana dari kegiatan tersebut menghasilkan dampak yang berpotensi menurunkan kualitas lingkungan sekitar. Selain berdampak terhadap lingkungan, proses produksi tersebut juga berpotensi menimbulkan dampak pada kesehatan manusia.

Penelitian ini mengidentifikasi dampak yang terjadi dari proses utama berdasarkan pendekatan *cradle to gate*, dimulai dari proses eksploitasi bahan baku sampai dengan proses produksi yang menghasilkan semen sebagai produk utama. Dimulai dari analisis perhitungan beban emisi dari proses eksploitasi dan produksi semen. Beban emisi, bahan bakar, energi, dan bahan baku digunakan dalam analisis *life cycle inventory* (LCI). Dari hasil LCI dilakukan identifikasi dampak dengan metode *Life Cycle Assessment* (LCA) melalui aplikasi SimaPro 8.5.2. Penilaian dampak pada *Life Cycle Impact Assessment* (LCIA) meliputi *global warming*, *carcinogenics*, *ecotoxicity*, *acidification*, *respiratory effects* dan *smog formation*. Metode yang digunakan menggunakan pendekatan midpoint TRACI 2.1. Hasil identifikasi dampak merujuk pada penentuan titik *hotspot* proses dan *hotspot* dampak. Untuk menurunkan besar dampak potensial maka dibuat serangkaian alternatif untuk mengurangi dampak yang ada.

Hasil perhitungan beban emisi pada proses eksploitasi dan produksi semen sebesar 9.349.981,2 ton CO₂, 144,6 ton CH₄, 70,3 ton N₂O, 272,6 ton SO₂, 5.373,8 ton NO₂, 4.867,1 ton PM, 2.560,5 ton CO, dan 966,5 ton CO₂ sekunder. Hasil *running* pada aplikasi SimaPro menunjukkan bahwa unit *kiln* menjadi titik *hotspot* proses dan *carcinogenics* menjadi *hotspot* dampak dari unit *kiln*. Hasil analisis ini digunakan sebagai dasar dalam menentukan skenario alternatif program lingkungan yang akan direkomendasikan. Dari beberapa skenario tersebut, diambil skenario dengan penurunan kontribusi dampak lingkungan paling signifikan terhadap proses produksi semen. Setelah dilakukan analisis LCA kembali, didapatkan bahwa skenario A mempunyai kontribusi penurunan paling signifikan terhadap dampak potensial proses eksploitasi dan produksi semen.

Kata kunci: Alternatif, LCA, Semen, SimaPro, TRACI

Study of the Cement Exploitation and Production Process Impact on the Environment Using Life Cycle Assessment Method at PT Semen Indonesia (Persero) Tbk. Tuban Plant

Name : Anwar Rosyid
NRP : 03211540000054
Departement : Environmental Engineering
Supervisor : Dr. Ir. Rachmat Boedisantoso, MT.

ABSTRACT

The rapid development in Indonesia has caused cement production to be directly proportional to its needs. PT. Semen Indonesia (Persero) Tbk. is one of the industries that produce commercial cement for domestic development needs. Cement is made by means of a series of exploration and production processes that involve the main process and supporting processes in its activities. To be able to produce cement, it requires raw materials, fuel and chemical additives, where from these activities produce emissions that have an impact on decreasing environmental quality. The gas emissions produced are CO₂, CH₄, NO_x, SO_x, N₂O and particulate. These emissions have an impact on increasing global warming and decreasing ambient air quality which has an impact on human health and the environment.

This study identifies the impact of the main process based on the cradle to gate approach, starting from the process of exploration of raw materials to the production process that produces cement as the main product. Impact identification is done by using the Life Cycle Assessment (LCA) method with the SimaPro 8.5.2 application. The Life Cycle Assessment Impact (LCIA) category includes global warming potential for 100 years, ozone depletion, and smog formation. The method used is TRACI midpoint approach. By knowing the impacts occurred, an alternative program is made to reduce the environmental impact of emissions produced at each processing unit. To find out which the most influential alternative programs in reducing environmental impacts, an analysis is carried out in SimaPro 8.5.2. First, an analysis of the impacts of the exploration and production process without using alternatives is carried out, then compared the result to the analysis using alternative programs included in SimaPro 8.5.2.

The results of the calculation of emissions load in the process of exploitation and cement production amounted to 9,349,981.2 tons of CO₂, 144.6 tons of CH₄, 70.3 tons of N₂O, 272.6 tons of SO₂, 5,373.8 tons of NO₂, 4,867.1 tons of PM, 2,560.5 tons of CO, and 966.5 tons of secondary CO₂. The results of running on the SimaPro application show that the kiln unit is a process hotspot and carcinogenic is an impact hotspot of the kiln unit. The results of this analysis are used as a basis in determining alternative environmental program scenarios that will be recommended. From several of these scenarios, a scenario with a decrease in the contribution of the most significant environmental impact to the cement production process is taken. After the LCA analysis was conducted again, it was found that scenario A had the most significant contribution to the potential impact of the cement exploitation and production process.

Keywords: Alternative, LCA, Cement, SimaPro, TRACI

KATA PENGANTAR

Puji syukur penguji panjatkan atas kehadiran Allah SWT atas limpahan rahmat, taufiq serta hidayah-Nya sehingga Tugas Akhir ini dapat berjalan dengan lancar dan dapat diselesaikan tepat waktu. Tugas akhir ini disusun untuk memenuhi syarat penulis menyelesaikan pendidikan sarjana di Departemen Teknik Lingkungan ITS.

Dalam kesempatan ini, penyusun menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. Ir. Rachmat Boedisantoso, MT., selaku dosen pembimbing dalam Tugas Akhir saya. Saya mengucapkan terima kasih banyak atas saran, bimbingan serta dukungan yang telah diberikan.
2. Bapak Dr. Ir. Abdu Fadli Assomadi, S.Si., MT., Ibu Prof. Dr. Ir. Nieke Karnaningroem, M.Sc., dan Ibu Ir. Atiek Moesriati, M.Kes., selaku dosen pengarah. Saya mengucapkan terima kasih banyak atas segala saran serta masukan dalam penyusunan Tugas Akhir.
3. Bapak Agus Setyo Budi, selaku pembimbing lapangan di PT Semen Indonesia Pabrik Tuban. Terima kasih banyak atas bantuan dan bimbingannya.
4. Rekan mahasiswa Laboratorium Pengendalian Pencemaran Udara dan Perubahan Iklim Departemen Teknik Lingkungan ITS serta rekan mahasiswa Teknik Lingkungan Angkatan 2015.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan laporan Tugas Akhir ini masih memiliki kekurangan. Penulis mengharapkan adanya kritik dan saran yang membangun guna hasil yang lebih baik.

Surabaya, Juli 2019

Penulis

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah segala puji bagi Allah atas segala kesehatan, kemudahan, serta karunia yang telah diberikan kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan Tugas Akhir tepat waktu. Dalam kesempatan ini, penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar besarnya terhadap orang tua dan keluarga penulis atas segala dukungan, doa, motivasi serta nasehat yang diberikan kepada penulis selama masa perkuliahan di Departemen Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan, dan Kebumihan, ITS.

Terima kasih kepada Ibu saya, Fudhi Astuti atas segala bentuk kasih sayang, dukungan dan doa, yang selalu memberikan dorongan kepada penulis agar selalu menjadi anak yang patuh terhadap orang tua, berbakti kepada guru maupun dosen, menghormati sesama teman. Serta yang selalu menjadi motivasi bagi penulis untuk dapat membahagiakan orang tua. Kasih sayangmu sepanjang hayat.

Terima kasih kepada Bapak saya, Moh. Ilyas atas segala dukungannya baik moril maupun materil, yang selalu ada disaat penulis dalam keadaan susah maupun senang, yang selalu mengajarkan dan menasehati untuk taat beribadah.

Terima kasih kepada kakak dan adik saya, Ike Yustiana, Nuhaini Faiqoh, Afif Alfarobi, dan Muhammad Ilham, atas segala dukungan serta doanya. Menjadi saudara yang selalu ada dikala susah dan senang.

Surabaya, Juli 2019

Penulis

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN.....	i
ABSTRAK.....	iii
ABSTRACT	v
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR GAMBAR	ix
BAB I	1
PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Manfaat Penelitian.....	3
1.5 Ruang Lingkup	3
BAB II	5
TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Semen.....	5
2.2 Proses Bisnis Semen.....	6
2.2.1 Proses Eksplorasi	8
2.2.2 Proses Produksi	9
2.3 Emisi pada Industri Semen	16
2.4.1 Emisi Gas Karbon Dioksida.....	16
2.4.2 Emisi Gas Metana.....	17
2.4.3 Emisi Gas Nitrogen Dioksida.....	17
2.4.4 Emisi Gas Sulfur Dioksida.....	17
2.4.5 Emisi Partikulat	18
2.4 Pencemaran Udara	19

2.5	<i>Carcinogenics</i>	19
2.6	<i>Ecotoxicity</i>	20
2.7	<i>Global Warming</i>	20
2.8	<i>Smog</i>	21
2.9	<i>Acidification</i>	22
2.10	<i>Respiratory Effects</i>	23
2.11	<i>Life Cycle Assessment</i>	23
2.12	SimaPro	24
2.13	Metode Pendekatan pada SimaPro	26
2.14	Penelitian Terdahulu Mengenai LCA.....	29
BAB III		33
METODE PENELITIAN.....		33
3.1	Umum	33
3.2	Wilayah Studi	33
3.3	Kerangka Penelitian	33
3.4	Tahap Pendahuluan	35
3.5	Tahap Pengumpulan Data.....	36
3.6	Tahap Pengolahan Data.....	36
3.6.1	Analisis Beban Emisi Proses Eksploitasi dan Produksi	37
3.6.2	Analisis <i>Life Cycle Assessment</i> Menggunakan SimaPro..	38
3.6.3	Penentuan Program Alternatif	39
3.7	Kesimpulan dan Saran	39
BAB IV.....		41
HASIL DAN PEMBAHASAN		41
4.1	Profil PT Semen Indonesia	41
4.2	Analisis Perhitungan Beban Emisi	44
4.2.1	Perhitungan Beban Emisi Unit Eksploitasi	47
4.2.2	Perhitungan Beban Emisi Unit <i>Crusher</i>	50
4.2.3	Perhitungan Beban Emisi Unit <i>Raw Mill</i>	51

4.2.4	Perhitungan Beban Emisi Unit <i>Kiln-Cooler</i>	54
4.2.5	Perhitungan Beban Emisi Unit <i>Finish Mill</i>	63
4.2.6	Perhitungan Beban Emisi Unit <i>Packer</i>	66
4.2.7	Perhitungan Beban Emisi Unit <i>Coal Mill</i>	68
4.2.8	Beban Emisi Per Ton Produksi Semen	71
4.2.9	<i>Benchmarking</i>	73
4.3	<i>Life Cycle Assessment</i>	74
4.3.1	Penentuan Tujuan dan Lingkup.....	74
4.3.2	Penentuan <i>Life Cycle Inventory</i> (LCI)	74
4.3.3	Penentuan <i>Life Cycle Impact Assessment</i> (LCIA)	95
4.3.4	Interpretasi Data	105
4.4	Skenario Program Lingkungan.....	125
	BAB V.....	131
	KESIMPULAN DAN SARAN	131
5.1	Kesimpulan	131
5.2	Saran	131
	DAFTAR PUSTAKA.....	133
	LAMPIRAN	141

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Komposisi Campuran Semen.....	15
Tabel 2.2 Kategori Dampak dan Media TRACI.....	28
Tabel 2.3 Penelitian Terdahulu	29
Tabel 3.1 Data-Data yang Diperlukan	36
Tabel 4.1 Faktor Emisi Excavator	47
Tabel 4.2 Faktor Emisi Kendaraan Berat	47
Tabel 4.3 Faktor Emisi <i>Dump Truck</i>	48
Tabel 4.4 Perhitungan Beban Emisi Kendaraan Tambang	49
Tabel 4.5 Konsumsi Listrik Unit <i>Crusher</i>	50
Tabel 4.6 Perhitungan Beban Emisi <i>Stack Unit Raw Mill</i>	52
Tabel 4.7 Nilai Kalor Bahan Bakar	54
Tabel 4.8 Perhitungan Beban Emisi Penggunaan IDO	55
Tabel 4.9 Perhitungan Beban Emisi Penggunaan Batubara	55
Tabel 4.10 Perhitungan Beban Emisi Penggunaan Sekam Padi	56
Tabel 4.11 Perhitungan Beban Emisi Penggunaan <i>Cocopeat</i>	56
Tabel 4.12 Perhitungan Beban Emisi Penggunaan Aval Tembakau	57
Tabel 4.13 Perhitungan Beban Emisi Penggunaan Resin	58
Tabel 4.14 Perhitungan Beban Emisi Penggunaan RDF	58
Tabel 4.15 Perhitungan Beban Emisi <i>Stack Unit Kiln-Cooler</i>	60
Tabel 4.16 Perhitungan Beban Emisi <i>Stack Unit Finish Mill</i>	64
Tabel 4.17 Perhitungan Beban Emisi <i>Stack Unit Packer</i>	67
Tabel 4.18 Perhitungan Beban Emisi <i>Stack Unit Coal Mill</i>	69
Tabel 4.19 Beban Emisi Keseluruhan Proses	71
Tabel 4.20 Beban Emisi per Ton Produksi Semen	72
Tabel 4.21 Data Inventori Unit Eksploitasi.....	76
Tabel 4.22 Data Inventori Unit <i>Crusher</i>	78
Tabel 4.23 Data Inventori Unit <i>Raw Mill</i>	81
Tabel 4.24 Data Inventori Unit <i>Kiln-Cooler</i>	84
Tabel 4.25 Data Inventori Unit <i>Finish Mill</i>	87
Tabel 4.26 Data Inventori Unit <i>Packer</i>	90
Tabel 4.27 Data Inventori Unit <i>Coal Mill</i>	93
Tabel 4.28 <i>Normalization Factor</i>	97
Tabel 4.29 Kontribusi Dampak Tahap Karakterisasi Proses	100
Tabel 4.30 Kontribusi Dampak Tahap Normalisasi Proses Eksploitasi	103

Tabel 4.31 Penambahan dan Pengurangan Material, Energi, dan Emisi ..	118
Tabel 4.32 Hasil Penilaian Dampak	119
Tabel 4.33 Data Deviasi Per Kategori Dampak	120

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Proses Produksi Semen.....	7
Gambar 2.3 Kerangka TRACI.....	27
Gambar 3.1 Kerangka Penelitian.....	35
Gambar 4.1 Lokasi PT Semen Indonesia (Persero) Pabrik Tuban.....	42
Gambar 4.2 Sistem Boundary.....	43
Gambar 4.3 Grafik <i>Benchmarking</i> Industri Semen	73
Gambar 4.4 Diagram <i>Material Balance</i> Unit <i>Crusher</i>	79
Gambar 4.5 Diagram <i>Material Balance</i> Unit <i>Raw Mill</i>	82
Gambar 4.6 Diagram <i>Material Balance</i> Unit <i>Kiln-Cooler</i>	85
Gambar 4.7 Diagram <i>Material Balance</i> Unit <i>Finish Mill</i>	88
Gambar 4.8 Diagram <i>Material Balance</i> Unit <i>Packer</i>	91
Gambar 4.9 Diagram <i>Material Balance</i> Unit <i>Coal Mill</i>	94
Gambar 4.10 Diagram Pohon Dampak <i>Carcinogenics</i> Proses Produksi Semen	98
Gambar 4.11 Diagram Karakterisasi Penilaian Dampak Proses Eksploitasi dan Produksi Semen.....	101
Gambar 4.12 Diagram Normalisasi Penilaian Dampak Proses Eksploitasi dan Produksi Semen.....	104
Gambar 4.13 Diagram Kontribusi Material dan Energi Terhadap Dampak <i>Carcinogenics</i>	107
Gambar 4.14 Diagram Kontribusi Material dan Energi Terhadap Dampak <i>Ecotoxicity</i>	108
Gambar 4.15 Diagram Kontribusi Material dan Energi Terhadap Dampak <i>Global Warming</i>	110
Gambar 4.16 Diagram Kontribusi Material dan Energi Terhadap Dampak <i>Acidification</i>	111
Gambar 4.17 Diagram Kontribusi Material dan Energi Terhadap Dampak <i>Respiratory Effects</i>	113
Gambar 4.18 Diagram Kontribusi Material dan Energi Terhadap Dampak <i>Smog</i>	115
Gambar 4.19 Diagram Hasil Penilaian Dampak pada <i>Sensitivity Check</i>	119

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan semen di Indonesia dalam kurun waktu 10 tahun terakhir mengalami peningkatan hingga 63%. Tercatat, konsumsi semen pada tahun 2010 sebesar 40,78 juta ton, sedangkan permintaan semen hingga akhir 2017 mencapai 107,4 juta ton (Kemenperin, 2018). Semen merupakan salah satu bahan dasar utama dalam konstruksi bangunan. Produksi semen yang tinggi berdampak pada tingginya konsumsi energi dan bahan baku yang dibutuhkan, sehingga akan menimbulkan dampak serius terhadap lingkungan (Boesch, 2010). Seiring pesatnya perkembangan semen, muncul beberapa tipe semen antara lain *Ordinary Portland Cement* (OPC), *White Cement*, dan *Portland Composite Cement* (PCC) (Purnawan, 2017). Sumber bahan bakar utama yang digunakan dalam pembuatan semen yaitu batubara, tepatnya pada proses pembakaran dalam *kiln* (Puspitorini, 2013).

PT Semen Indonesia (Persero) Tbk. merupakan salah satu perusahaan yang bergerak dalam industri semen. Pada tahun 2017, produksi semen yang dihasilkan sebanyak 29,6 juta ton, konsumsi energi total sebesar 53.559.270 GJ per tahun (Laporan Keberlanjutan Semen Indonesia, 2018). Material yang digunakan dalam pembuatan semen yaitu batuan kapur, tanah liat, pasir silika, *copper slag*, pasir besi, *gypsum*, *trass*, *fly ash*, dan *return dust* (Laporan Tahunan Semen Indonesia, 2018). Jenis semen utama yang diproduksi oleh PT Semen Indonesia (Persero) Tbk. paling banyak adalah semen *portland* tipe II-V (non-OPC) (Laporan Tahunan Semen Indonesia, 2018) Sumber pemakaian energi berasal dari batubara, *biomass*, *IDO (Industrial Diesel Oil)*, dan listrik (Dokumen PROPER Semen Indonesia, 2014).

Proses pembakaran batubara dari proses utama industri semen menghasilkan emisi gas CO₂, NO_x, SO₂ dan partikulat (Finahari, 2007). Emisi gas buangan yang dihasilkan didominasi oleh gas CO₂. Sebanyak 0,5 ton CO₂/ton semen dihasilkan pada proses dekarbonasi batu kapur saat material bahan baku dibakar. Kemudian sebanyak 0,75 ton CO₂ dihasilkan dari pembakaran bahan bakar untuk mengoperasikan *kiln* (tanur). Jadi total emisi CO₂ yang dihasilkan dari proses produksi semen sebesar 162 ton (Minallah, 2017). Gas pencemar dapat menyebabkan gangguan

kesehatan pada manusia, seperti merusak susunan hemoglobin, penyakit ISPA, iritasi tenggorokan, penyakit pneumokinos, kardiovaskuler dan kanker (Rachmawati, 2013).

Berdasarkan kondisi yang ada, maka perlu dilakukan pembuatan strategi alternatif untuk mengurangi beban emisi yang dihasilkan dari proses produksi maupun eksploitasi. Untuk menganalisis dampak lingkungan yang diakibatkan oleh proses produksi salah satunya dapat menggunakan metode *Life Cycle Assessment* (LCA). Kelebihan dari metode LCA dapat menganalisis dampak potensial yang dapat terjadi pada lingkungan secara komprehensif (Wahyudi, 2017). Melalui metode LCA dapat diteliti *environmental impact*, yaitu perubahan apapun yang terjadi pada lingkungan, baik merugikan atau menguntungkan, seluruhnya atau sebagian disebabkan oleh aspek lingkungan (ISO 14001, 2004).

Aplikasi yang dipilih untuk menjalankan metode LCA yaitu SimaPro karena dapat membantu secara efektif dalam menerapkan keahlian LCA, membantu pengambilan keputusan yang kuat, mengubah *life-cycle* produk menjadi lebih baik (Bagaswara dan Yuswono, 2017). Pendekatan yang digunakan untuk menjalankan SimaPro pada penelitian ini yaitu dengan pendekatan *midpoint*, dimana pada pendekatan *midpoint* fokus pada salah satu masalah lingkungan (RIVM, 2018). Pendekatan *midpoint* yang digunakan yaitu TRACI (Menoufi, 2011). Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi dampak yang ditimbulkan pada serangkaian proses eksploitasi dan produksi PT Semen Indonesia (Persero) Tbk. menggunakan metode LCA. Diharapkan dengan alternatif strategi yang dibuat, dapat mengurangi dampak dari proses eksploitasi dan produksi terhadap lingkungan di PT Semen Indonesia (Persero) Tbk.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka rumusan masalah yang akan dibahas antara lain:

1. Berapa beban emisi yang dihasilkan dari proses eksploitasi dan produksi di PT Semen Indonesia (Persero) Tbk.?
2. Bagaimanakah dampak lingkungan yang terjadi pada kegiatan eksploitasi dan produksi di PT Semen Indonesia (Persero) Tbk. menggunakan metode *Life Cycle Assessment* (LCA)?

3. Program alternatif apa yang efektif untuk mengurangi dampak lingkungan dari proses eksploitasi dan produksi di PT Semen Indonesia (Persero) Tbk.?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Menganalisis beban emisi pada kegiatan eksploitasi dan produksi PT Semen Indonesia (Persero) Tbk. Pabrik Tuban
2. Mengidentifikasi dampak lingkungan yang terjadi akibat kegiatan eksploitasi dan produksi di PT Semen Indonesia (Persero) Tbk. Pabrik Tuban menggunakan metode *Life Cycle Assessment* (LCA).
3. Merekomendasikan program alternatif untuk mengurangi dampak lingkungan dari emisi yang dihasilkan pada proses eksploitasi dan produksi PT Semen Indonesia (Persero) Tbk. Pabrik Tuban.

1.4 Manfaat Penelitian

1. Memberikan informasi mengenai dampak emisi yang telah dihasilkan dari setiap tahap proses eksploitasi dan produksi semen.
2. Memberikan rekomendasi berupa alternatif program dalam mereduksi emisi dan dampak lingkungan dari hasil analisis *life cycle assessment* (LCA).
3. Sebagai bahan evaluasi perusahaan dalam menganalisa aktivitas proses eksploitasi dan produksi yang ramah lingkungan.

1.5 Ruang Lingkup

Ruang lingkup dari penelitian ini adalah:

1. Pengambilan data dilakukan di PT Semen Indonesia (Persero) Tbk. Pabrik Tuban.
2. Data yang digunakan berupa data sekunder yang berasal dari perusahaan.
3. Lingkup analisis sistem proses adalah *cradle to gate*, dimulai dari proses penambangan bahan baku untuk pembuatan semen sampai dengan proses *packing* semen.
4. Proses analisis *life cycle assessment* menggunakan aplikasi SimaPro 8.5.2.

5. Perhitungan beban emisi pada parameter CO₂, CH₄, N₂O, SO₂, NO₂, *particulate matter* (PM), dan CO.
6. Perhitungan beban emisi Gas Rumah Kaca (GRK) diasumsikan pada keadaan pembakaran sempurna.
7. Data input SimaPro: bahan baku (raw material), bahan bakar (batubara dan bahan bakar alternatif), energi listrik, dan emisi.
8. Kategori dampak yang dianalisis meliputi *global warming potential for 100 years, ecotoxicity, carcinogenics, acidification, smog formation, dan respiratory effects*. Pemilihan kategori didasarkan pada dampak lingkungan yang berhubungan dengan proses produksi semen.
9. Penentuan alternatif program berdasarkan analisis, hasil diskusi dan saran dari pihak PT Semen Indonesia (Persero) Tbk.
10. Metode yang digunakan dalam menjalankan SimaPro 8.5.2 yaitu TRACI.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Semen

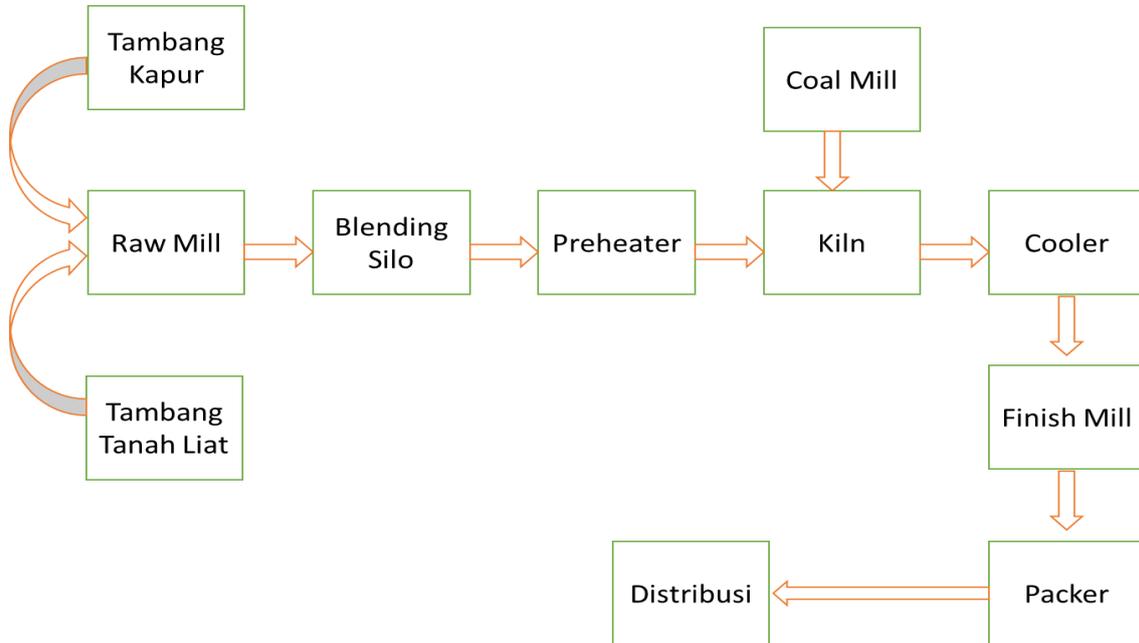
Semen merupakan senyawa yang berfungsi untuk zat pengikat hidrolis yang tersusun atas Kalsium (K), Silika (Si), dan Hidrogen (H). Apabila semen bereaksi dengan air menyebabkan muncul karakteristik yang bersifat mengikat terhadap bahan-bahan padat lain membentuk satu kesatuan yang kompak. Pada umumnya semen dimanfaatkan sebagai bahan dasar konstruksi untuk bangunan. Awalnya, semen terbentuk dari penggilingan beberapa material, seperti batu kapur, tanah liat, pasir silika, pasir besi, sehingga membentuk klinker. Ditambah sejumlah gypsum dan mineral lainnya, maka terbentuklah semen atau biasa disebut dengan semen *portland* (Cahyono, 2017).

Pada dasarnya tiap-tiap industri semen memiliki proses produksi yang hampir sama, perbedaannya terdapat pada tata letak dan jenis peralatan yang digunakan. Secara umum dikenal dua jenis proses produksi semen, yaitu *dry process* dan *wet process*. Pada *dry process*, tahapan penggilingan (*grinding*) dan pencampuran (*blending*) bahan baku dilakukan dalam kondisi kering. Namun pada *wet process*, campuran bahan bakunya dilakukan pada kondisi basah (Hidayat, 2009).

Berdasarkan SNI 15-2049-2004 tentang *Semen Portland* berdasarkan jenis dan penggunaannya, semen portland dibagi menjadi 5 jenis. Jenis I yaitu semen *portland* untuk penggunaan umum yang tidak memerlukan persyaratan-persyaratan khusus seperti yang disyaratkan pada jenis-jenis lain. Jenis II yaitu semen *portland* yang dalam penggunaannya memerlukan ketahanan terhadap sulfat atau kalor hidrasi sedang. Jenis III semen *portland* yang dalam penggunaannya memerlukan kekuatan tinggi pada tahap permulaan setelah pengikatan terjadi. Jenis IV yaitu semen *portland* yang dalam penggunaannya memerlukan kalor hidrasi rendah. Jenis V yaitu semen *portland* yang dalam penggunaannya memerlukan ketahanan tinggi terhadap sulfat. Jenis semen yang diproduksi pada PT Semen Indonesia yaitu semen jenis II, jenis III, jenis IV, dan jenis V.

2.2 Proses Bisnis Semen

Proses bisnis semen dimulai dari penambangan bahan baku, kemudian material hasil penambangan tersebut diperkecil ukurannya dengan proses pemecahan yang dilakukan oleh alat pemecah batu (*stone crusher*). Selanjutnya, masing-masing bahan baku disimpan dalam sebuah gudang penyimpanan bahan baku. Kualitas dan komposisi masing-masing bahan baku yang sudah tersimpan dalam tempat penyimpanan ini kemudian secara periodik dilakukan pengujian untuk mengetahui komposisi masing-masing materialnya. Ini penting, sebab desain campuran harus selalu disesuaikan dengan komposisi bahan baku yang ada (Hidayat, 2009). Proses bisnis PT Semen Indonesia (Persero) Tbk. Pabrik Tuban dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Proses Produksi Semen

Sumber: Laporan Tahunan 2017 Semen Indonesia

Menurut Sidik dan Ahmad (2018), proses pembuatan semen di PT Semen Indonesia (Persero) Tbk. meliputi:

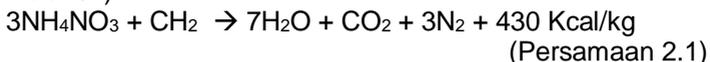
2.2.1 Proses Eksplorasi

a. Penambangan Kapur

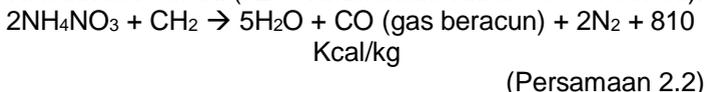
▪ Pengeboran dan Peledakan

Kegiatan pengeboran merupakan pekerjaan pertama kali yang dilakukan dengan tujuan untuk membuat sejumlah lubang ledak dengan geometri dan pola tertentu pada massa batuan yang selanjutnya akan diisi dengan bahan peledak untuk diledakan. Peledakan bertujuan untuk memisahkan material bahan baku dari massa batuan induk dengan fragmentasi yang diinginkan. Bahan peledak yang digunakan adalah ANFO (94,5% Ammonium Nitrat, 5,5% *fuel oil*) dan power gel. Selain kedua bahan peledak utama tersebut juga digunakan bahan pelengkap dari bahan peledak utama yang fungsinya untuk meledakan bahan peledak utama tersebut baik secara langsung maupun tidak langsung dalam suatu sistem peledakan. Alat ini biasa disebut dengan detonator/balsting cap/penggalak. Dalam setiap peledakan yang harus diperhatikan adalah *zero oxygen balance* yaitu cara untuk mengeliminir semua bahan beracun dengan menetralkannya menggunakan molekul oksigen, artinya jumlah molekul oksigen sebelum dan sesudah reaksi harus sama, jika tidak sama akan menghasilkan bahan beracun. Persamaan reaksinya sebagai berikut:

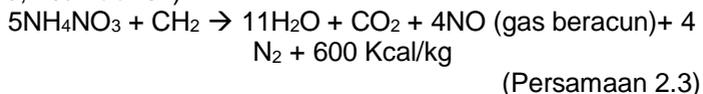
Zero Oxygen Balance (94,5 % Ammonium Nitrat + 5,5 % *Fuel Oil*) :



Kelebihan *Fuel Oil* (92 % Ammonium Nitrat + 8 % *Fuel Oil*):



Kelebihan Ammonium Nitrat (96,6 % Ammonium Nitrat + 3,4 % *Fuel Oil*)



▪ Pemuatan dan Pengangkutan

Batu kapur yang diledakan dikeruk dan diangkut dengan alat angkut shovel dan loader. Selanjutnya diangkut oleh dump truck menuju crusher dan storage. Pada kondisi tertentu material bisa saja masuk stock yard sebelum masuk crusher karena gangguan crusher atau kualitas yang kurang memenuhi syarat (adanya material dolomit). Tetapi hal tersebut sedapat mungkin dihindari karena akan memerlukan tambahan biaya pengangkutan disamping kontrol kualitas dalam stock yard sendiri yang mengalami kesulitan.

b. Penambangan Tanah Liat

▪ Pembersihan dan Pengupasan Tanah Penutup

Kegiatan penambangan tanah liat dimulai dengan pembersihan lahan dan pengupasan tanah penutup setebal 30 - 100 cm. Tanah penutup ini disimpan di daerah terpisah untuk tujuan reklamasi, adapun alat yang digunakan untuk kegiatan ini adalah *bulldozer*.

▪ Penggalian dan Pemuatan

Untuk memisahkan material dari massa induknya dilakukan penggalian dengan excavator yang kemudian dimuatkan ke *dump truck*. Penggalian dilakukan jenjang demi jenjang dengan tinggi jenjang 2 meter dan lebar 3-4 meter.

▪ Pengangkutan

Tanah liat dari kuari diangkut ke clay storage dengan dump truck berkapasitas 18 ton. Jarak *clay storage* ke *Quarry* Telogowaru sekitar 2 km sedangkan *clay storage* ke *Quarry* Mliwang sekitar 5 km. Di *clay storage*, tanah liat dipisahkan menurut blok dan kuari untuk mengontrol kualitas pada saat pengumpanan ke *clay crusher*.

2.2.2 Proses Produksi

1) *Crusher*

Crusher adalah alat yang digunakan untuk menghancurkan tanah liat dan batu kapur yang berukuran besar sehingga menjadi lebih kecil untuk diolah di *raw mill*. Tanah liat dan batu kapur yang semula memiliki ukuran diameter terbesar 80 cm setelah keluar dari *crusher* berubah menjadi maksimal 10 cm. Batu kapur diumpankan lewat *hopper*, selanjutnya batu kapur akan diarahkan oleh *wobbler feeder* masuk ke dalam crusher dan jatuh di atas *breaker plate*. Batu kapur ini selanjutnya oleh

roller mill. Untuk material yang sudah halus akan keluar lewat *discharge opening* yang sebelumnya melewati screen berukuran bukaan 10 cm. Hasil produk *crusher* keluar dari outlet pada *roller mill*. Produk *crusher* akan langsung jatuh dan diangkut *apron conveyor* ke *limestone storage* melalui *belt conveyor*.

2) Storage Pile

Setelah mengalami proses penghancuran, bahan-bahan tersebut dikirim menuju tempat penyimpanan yaitu *storage pile* dengan menggunakan *belt conveyor*. Umumnya, *storage pile* terdiri dari dua sisi yaitu sisi kanan dan kiri, jika pada bagian kanan sedang digunakan sebagai proses, maka sisi bagian kiri akan diisi bahan baku dari *crusher*. Untuk mengatur letak penyimpanan bahan baku digunakan *tripper*. Selain itu *stock pile* juga dilengkapi dengan *reclaimer* yang berfungsi untuk memindahkan atau mengambil *raw material* dari *stock pile* ke *belt conveyor* sesuai dengan kebutuhan proses. Alat ini juga berfungsi untuk menghomogenkan bahan baku yang akan dipindahkan ke *belt conveyor*. Selanjutnya bahan baku dikirim dengan menggunakan *belt conveyor* menuju tempat penyimpanan kedua yaitu Bin.

3) Raw Mill

Material yang dilewatkan timbangan otomatis campuran batu kapur, tanah liat, pasir silika, dan pasir besi dilakukan penggilingan dan pengeringan dalam *raw mill* hingga mencapai derajat kehalusan tertentu. Media pengeringannya adalah udara panas yang berasal dari kiln dan *pre-heater*. Udara panas tersebut juga berfungsi sebagai media pembawa bahan-bahan yang telah halus menuju proses selanjutnya. Bahan baku masuk kedalam *raw mill* pada bagian tengah (tempat penggilingan) sementara itu panas masuk kedalam bagian bawahnya. Material yang sudah tergilinding halus akan terbawa udara panas keluar *raw mill* melalui bagian atas alat tersebut. *Raw Mill* memiliki bagian yang dinamakan *classifier* yang berfungsi untuk mengendalikan ukuran partikel yang boleh keluar dari *raw mill*, partikel dengan ukuran besar dikembalikan ke dalam *raw mill* untuk mengalami penghalusan selanjutnya sampai ukuran partikel mencapai ukuran yang diharapkan.

Sementara itu partikel yang ukurannya telah memenuhi kebutuhan akan terbawa udara panas menuju *cyclone*. Dimana

cyclone ini berfungsi untuk memisahkan antara partikel yang cukup halus dan partikel yang terlalu halus (debu). Partikel yang cukup halus akan turun ke bagian bawah *cyclone* dan dikirim ke *blending silo* untuk mengalami pengadukan dan homogenasi. Partikel yang terlalu halus (debu) akan terbawa udara panas menuju *electrostatic precipitator*. Alat ini berfungsi untuk menangkap debu-debu tersebut sehingga tidak lepas ke udara. Debu-debu yang tertangkap, di kumpulkan di dalam *dust bin*, sementara itu udara akan keluar melalui *stack*.

4) *Blending Silo*

Alat utama yang digunakan untuk mencampur dan menghomogenkan bahan baku adalah *blending silo*, dengan media pengaduk adalah udara. Bahan baku masuk dari bagian atas *blending silo*, oleh karena itu alat transportasi yang digunakan untuk mengirim bahan baku hasil penggilingan *blending silo* adalah *bucket elevator*, dan keluar dari bagian bawah *blending silo* dilakukan pada beberapa titik dengan jarak tertentu, dan diatur dengan menggunakan *valve* yang sudah diatur waktu bukanya. Proses pengeluaran dari beberapa titik dilakukan untuk memenuhi kehomogenan bahan baku.

5) *Pre-heater*

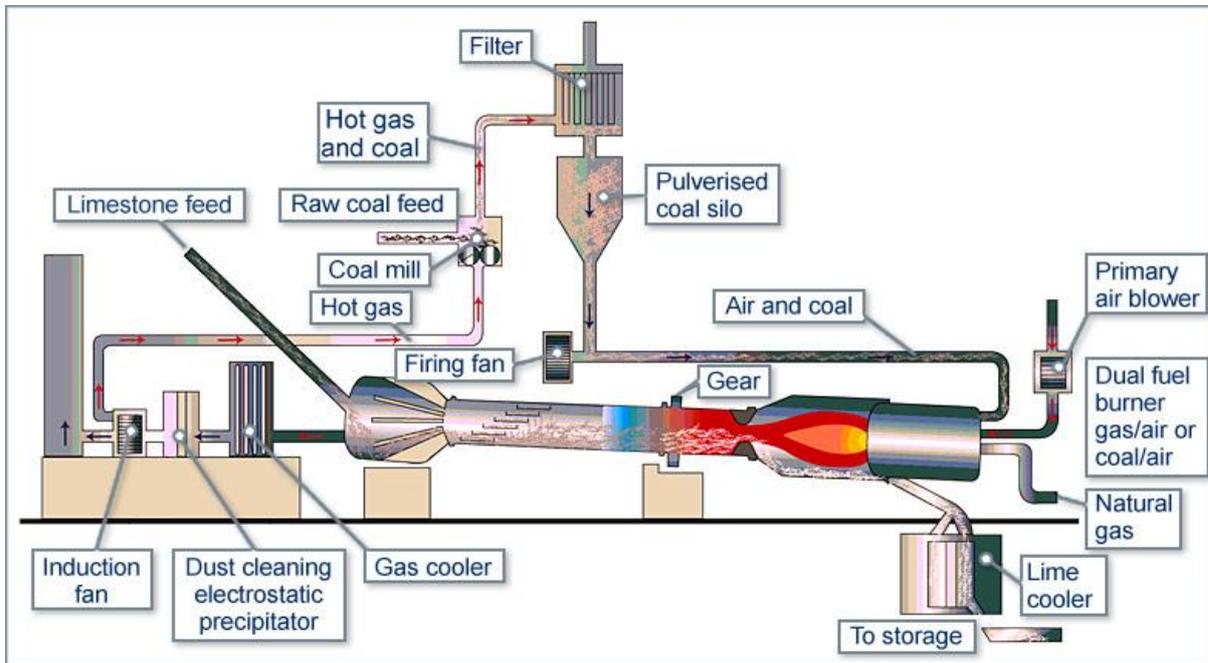
Alat utama yang digunakan untuk proses pemanasan awal bahan baku adalah *pre-heater*, sedangkan alat bantuannya adalah *kiln feed bin*. Setelah mengalami homogenasi di *blending silo*, material terlebih dahulu di tampung di dalam *kiln feed bin*, *bin* ini merupakan tempat umpan yang akan masuk ke dalam *pre-heater*. Ada 4 tahap pemanasan yang dilakukan dalam *pre-heater*. Pertama hingga ketiga adalah dipanaskan oleh angin panas dari *kiln*, selanjutnya dibakar dengan api hingga suhu mencapai 850-900°C sebelum masuk *kiln*. *Output* dari *pre-heater* ini adalah debu panas, karena titik didih bahan tersebut memang masih diatas suhu 900°C.

6) *Kiln*

Fungsi *Kiln* adalah untuk pembakaran material menjadi terak klinker. Cara kerjanya diawali umpan *kiln* dari *pre-heater* akan masuk melalui *inlet chamber*. Tenaga gerak dari motor dan *main gear* menyebabkan *kiln* berputar. Perputaran pada *kiln* diatur oleh *girth gear* yang berfungsi sebagai pengaman dan mengurangi beban *main gear* karena pengaruh kemiringan

dan gaya putar *kiln*, maka umpan akan bergerak perlahan di sepanjang *kiln*.

Dari arah yang berlawanan gas panas hasil pembakaran batubara dihembuskan oleh *burner*, sehingga terjadi kontak panas dan perpindahan panas antara umpan *kiln* dengan gas panas. Kontak panas tersebut akan mengakibatkan terjadinya reaksi kimia untuk membentuk komponen semen. Panas pada proses pembakaran yang keluar akan diserap blower. Pembakaran akan terus berlangsung sampai terbentuk klinker dan akan keluar menuju klinker *cooler*. Selama proses pembakaran, material akan melewati 4 zona dalam *kiln* dengan *range* suhu yang berbeda-beda sehingga dalam *kiln* akan terjadi reaksi kimia pembentukan senyawa penyusun semen. Skema proses pada kiln dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Proses Pembakaran Unit *Kiln*

Sumber: Sidiq dan Ahmad, 2018

7) **Cooler**

Setelah dipanaskan klinker didinginkan secara mendadak. Tujuan pendinginan secara mendadak adalah agar dihasilkan klinker yang bersifat *amorf* sehingga mudah digiling. Alat utama yang digunakan untuk proses pendinginan klinker adalah *cooler*. *Cooler* ini dilengkapi dengan alat penggerak material, sekaligus sebagai saluran udara pendingin yang disebut *grate* dan alat pemecah klinker (klinker *breaker*).

Setelah proses pembentukan klinker selesai dilakukan dalam tanur putar, klinker tersebut terlebih dahulu didinginkan di dalam *cooler* sebelum disimpan di dalam klinker silo. *Cooler* yang digunakan menggunakan udara luar sebagai pendingin. Udara yang keluar dari cooler dimanfaatkan sebagai media pemanas pada *raw mill*, sebagai pemasok udara panas pada *kiln*, dan sebagian lain di buang ke udara bebas. Proses pendinginan ini sama seperti *pre-heater*, yaitu diulangi berkali-kali hingga suhu klinker menjadi sekitar 90-100°C saja.

Setelah didinginkan klinker dikirim menuju tempat penyimpanan klinker (klinker silo) dengan menggunakan alat transportasi yaitu *deep pan conveyor*. Sebelum sampai di klinker silo, klinker akan melalui sebuah alat pendeteksi kapur bebas. Jika kandungan kapur bebas klinker melebihi batas yang diharapkan maka klinker akan dipisahkan dan disimpan dalam *bin* tersendiri.

8) **Dome Klinker**

Setelah terbentuk klinker, selanjutnya klinker disimpan di *dome* klinker yang berbentuk kubah. Klinker yang telah disimpan pada *dome silo*, lalu dibawa dengan menggunakan alat transportasi *apron conveyor* hingga menuju *belt conveyor*. Dari *belt conveyor*, klinker dibawa menuju *roller press*. *Roller press* berfungsi untuk membentuk *microcracks* pada material klinker, sehingga menjadi bentuk *sheet* dan mempermudah kerja dari *cement mill* (penggilingan tahap akhir).

Roller press mempunyai dua buah *roller* yaitu *fixed roller* dan *floating roller*. Kedua *roller core* ini bergerak rotasi secara berlawanan dan yang *floating roller* selain bergerak rotasi, juga bergerak secara translasi. Pergerakan ini dilakukan dengan menggunakan tenaga hidrolik. Setelah proses *pre-grinding* pada *roller press*, maka klinker dimasukkan pada

cement mill untuk dihaluskan sekaligus pencampuran *gypsum*, *pozzolan*, dan *limestone* sebagai bahan tambahan.

9) *Finish Mill*

Finish mill merupakan kegiatan pembuatan semen pada tahap akhir. Dimana pada tahapan ini akan terjadi proses pencampuran, penggilingan, dan penghalusan. Selain itu di tahapan ini akan ada penambahan material ketiga untuk menentukan jenis semen yang akan di proses. Material ketiga akan ditambahkan sesuai dengan kebutuhan komposisi semen OPC, PPC, PCC sesuai dengan Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Komposisi Campuran Semen

No	Bahan Semen	Tipe Semen			% Pemakaian
		OPC	PPC	PCC	
1	Klinker	√	√	√	70 - 90 %
2	Gypsum	√	√	√	4 - 5 %
3	Trass	-	√	√	4 - 20 %
4	Batu kapur & Dolomit	√	√	√	4 - 20 %
5	Fly Ash	-	√	√	2%
6	Dust	√	-	-	2%
7	GBFS	√	-	-	5- 12 %

Sumber: Data Material Ketiga Semen Indonesia

10) Semen Silo

Semen yang sudah jadi disimpan di semen silo untuk dilakukan pemeriksaan laboratorium baik secara fisik maupun kimiawi. Setelah dinyatakan baik, semen siap dijual dipasaran.

11) Pengantongan Semen (*Packing Plant*)

Setelah melalui tahap pengolahan akhir, maka semen dari silo semen akan ditransportasikan dengan *air slight* menuju tempat *packer*. Adapun proses pengepakan semen menggunakan mesin *rotary packer*. *Filling spot* dimasukkan ke dalam lubang yang terdapat pada kantong kemasan, kemudian semen dicurahkan melalui *filling spot* ke dalam kantong. Pada alat *rotary packer* terdapat timbangan yang berfungsi untuk mengukur berat semen yang masuk ke dalam kemasan.

Pada *packer*, hanya ada dua jenis semen yang di *packing*. Yaitu *Ordinary Portland Cement* (OPC) yang di *packing* dengan truk tabung langsung ke pelabuhan untuk proyek proyek besar. Sedangkan untuk semen jenis *Pozzolan Portland Cement* (PPC) adalah semen yang di *packing* untuk produksi perumahan yang biasa dijual dengan kemasan 40 kg atau 50 kg. Atau bisa juga semen curah agar dapat di *packing* di pabrik cabang atau juga dimasukkan juga ke dalam kapal. Setelah dari kapal akan didistribusikan ke luar pulau, jika dengan menggunakan truk akan dikirim ke dalam pulau atau Gudang-gudang penyimpanan yang ada.

2.3 Emisi pada Industri Semen

Secara umum industri semen di Indonesia mempunyai intensitas emisi Gas Rumah Kaca (GRK) sebesar 0,833 ton CO₂/ton semen. Lebih dari 50% kebutuhan semen terserap di Pulau Jawa dan sisanya secara berurutan Sumatera, Kalimantan, Sulawesi dan lainnya. Semakin tinggi kebutuhan akan semen, mendorong pertumbuhan industri semen di Indonesia. Hal ini menjadikan juga industri semen sebagai salah satu penyumbang emisi gas karbon dioksida di Indonesia khususnya di Pulau Jawa (Atmaja, 2015).

Proses pembuatan semen melalui proses pembakaran dengan suhu yang tinggi serta penggilingan bahan baku menjadi ukuran yang lebih kecil akan menghasilkan debu dan gas emisi yang dikeluarkan lewat cerobong *kiln*. Emisi yang dikeluarkan yaitu senyawa seperti N₂, CO₂, O₂, H₂O, SO₂, TOC, NO_x, HCl, dioksin, dan logam berat. Pencemar ini dapat menyebabkan berbagai dampak baik bagi lingkungan juga bagi makhluk hidup (Alfianto, 2014).

2.4.1 Emisi Gas Karbon Dioksida

Menurut Atmaja (2015), emisi karbon dioksida yang dihasilkan dari proses produksi yaitu:

a) Kalsinasi

Pada proses kalsinasi dari masing masing pabrik semen perhitungan emisi karbon dioksida digunakan pendekatan jumlah klinker yang diproduksi oleh masing-masing pabrik. Jumlah emisi tersebut dihitung dengan persamaan:

Persamaan reaksi:



b) Penggunaan Bahan Bakar

Industrial diesel oil, ataupun bahan bakar alternatif dimaksudkan untuk menciptakan energi panas untuk pembakaran klinker. Nilai emisi dihitung dengan menggunakan persamaan:

Persamaan reaksi:



2.4.2 Emisi Gas Metana

CH₄ adalah salah satu gas yang termasuk ke dalam golongan gas rumah kaca bersama dengan CO₂ dan H₂O. Gas rumah kaca akan menyerap dan meneruskan panas radiasi dari matahari serta akan memantulkan balik radiasi gelombang panjang yang dilepaskan permukaan bumi sehingga bumi mendapatkan pemanasan dua kali. Pada konsentrasi CH₄ yang lebih kecil dari konsentrasi CO₂, efektifitas CH₄ dalam menangkap panas kira-kira 25 kali lebih besar daripada CO₂ (Slamet, 2001). Metana adalah gas hidrokarbon yang sebagian besar berasal dari alam yang dihasilkan oleh dekomposisi anaerobik bahan organik. Sekitar 60-90% metana yang diproduksi dapat dioksidasi sebelum dilepas ke atmosfer. Diasumsikan bahwa saat ini 60-70% dari total emisi gas metana adalah berasal dari antropogenik (Linarsih dan Sarto, 2018).

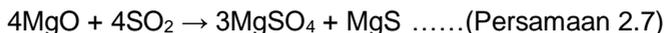
2.4.3 Emisi Gas Nitrogen Dioksida

Gas ini terbentuk dari reaksi antara nitrogen dan oksigen di udara. Reaksi tersebut dapat terjadi pada pembakaran hingga suhu di atas 1210°C (Depkes RI, 2010). NO₂ dapat dihasilkan dari proses pembakaran bahan bakar minyak dan bahan bakar fosil. NO₂ memiliki karakteristik berwarna coklat kemerahan dan berbau tajam (Barata, 2005).

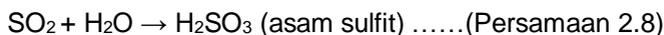
2.4.4 Emisi Gas Sulfur Dioksida

Menurut Nugrainy et al (2015), sulfur oksida merupakan pencemar yang paling umum, terutama yang ditimbulkan akibat pembakaran bahan bakar fosil, yang mengandung sulfur tinggi

dalam bentuk sulfur organik dan inorganik. Gas SO₂ juga dapat membentuk garam sulfat apabila bertemu dengan oksida logam, yaitu melalui proses kimiawi berikut ini:



Udara yang mengandung uap air akan bereaksi dengan gas SO₂ sehingga membentuk asam sulfat:



Udara yang mengandung uap air akan bereaksi dengan gas SO₃ membentuk asam sulfat:



Pemakaian batubara sebagai bahan bakar pada beberapa kegiatan industri seperti yang terjadi di beberapa negara Eropa Barat dan Amerika, menyebabkan kadar gas SO_x dengan uap air yang terdapat di udara akan membentuk asam sulfat maupun asam sulfat (Nugrainy et al., 2015). Kandungan sulfur dalam batubara apabila dibakar akan berubah menjadi oksida sulfur. Oksida sulfur (SO_x) ini akan menjadi H₂SO₄ (asam sulfat) dalam udara lembab atau berair, dan bila jatuh ke bumi akan menjadi hujan asam dan menimbulkan dampak negatif terhadap manusia, hewan, dan tumbuh-tumbuhan (Talayansa et al., 2017).

2.4.5 Emisi Partikulat

Particulate Matter atau PM merupakan campuran yang sangat rumit dari berbagai senyawa organik dan anorganik yang tersebar di udara dengan diameter yang sangat kecil, mulai dari < 1 mikron sampai dengan maksimal 500 mikron (Chaerunnisa et al., 2017). Partikulat udara halus dan partikulat terespirasi merupakan partikulat yang berbahaya karena dapat secara efektif masuk ke saluran pernafasan. Partikulat yang berukuran kurang dari 2,5 μm (PM_{2,5}) dapat berpenetrasi menembus bagian terdalam dari paru-paru dan sistem jantung, menyebabkan infeksi saluran pernafasan akut, kanker paru-paru, penyakit kardiovaskular dan bahkan kematian (Santoso et al., 2016).

Debu (*dust*) merupakan salah satu jenis aerosol padat yang terbentuk, karena proses pemisahan suatu bahan secara mekanik, seperti proses penghancuran, penggilingan dan peledakan. Proses ini dapat terjadi, karena gesekan bahan dengan angin yang kencang atau pergeseran dengan bahan lain. Contohnya adalah

debu semen (*cement dust*) dan debu dari unsur logam (*metallurgical*). Debu dianggap sebagai partikel bahan padat yang terbagi secara halus dengan ukuran berkisar dari 0,1 hingga 100 μm (Suhariyono dan Muji, 2003).

2.4 Pencemaran Udara

Berdasarkan PP Nomor 41 Tahun 1999, Pencemaran udara adalah masuknya atau dimasukkannya zat, energi, dan/atau komponen lain ke dalam udara ambien oleh kegiatan manusia, sehingga mutu udara ambien turun sampai ke tingkat tertentu yang menyebabkan udara ambien tidak dapat memenuhi fungsinya. Pada umumnya, sumber pencemaran udara berasal dari sumber bergerak dan sumber tidak bergerak. Kontribusi gas buang dari sektor industri sebesar 10-15%, sedangkan kontribusi gas buang dari kendaraan bermotor mencapai 60-70%. Sisanya berasal dari sumber pembakaran lain; misalnya rumah tangga, pembakaran sampah, kebakaran hutan, dan lain-lain (Ismiyati, 2014).

Pencemaran udara pada tingkat tertentu dapat mengurangi tingkat produktivitas manusia dalam aktivitasnya. Selain itu pencemaran udara juga mempunyai dampak bagi lingkungan flora dan fauna baik secara primer ataupun sekunder. Dimana pada tingkat-tingkat tertentu akan berdampak pada menurunnya tingkat produktivitas pertanian, yang juga akan berakibat pada sektor lainnya. Sementara dampak pencemaran udara pada material adalah terjadinya korosi dan hilangnya keindahan material tersebut (Budiyono, 2009).

2.5 Carcinogenics

Karsinogenik merupakan hal-hal yang dapat menyebabkan kanker. Pada umumnya, kanker timbul karena paparan terhadap suatu karsinogen secara berkali-kali dan aditif pada dosis tertentu, tetapi pada keadaan tertentu dapat juga timbul dari dosis tunggal karsinogen (Kartawiguna, 2011). Di Indonesia terdapat kecenderungan peningkatan jumlah penderita kanker dari tahun ke tahun. Penyelidikan selama 20 tahun terakhir menyimpulkan bahwa 60-90% penyakit kanker berhubungan dengan lingkungan, sehingga secara teoritis penyakit kanker dapat dicegah.

Karsinogenik adalah kecenderungan bahan uji untuk menimbulkan penyakit kanker pada makhluk hidup terutama manusia. Salah satu penyebab penyakit kanker adalah *particulate matter* (PM). Menghirup partikulat dapat menyebabkan beberapa

penyakit berbahaya, termasuk kronis penyakit paru obstruktif (PPOK) dan kanker paru-paru (Cornell, 2016). Penelusuran dari 1993 hingga 2003 mengindikasikan dampak yang besar dari emisi industri seperti pembangkit listrik, produksi semen dan pelabuhan pada kematian akibat kanker, khususnya hubungan positif antara perkiraan PM₁₀ dari pabrik industri dan kematian dikarenakan kanker pankreas, pleura, ginjal (Ancona et al., 2016). Serangkaian besar polutan yang memprihatinkan yang dipancarkan oleh pembakaran batu bara seperti polutan gas, partikel, benzena, hidrokarbon aromatik polisiklik, dan logam berat (Piersanti et al., 2018).

2.6 Ecotoxicity

Ekotoksitas merujuk pada potensi dari komponen biologi, kimia, atau fisika yang berpengaruh terhadap ekosistem dengan konsentrasi yang dapat mengganggu keseimbangan lingkungan (EPRI, 2010). Ekotoksitas adalah kecenderungan bahan uji untuk menimbulkan dampak buruk secara biokimia, fisiologi ataupun terhadap perilaku makhluk hidup. Ekotoksitas dapat terjadi secara alami maupun oleh ulah manusia. Berbagai macam racun yang sekarang relatif umum di masyarakat termasuk beberapa zat beracun yang disebut sebagai *ecotoxicants* (Connell, 2005). Zat *ecotoxicants* timbul oleh pembuatan, penggunaan, dan pembuangannya, yang mengarah pada distribusi di lingkungan alami dan paparan ekosistem alami padanya. Namun, pada era sekarang efek ekotoksitas sering terjadi akibat tindakan manusia seperti penggunaan bahan bakar untuk kendaraan, industri dan lain-lain (Tarazona, 2014). Zat tersebut dapat berupa pelepasan dari industri (hidrokarbon minyak bumi, logam berat, asam, alkali, pelarut), pembangkit listrik, pertanian (herbisida, insektisida), kegiatan domestik (pestisida, minyak bumi), atau kegiatan lain yang mengakibatkan pelepasan ke lingkungan. Polusi yang disebabkan oleh tindakan manusia sering disebut polusi antropogenik. Studi ekotoksitas digunakan untuk mencegah dan mengurangi efek ekotoksitas yang timbul akibat perilaku manusia.

2.7 Global Warming

Pemanasan global (global warming) adalah suatu bentuk ketidakseimbangan ekosistem di bumi yang diakibatkan oleh peningkatan suhu rata-rata permukaan bumi. Selama kurang lebih

100 tahun terakhir, suhu rata-rata permukaan bumi meningkat sebesar 0,74 °C (Utina, 2015). Menurut IPCC (2006), suhu rata-rata pada permukaan bumi meningkat sebesar 1,1 hingga 6,4 °C antara tahun 1990 hingga 2010. Meningkatnya suhu rata-rata permukaan bumi terjadi akibat meningkatnya emisi gas rumah kaca di atmosfer (Cahyono, 2010). Penyebab utama pemanasan ini adalah pembakaran bahan bakar fosil yang melepas gas CO₂ dan yang lainnya ke atmosfer (Sulistiyono, 2012). Atmosfer mempunyai beberapa lapis gas, termasuk gas rumah kaca dan awan, yang akan mengemisikan kembali sebagian radiasi infra merah yang diterima ke permukaan bumi (Houghton et al., 2001).

Kontribusi gas rumah kaca terhadap pemanasan global tergantung dari jenis gasnya. Gas rumah kaca yang penting kontribusinya terhadap pemanasan global adalah karbon dioksida (CO₂), *methane* (CH₄), dinitro oksida (N₂O), perfluorocarbon (PFC), hydrofluorocarbon (HFC) dan sulphur hexafluoride (SF₆). Setiap gas rumah kaca mempunyai potensi pemanasan global (*Global Warming Potential* - GWP) yang diukur secara relatif berdasarkan emisi CO₂ dengan nilai 1. Makin besar nilai GWP makin bersifat merusak (Sugiono, 2006).

2.8 Smog

Smog merupakan campuran dari polutan yang terbentuk ketika nitrogen oksida dan *volatile organic compound* (VOC) bereaksi dengan sinar matahari, menciptakan kabut berwarna coklat (EPA, 2004). Dua polutan primer yang menjadi penyebab utama terbentuknya smog yaitu nitrogen oksida dan VOC, ketika bereaksi dengan sinar matahari dapat menghasilkan polutan sekunder. Banyak senyawa kimia berbahaya yang terbentuk dari reaksi antara polutan primer dan sinar matahari, salah satunya yaitu *peroxyacetyl nitrate* (PAN). Polutan sekunder lainnya yang mempunyai dampak serius ketika dihasilkan yaitu *ground level ozone*. *Ground level ozone* merupakan komponen utama dari photochemical smog, yang menyebabkan masalah pencemaran udara pada negara berkembang selama beberapa dekade terakhir (An et al., 2008).

Revolusi industri menjadi salah satu penyebab meningkatnya jumlah polutan di atmosfer selama 3 abad terakhir. Polusi *smog* disebabkan oleh pembakaran batubara pada industri untuk tujuan pembangkitan energi. *Smog* industri terbentuk ketika asap dan nitrogen oksida dihasilkan dari pembakaran batubara dan

bercampur dengan kabut untuk membentuk *smog*, dengan keadaan meteorologi yang mendukung (Chan et al., 1998). *Smog* merupakan kombinasi dari *smoke* (asap) dan *fog* (kabut), dimana *smog* adalah hasil dari interaksi antara sinar matahari dengan komponen kimia yang ada di atmosfer. Komposisi dari *smog* yaitu konsentrasi yang tinggi dari sulfur dioksida (SO₂), nitrogen dioksida (NO₂), ozon, karbon monoksida (CO) dan *particulate matter* (PM) (Gaffney et al., 2008).

2.9 Acidification

Asidifikasi merupakan keadaan lingkungan dengan tingkat derajat keasaman (pH) berada lebih dari 7. Penyebab dari berubahnya kondisi lingkungan berada pada level asam disebabkan karena beberapa senyawa kimia yang terserap ke dalam air/tanah (Stillman dan Adam, 2015). Polusi udara yang dihasilkan dari proses pembakaran pada industri maupun kendaraan berupa CO₂, SO₂, dan NO₂ (Luthfi et al., 2017). Senyawa tersebut secara alami akan mengalami reaksi dengan air, sehingga dihasilkan ion hidrogen. Ketika CO₂ masuk ke dalam air, baik itu air laut maupun air sungai, akan menyebabkan CO₂ terlarut dalam air dan membentuk asam karbonat (H₂CO₃). Asam karbonat merupakan asam lemah. Dengan semakin bertambahnya konsentrasi CO₂ yang masuk ke dalam air akan menyebabkan konsentrasi ion hidrogen bertambah, sehingga pH air menjadi meningkat.



Begitu juga dengan SO₂ dan NO₂, ketika senyawa ini masuk ke dalam air akan menimbulkan reaksi kimia. Dari reaksi kimia senyawa tersebut menghasilkan ion hidrogen. Sehingga dapat menyebabkan pH air meningkat. Senyawa SO₂ ketika bereaksi dengan air akan membentuk asam sulfat (H₂SO₄). Selain itu konsentrasi ion hidrogen dalam air juga akan bertambah, sehingga pH air meningkat.



Nitrogen dioksida, ketika masuk ke dalam air akan menimbulkan reaksi kimia membentuk asam nitrat (HNO₃). Dari reaksi kimia ini juga menghasilkan ion hidrogen. Dengan bertambahnya konsentrasi NO₂ dalam air, maka derajat keasamaan air juga akan meningkat.



2.10 Respiratory Effects

Sifat fisis partikel yang penting adalah ukurannya, yang berkisar antara diameter 0,0002 mikron sampai sekitar 500 mikron. Pada kisaran tersebut partikel mempunyai umur dalam bentuk tersuspensi di udara antara beberapa detik sampai beberapa bulan (Ratnani, 2008). Sifat partikel lainnya yang penting adalah kemampuannya sebagai tempat adsorpsi (sorpsi secara fisik) atau kimisorpsi (sorpsi disertai dengan interaksi kimia). Sifat ini merupakan fungsi luas permukaan yang pada umumnya luas untuk kebanyakan partikel (Soedomo, 2001). Sumber partikel yang utama yaitu pembakaran bahan bakar dari sumbernya, diikuti oleh proses-proses industri (Ratnani, 2008).

Hubungan antara ukuran partikel polutan dengan sumbernya adalah, untuk partikel dengan diameter lebih besar dari 10 mikron dihasilkan dari proses-proses mekanis seperti erosi angin, penghancuran dan penyemprotan. Pelindasan benda-benda oleh kendaraan atau pejalan kaki. Partikel yang berukuran diameter diantara 1 – 10 mikron biasanya termasuk tanah, debu, dan produk-produk pembakaran dari industri lokal (Soedomo, 2001). Pada industri semen, proses pembakaran batubara serta pembakaran oleh motor yang menggunakan bahan bakar diesel menghasilkan partikel jelaga, hidrokarbon, dan kandungan sulfur (Revani et al., 2012).

2.11 Life Cycle Assessment

Life Cycle Analysis (LCA) atau sering juga disebut *Life Cycle Assessment* merupakan sebuah metode berbasis *cradle to grave* (analisis keseluruhan siklus dari proses produksi hingga pengolahan limbah) yang digunakan untuk mengetahui jumlah energi, biaya, dan dampak lingkungan yang disebabkan oleh tahapan daur hidup produk dimulai dari saat pengambilan bahan baku sampai dengan produk itu selesai digunakan oleh konsumen (Harjanto et al., 2012).

Life Cycle Assessment (LCA) adalah suatu pendekatan *cradle to grave* mencakup keseluruhan dari daur hidup produk, yaitu: proses, pengestrakan, pemrosesan bahan mentah, pamanufakuran, transportasi dan distribusi, penggunaan/penggunaan ulang/pemeliharaan, daur ulang, dan

penyelesaian akhir (Pringgajaya dan Udisubakti, 2012). Menurut Hermawan et al. (2013), LCA dibagi menjadi 4 tahapan yaitu:

1. Tujuan, Ruang Lingkup dan Definisi
Tahap pertama dari LCA, yaitu mendefinisikan ruang lingkup studi termasuk mendefinisikan fungsi dari masing-masing bagian, batasan studi.
2. Analisis Inventori
Tahap kedua pada LCA adalah melakukan inventarisasi masukan dan keluaran yang berhubungan dengan ruang lingkup studi.
3. Asesmen Dampak
Pada tahapan ini, dilakukan evaluasi terhadap dampak potensi terhadap lingkungan dengan menggunakan hasil dari life cycle inventory dan menyediakan informasi untuk menginterpretasikan pada fase terakhir.
4. Interpretasi
Tahap akhir analisis daur hidup memberikan simpulan, rekomendasi, dan pengambilan keputusan berdasarkan batasan studi yang telah ditetapkan pada tahap pertama.

2.12 SimaPro

SimaPro 8.5.2 adalah *software* generasi ke-8 dari interpretasi penggunaan metode *Life Cycle Assessment*. SimaPro 8.5 ini merupakan versi terbaru yang diperbarui dari versi SimaPro 8.4 (PreConsultant, 2018). Namun dalam pengoperasian SimaPro 8.5.2 tidak berbeda dengan versi sebelumnya. Hanya saja terdapat beberapa fitur yang diperbarui seperti tampilan, data *libraries*, dan beberapa dampak dari *impact assessment method*. Tujuan dari penggunaan SimaPro ini adalah untuk menganalisis dan membandingkan aspek-aspek lingkungan dari suatu produk. Menurut Herprayoga (2014), dalam menggunakan *software* ini terdapat beberapa tahapan diantaranya sebagai berikut:

1. Penentuan tujuan dan ruang lingkup
Penentuan tujuan dan ruang lingkup ada beberapa cara, diantaranya:
 - a. *Text field*, untuk menginput data pemilik, komentar, alasan, dan tujuan melakukan penelitian LCA.
 - b. Pemilihan *libraries*, untuk memilih metode-metode apa yang paling sesuai dengan penelitian.
 - c. Mengatur data *quality indicator requirements*, dengan menetapkan karakteristik-karakteristik data yang sesuai

dengan tujuan dan ruang lingkup. Data yang dimasukkan dapat berupa waktu periode melakukan penelitian, teknologi yang digunakan dalam penelitian, alokasi penelitian, dan juga batasan suatu sistem.

2. Inventarisasi

Pada tahap inventarisasi, semua data mengenai emisi yang berpotensi timbul dan juga konsumsi bahan baku dikumpulkan. Pada tahap inventarisasi ini terdapat beberapa fase, yaitu:

- a. *Process*, menunjukkan hal-hal yang termasuk dalam proses produksi suatu produk yang membutuhkan penginputan data.
- b. *Product stages*, mendeskripsikan bagaimana suatu produk diproduksi, digunakan, dan dibuang.
- c. *System description*, bagian ini merupakan catatan terpisah yang digunakan untuk mendeskripsikan struktur dari sistem.
- d. *Waste types*, terdapat *waste scenarios* dan *disposal scenarios*. *Waste scenarios* didefinisikan sebagai material yang akan dibuang atau didaur ulang. Sedangkan *disposal scenarios* didefinisikan sebagai produk yang akan digunakan kembali.

3. Penilaian terhadap pencemaran

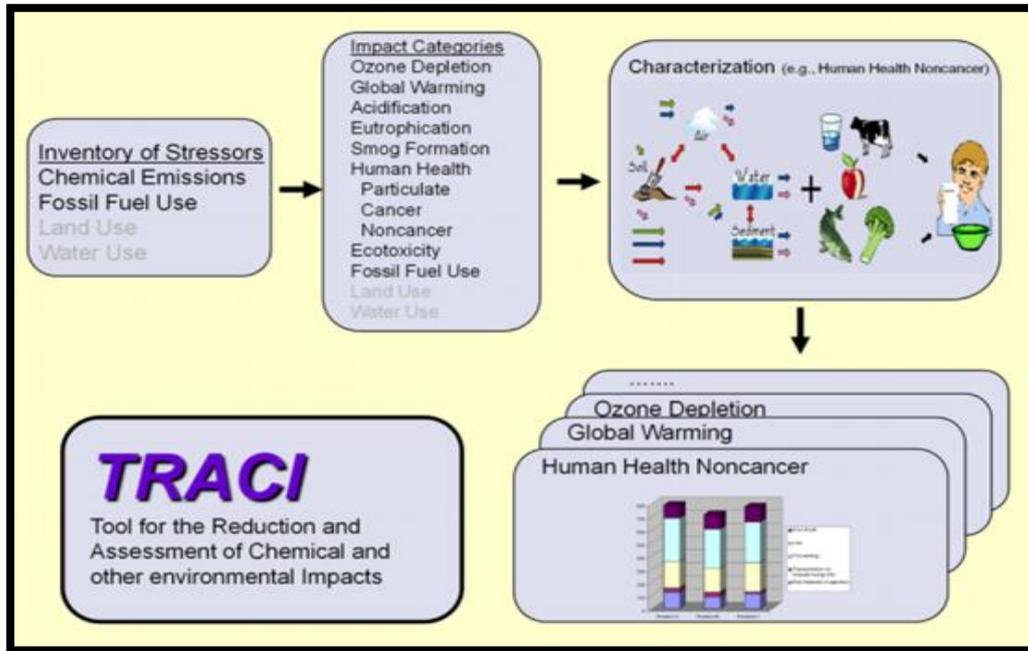
Struktur dasar penilaian cemaran terdiri atas:

- a. *Characterisation*, merupakan senyawa kimia pada suatu proses yang memiliki kontribusi pada 14 *impact category* yang terdapat pada LCA.
- b. *Normalization*, merupakan penilaian dengan membandingkan hasil dari *impact category indicator* dengan buku acuan atau nilai normal. Hal ini bertujuan untuk menyeragamkan satuan dari segala *impact categories* dan untuk menunjukkan kontribusi dari *impact categories*.
- c. *Weighting*, merupakan proses mengkalikan *impact category indicator* dengan *weighting score*. Kemudian diakumulasikan sebagai *total score*. Tahap ini memberikan bobot terhadap kategori dampak yang berbeda.
- d. Interpretasi data, yang berarti mengevaluasi suatu kesimpulan untuk digambarkan dan bagaimana dapat dipertanggung jawabkannya. Pada tahap ini dilakukan interpretasi grafik dari hasil analisis pada tahap LCIA. Sehingga dapat diketahui dampak apa yang memiliki potensi paling besar untuk terjadi pada kegiatan yang dianalisis.

2.13 Metode Pendekatan pada SimaPro

Jenis pendekatan yang digunakan untuk menganalisis dengan menggunakan SimaPro yaitu *midpoint* dan *endpoint*. Metode *midpoint* menilai dampak hanya sampai pada kategori dampak spesifik seperti *global warming*, *ozone depletion*, *acidification*, dan lain sebagainya. Sedangkan metode *endpoint* menilai dampak sampai pada tingkat paling bawah yang merupakan gabungan dari beberapa dampak spesifik, yaitu *human health*, *resource depletion*, dan *ecosystem quality*. Masing-masing metode memiliki fungsi yang sama yaitu untuk menilai dampak yang diakibatkan dari suatu sistem proses, hanya berbeda pada lingkup penilaian.

TRACI (*Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other environmental Impacts*) merupakan suatu pendekatan secara *midpoint* yang dikembangkan oleh Environmental Protection Agency (EPA) di USA, dengan tujuan membantu dalam penilaian dampak pada desain proses dan mencapai pencegahan polusi. Beberapa kategori dampak yang dapat dianalisis dengan pendekatan TRACI ini meliputi *ozone depletion*, *global warming*, *smog formation*, *acidification*, *eutrophication* *human health cancer*, *human health non cancer*, *human health criteria pollutants*, *ecotoxicity*, dan *fossil fuel depletion*. Faktor normalisasi dari TRACI berdasarkan laporan emisi tahunan dan sumber daya dari US pada tahun 1999 (Menoufi, 2011).



Gambar 2.3 Kerangka TRACI

Sumber: TRACI User's Manual, 2012

Penilaian dampak terhadap pengambilan keputusan pada lingkungan seperti *sustainability metric*, *life cycle assessment* (LCA), dan ekologi industri melibatkan kuantifikasi dalam potensi skala dampak yang besar. Akan tetapi, menyelesaikan penilaian yang komprehensif untuk semua simulasi potensi efek membutuhkan data yang banyak, waktu, pengetahuan dan sumber daya. TRACI memberikan penyediaan *database* untuk analisis *life cycle assessment* (LCA), desain proses, dan pencegahan polusi, dimana database yang digunakan berasal dari EPA 2006 (EPA, 2012). Kategori dampak serta media yang dapat dilakukan analisis meliputi seperti pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Kategori Dampak dan Media TRACI

<i>Impact Category</i>	<i>Media</i>
<i>Ozone Depletion</i>	<i>Air</i>
<i>Global Climate</i>	<i>Air</i>
<i>Acidification</i>	<i>Air, Water</i>
<i>Eutrophication</i>	<i>Air, Water</i>
<i>Smog Formation</i>	<i>Air</i>
<i>Human Health Particulate</i>	<i>Air</i>
<i>Human Health Cancer</i>	<i>Urban Air, Nonurban Air, Freshwater, Seawater, Natural Soil, Agricultural Soil</i>
<i>Human Health Noncancer</i>	<i>Urban Air, Nonurban Air, Freshwater, Seawater, Natural Soil, Agricultural Soil</i>
<i>Ecotoxicity</i>	<i>Urban Air, Nonurban Air, Freshwater, Seawater, Natural Soil, Agricultural Soil</i>

Sumber: TRACI User's Manual, 2012

2.14 Penelitian Terdahulu Mengenai LCA

Banyak penelitian yang telah dilakukan dengan metode LCA untuk mengetahui dampak yang ditimbulkan dari suatu produk. Penelitian terdahulu ini menjadi salah satu referensi dan bahan kajian dalam melakukan penelitian. Pada sub-bab ini akan diuraikan mengenai dua penelitian yang berkaitan dengan metode LCA.

Tabel 2.3 Penelitian Terdahulu

No.	Peneliti (Tahun Penelitian)	Judul Penelitian	Isi Penelitian
1.	Radika Herprayoga (2014)	Kajian <i>Life Cycle Assessment</i> (LCA) untuk mereduksi dampak pencemaran udara PT Semen Bosowa Maros dengan pendekatan <i>Analytical Hierarchy Process</i> (AHP)	Penelitian ini dilakukan untuk mengidentifikasi dampak pencemaran udara yang terjadi pada proses produksi industri semen di PT Semen Bosowa Maros. Identifikasi dampak lingkungan ini dilakukan dengan pendekatan LCA menggunakan software SimaPro 8.0. Proses yang diperiksa yaitu <i>mining, raw material grinding, raw mill, cement mill, dan packaging & shipping</i> . Dari hasil LCA, diketahui bahwa unit <i>coal mill</i> memberikan dampak terbesar yaitu 52,7%. Dari hasil AHP menggunakan software <i>Expert Choice</i> diketahui bahwa pemasangan adsorber adalah alternatif terbaik yang dipilih oleh para ahli.

No.	Peneliti (Tahun Penelitian)	Judul Penelitian	Isi Penelitian
2.	Erdhiyan Saputri, 2018	Kajian Dampak Proses Pengolahan Minyak Bumi di Pertamina RU IV Balongan Terhadap Lingkungan dengan Menggunakan Metode <i>Life Cycle Assessment</i> (LCA)	Penelitian ini dilakukan untuk mengidentifikasi dampak pencemaran udara yang terjadi pada proses pengolahan minyak bumi di PT Pertamina RU IV Balongan. Identifikasi dampak lingkungan ini dilakukan dengan pendekatan LCA menggunakan software SimaPro 8.4. Proses yang diperiksa dari <i>crude oil</i> hingga terbentuk bensin, solar, dan IDF. Dari hasil LCA, diketahui bahwa produksi gasoline (bensin) memberikan dampak terbesar yaitu 81,89 ton CO ₂ /produk. Alternatif terpilih untuk mengurangi dampak dari emisi yaitu penggunaan <i>preflash coloumn</i> atau <i>preflash drum</i> pada kolom destilasi.
3.	Nadia Andistiara, 2018	Kajian Dampak Proses Eksplorasi dan Produksi Gas Alam Terhadap Lingkungan dengan Menggunakan	Penelitian ini dilakukan untuk mengidentifikasi dampak pencemaran udara yang terjadi pada proses eksploitasi dan produksi JOB Pertamina-Medco E&P Tomori Sulawesi.

No.	Peneliti (Tahun Penelitian)	Judul Penelitian	Isi Penelitian
		Metode <i>Life Cycle Assessment</i> (LCA)	<p>Identifikasi dampak lingkungan ini dilakukan dengan pendekatan LCA menggunakan software SimaPro 8.4. Proses yang diperiksa yaitu unit GTG, unit hot oil heater, unit combustor, dan unit flare. Dari hasil LCA, diketahui bahwa beban emisi paling besar dihasilkan dari unit hot oil heater dengan beban CO₂, CH₄, dan N₂O berturut-turut sebesar 2.628.315,144 ton CO₂/hari, 47,018 ton CH₄/hari, dan 4,071 ton N₂O/hari. Alternatif terpilih untuk mengurangi dampak dari emisi yaitu penggunaan kembali LP fuel gas excess ke dalam unit production separator dengan proses kompresi.</p>

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Umum

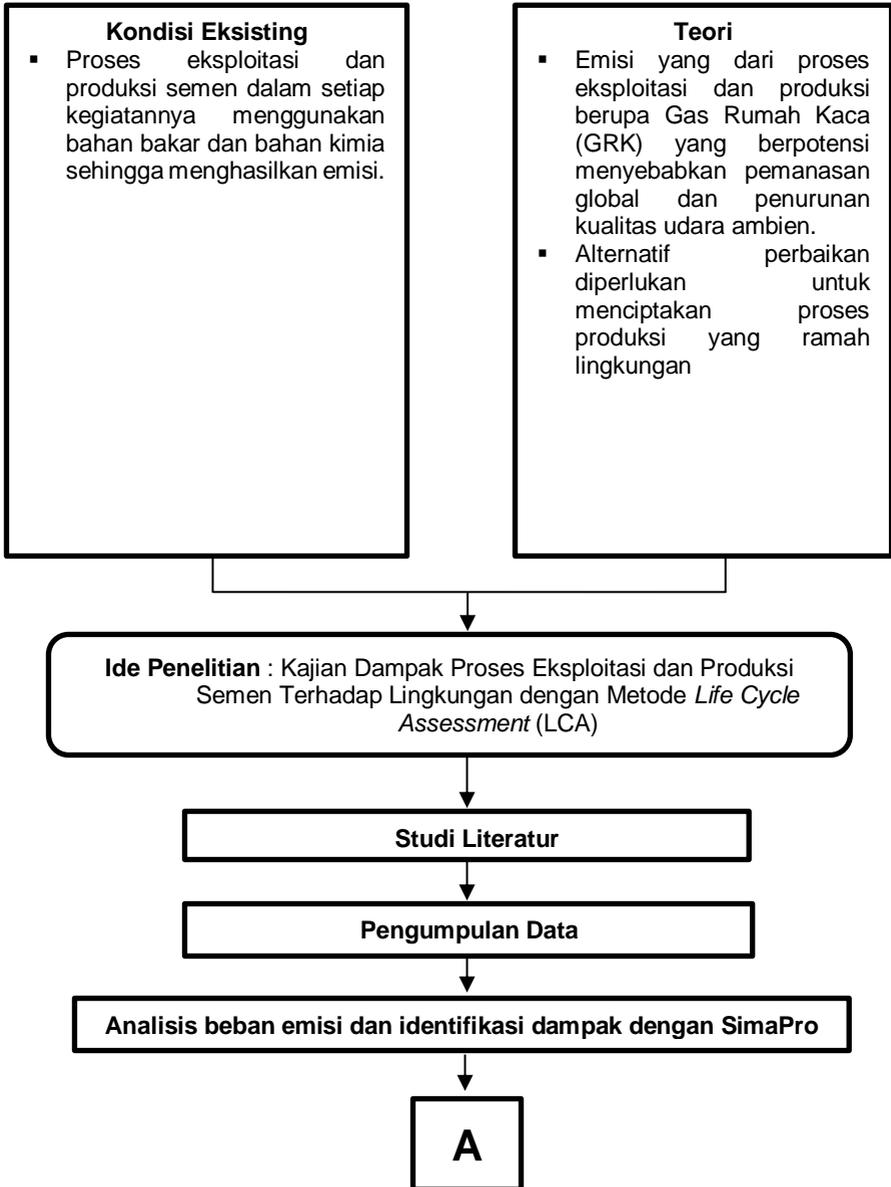
Penelitian yang dilakukan terkait dengan dampak proses eksploitasi dan produksi dengan menggunakan metode *Life Cycle Assessment* (LCA). Tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini yaitu prakiraan beban emisi dari proses eksploitasi dan produksi PT Semen Indonesia (Persero) Tbk., identifikasi dampak lingkungan yang terjadi pada proses eksploitasi dan produksi semen di PT Semen Indonesia (Persero) Tbk. dan merekomendasikan program alternatif untuk mengurangi dampak lingkungan dari proses eksploitasi dan produksi semen. Perhitungan beban emisi didasarkan pada reaksi-reaksi yang terlibat di dalam proses eksploitasi dan produksi. Metode yang bisa digunakan yaitu melalui perhitungan stokiometri reaksi dan kesetimbangan neraca massa serta menggunakan metode faktor emisi IPCC. Kemudian untuk mengidentifikasi dampak yang ditimbulkan dari proses eksploitasi dan produksi digunakan metode LCA.

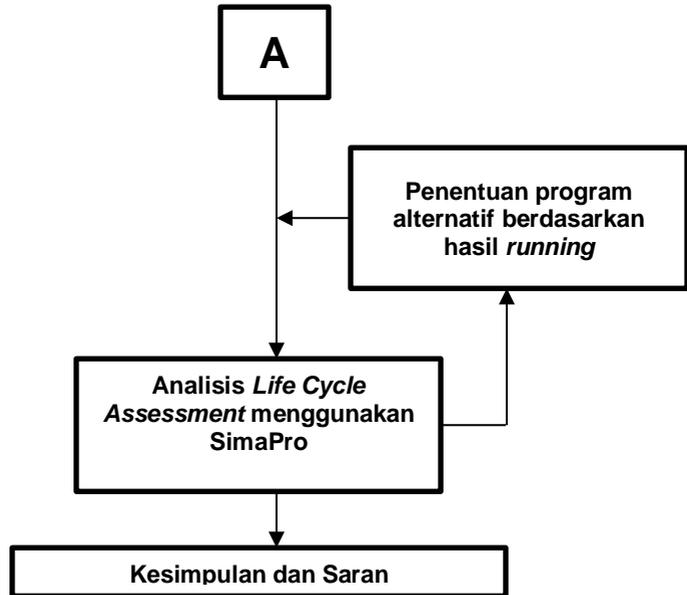
3.2 Wilayah Studi

Penelitian ini berfokus pada bahan bakar, bahan baku, produk, dan emisi yang dihasilkan dari kegiatan proses eksploitasi dan produksi semen di PT Semen Indonesia (Persero) Tbk. Pabrik Tuban. Untuk kegiatan yang dianalisis meliputi proses utama dan proses pada unit penunjang yang menjadi sumber emisi tidak bergerak pada PT Semen Indonesia (Persero) Tbk. Proses eksploitasi meliputi penambangan bahan baku pada unit *quarry*. Proses produksi meliputi unit *crusher*, *raw mill*, *pre-heater*, kiln, *cooler*, *finish mill*, *packer*.

3.3 Kerangka Penelitian

Susunan kerangka ini didasarkan atas tujuan penelitian. Dengan tujuan tersebut, dikembangkan menjadi ide penelitian, studi literatur, pengumpulan data lapangan, analisis beban emisi, analisis dampak lingkungan dengan *Life Cycle Assessment* (LCA) menggunakan aplikasi SimaPro 8.5.2. Kerangka penelitian selengkapnya dapat dilihat pada Gambar 3.1.





Gambar 3.1 Kerangka Penelitian

3.4 Tahap Pendahuluan

Tahap pendahuluan pada penelitian ini terdiri dari:

1. Kajian literatur yang dilakukan terhadap:
 - Semen
 - Proses produksi semen
 - Pencemaran udara
 - Sumber emisi pada industri semen
 - *Life Cycle Assessment*
 - SimaPro
 - Metode pendekatan *midpoint* dengan TRACI
 - Penelitian terdahulu mengenai LCA
2. Melakukan perizinan untuk kepentingan pengumpulan data pada pihak PT Semen Indonesia (Persero) Tbk.
3. Membuat perizinan untuk mendapatkan lisensi aplikasi SimaPro.

3.5 Tahap Pengumpulan Data

Pengumpulan data yang digunakan adalah data sekunder. Data sekunder didapatkan dari *history* proses eksploitasi dan produksi semen di PT Semen Indonesia (Persero) Tbk. Untuk data yang diperlukan dalam penelitian ini secara lebih rinci dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Kebutuhan Data

No	Jenis Data	Metode Pengambilan Data	Durasi Data	Asal Data
1	Data <i>material balance</i> proses produksi	Data Sekunder	2 tahun	PT Semen Indonesia (Persero) Tbk.
2	Data jumlah bahan bakar, bahan baku, bahan kimia dan energi listrik yang digunakan pada setiap unit eksploitasi dan produksi	Data Sekunder	2 tahun	PT Semen Indonesia (Persero) Tbk.
3	Data pemantauan lingkungan dari <i>stack</i>	Data Sekunder	2 tahun	PT Semen Indonesia (Persero) Tbk.
4	Data audit energi	Data Sekunder	1 tahun	PT Semen Indonesia (Persero) Tbk.
5	Data (<i>Process Flow Diagram</i>) eksploitasi dan produksi	Data Sekunder	-	PT Semen Indonesia (Persero) Tbk.

3.6 Tahap Pengolahan Data

Analisis data dilakukan dalam rangka memprakirakan beban emisi dan identifikasi dampak lingkungan yang terjadi. Dimulai dari proses eksploitasi bahan baku kemudian dilanjutkan dengan proses produksi.

3.6.1 Analisis Beban Emisi Proses Eksploitasi dan Produksi

Data yang akan dianalisis adalah data beban emisi CO₂, SO_x, NO_x, N₂O, CH₄ dan partikulat. Analisis yang akan dilakukan mencakup data konsentrasi NO_x, SO_x dalam 2 tahun setiap 6 bulan sekali, serta jumlah bahan bakar yang digunakan pada setiap unit pengolahan selama 2 tahun. Dalam melakukan analisis beban emisi CO₂, SO_x, NO_x, N₂O, CH₄ dan partikulat dilakukan hal-hal sebagai berikut:

1. Mengidentifikasi sumber-sumber emisi tidak bergerak yang ada di PT Semen Indonesia (Persero) Tbk.
2. Merekapitulasi data hasil pengukuran pada sumber emisi tidak bergerak untuk beban emisi NO_x dan SO_x selama 2 tahun terakhir berdasarkan data laporan PT Semen Indonesia (Persero) Tbk.
3. Mengidentifikasi unit-unit pengolahan yang menggunakan bahan bakar, lama operasionalnya, dan laju alir bahan bakar berdasarkan data laporan kegiatan produksi PT Semen Indonesia (Persero) Tbk.
4. Merekapitulasi data penggunaan bahan bakar pada setiap unit sumber emisi tidak bergerak yang menggunakan bahan bakar dalam operasinya.
5. Mencari nilai heating value (nilai kalor) berdasarkan penggunaan bahan bakar pada unit

Pemakaian bahan bakar = LHV x laju alir bahan bakar x waktu operasi

(Persamaan 3.1)

6. Mencari data faktor emisi sesuai dengan bahan bakar yang digunakan
7. Menghitung beban emisi dengan menggunakan metode faktor emisi IPCC

$$E = A \times EF$$

(Persamaan 3.2)

Keterangan:

E = Jumlah emisi (kg).

A = Pemakaian bahan bakar (TJ).

EF = Faktor emisi (kg/TJ).

Keluaran dari analisis ini adalah data beban emisi untuk CO₂, SO_x, NO_x, N₂O, CH₄ dan partikulat dari setiap unit

pengolahan dalam kegiatan eksploitasi dan produksi semen di PT Semen Indonesia (Persero) Tbk. Hasil dari analisis beban emisi ini nantinya akan digunakan dalam analisis LCA.

3.6.2 Analisis *Life Cycle Assessment* Menggunakan SimaPro

Untuk analisis dampak yang terjadi dari setiap kegiatan yang dianalisis maka digunakan metode LCA. Analisis yang akan dilakukan mencakup data bahan bakar, bahan baku, bahan kimia, produk, dan emisi yang dihasilkan dalam kegiatan eksploitasi dan produksi. Dalam melakukan analisis dampak yang terjadi dengan metode LCA digunakan software SimaPro. Adapun langkah-langkah yang dilakukan dalam menganalisis dampak dengan metode LCA menggunakan software SimaPro adalah sebagai berikut:

1. Melakukan rekapitulasi data bahan bakar, bahan baku, dan bahan kimia yang digunakan pada setiap unit pengolahan serta produk yang dihasilkan dari setiap unit pengolahan berdasarkan data laporan PT Semen Indonesia (Persero) Tbk.
2. Melakukan rekapitulasi berdasarkan data emisi yang dihasilkan berdasarkan hasil analisis beban emisi yang telah dilakukan.
3. Melakukan konversi nilai satuan data pada setiap unit pengolahan dalam satuan yang sama.
4. Menentukan tujuan analisis dengan memasukkan tujuan penelitian ke dalam *software* SimaPro 8.5.2. Tujuan penelitian yang dimasukkan adalah mengidentifikasi dampak lingkungan yang terjadi pada kegiatan eksploitasi dan produksi PT Semen Indonesia (Persero) Tbk.
5. Menentukan batasan analisis dengan memilih *database* yang akan digunakan dalam penelitian pada *software* SimaPro 8.5.2.
6. Memasukkan data-data berupa bahan bakar, bahan baku, bahan kimia, produk, dan emisi yang telah dikonversi ke dalam satuan yang sama pada *software* SimaPro 8.5.2.
7. Melakukan pemilihan metode dampak lingkungan yang digunakan dalam penelitian pada *software* SimaPro 8.5.2. Pada penelitian ini digunakan metode TRACI. Selanjutnya akan didapatkan skenario besaran dampak dari setiap kegiatan yang dianalisis berupa bagan. Semakin tebal garis alir bagan, maka semakin besar dampak yang ditimbulkan.

8. Melakukan tahapan *characterization*/karakterisasi pada software SimaPro 8.5.2, yang mana terjadi pengalihan faktor karakterisasi dengan data-data yang telah di input pada tahap sebelumnya.
9. Melakukan tahapan *normalization*/normalisasi pada software SimaPro 8.5.2 dengan membagi hasil tahapan karakterisasi dengan faktor normalisasi.
10. Melakukan tahapan *weighting*/pembobotan pada software SimaPro 8.5.2 dengan mengalihkan hasil tahapan normalisasi dengan faktor pembobotan.
11. Dari data-data yang dimasukkan pada software SimaPro 8.5.2, maka akan terlihat dampak dari setiap kegiatan yang dianalisis sesuai dengan kategori dampak yang dipilih.

3.6.3 Penentuan Program Alternatif

Program alternatif didapatkan dari referensi, kajian literatur, serta saran dari PT Semen Indonesia (Persero) Tbk. Penentuan program alternatif didasarkan pada hasil analisis *running* pertama menggunakan software SimaPro. Berdasarkan dampak hotspot proses, dibuat alternatif program untuk mengurangi dampak lingkungan. Selanjutnya, program alternatif tersebut diiterasi ke dalam analisis LCA di SimaPro 8.5.2. Dari serangkaian program alternatif program yang di *running* akan didapatkan hasil dari perbandingan antara hasil analisis LCA tanpa menggunakan program dengan hasil analisis LCA setelah diterapkan program alternatif.

3.7 Kesimpulan dan Saran

Tahap terakhir yang dilakukan, yaitu penarikan kesimpulan dan saran. Kesimpulan dibuat untuk menjawab tujuan dari penelitian yang dilakukan. Sedangkan saran ditujukan untuk memberi petunjuk dan pengembangan terhadap penelitian sejenis yang mungkin akan dilakukan. Saran yang diberikan merupakan bentuk rekomendasi untuk menyempurnakan penelitian.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Profil PT Semen Indonesia

PT Semen Indonesia (Persero) Tbk., yang sebelumnya bernama PT Semen Gresik (Persero) Tbk. merupakan Badan Usaha Milik Negara (BUMN) yang bergerak di bidang industri bahan bangunan. Perseroan berperan sebagai Strategic Holding Company dengan berbagai lini usaha yang menawarkan solusi lengkap dalam pembangunan. Diresmikan pada tanggal 7 Agustus 1957 oleh Ir. Soekarno Presiden pertama Republik Indonesia, Perseroan menjadi penopang pembangunan Indonesia pada masa awal kemerdekaan hingga saat ini. Pada tahun 1991, Perseroan mencatatkan diri sebagai perusahaan BUMN pertama yang *Go Public* di Bursa Efek Surabaya dan Bursa Efek Jakarta (sekarang menjadi Bursa Efek Indonesia), dengan kode emiten SMGR.

Dalam perkembangannya, Perseroan melakukan langkah strategis dengan mengakuisisi dua perusahaan BUMN lain, PT Semen Padang (Persero) dan PT Semen Tonasa (Persero) dan menjadi perusahaan persemenan terbesar di Indonesia. Seiring dengan visi perusahaan, tahun 2012 Perseroan melakukan langkah korporasi dengan mengakuisisi *Thang Long Cement Company* (TLCC) Vietnam. Dalam upaya untuk memperkuat posisi, pada tanggal 7 Januari 2013 Perseroan bertransformasi menjadi PT Semen Indonesia (Persero) Tbk.

Dalam industri persemenan, kapasitas produksi Perseroan terus mengalami pertumbuhan. Saat ini, Perseroan memiliki 14 *Integrated Cement Plant* yang tersebar di Indarung (Sumatera Barat), Tuban (Jawa Timur), Pangkep (Sulawesi Selatan), Rembang (Jawa Tengah) dan Quang Ninh (Vietnam) dengan total kapasitas terpasang sebesar 31,8 juta Ton semen per tahun.

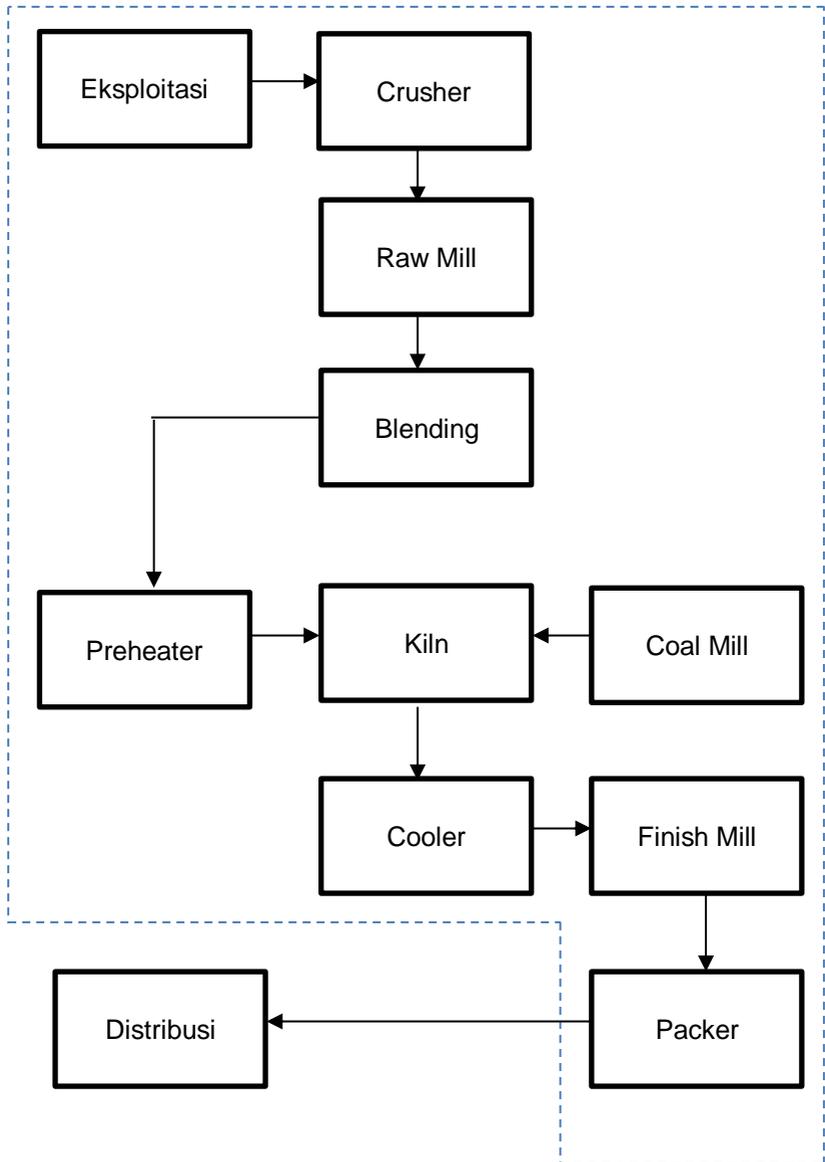
Keunggulan kompetitif Perseroan juga didukung oleh berbagai fasilitas distribusi dan pemasaran, meliputi 3 Grinding Plant, 26 Packing Plant, 11 pelabuhan khusus, 17 gudang penyangga, 651 distributor di seluruh penjuru Nusantara, dan 78 distributor yang tersebar di Vietnam. Di Indonesia, Perseroan memiliki 3 merek yang telah melekat di hati konsumen yaitu Semen Padang, Semen Gresik dan Semen Tonasa. Pangsa pasar domestik sebesar 39% yang mencerminkan kekuatan citra dan reputasi Perseroan.

Distribusi pemasaran hasil produksinya di antaranya adalah Jawa Timur, Jawa Tengah, Jawa Barat, dll. Yogyakarta, Kalimantan Tengah, Kalimantan Selatan. Apabila kebutuhan dalam negeri telah tercukupi dan masih ada kelebihan produk maka akan diekspor keluar negeri. Merk dagang Semen Gresik adalah salah satu merk semen yang berkualitas. Dalam upaya mempertahankan citra merk serta memenuhi persyaratan dan harapan pelanggan yang senantiasa meningkat maka seluruh proses produksi mulai dari penyediaan bahan baku sampai dengan penyerahan semen kepada pelanggan telah mengalami serangkaian pengujian dan pengendalian mutu dengan baik.



Gambar 4.1 Lokasi PT Semen Indonesia (Persero) Pabrik Tuban
Sumber: Google Earth

Sistem batasan yang dianalisa pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 System Boundary

4.2 Analisis Perhitungan Beban Emisi

Beban emisi yang dihasilkan dari kegiatan proses produksi dan eksploitasi PT Semen Indonesia (Persero) Tbk. diperoleh melalui perhitungan unit dalam *system boundary*. *System boundary* merupakan batasan sistem proses produksi yang akan dianalisis dampak lingkungannya menggunakan metode *Life Cycle Assessment* (LCA). Unit tersebut antara lain: penambangan kapur dan tanah liat, *crusher*, *raw mill*, *preheater-rotary kiln-cooler*, *coal mill*, *finish mill*, dan *packer*. *System boundary* dari proses produksi semen ini seperti pada Gambar 4.2. Perhitungan beban emisi meliputi perhitungan dari kegiatan pembakaran bahan bakar, konsumsi energi listrik, dan kegiatan proses produksi, dan proses kalsinasi.

Perhitungan beban emisi dari kegiatan pembakaran bahan bakar menggunakan rumus perhitungan beban emisi Tier 2.

Emisi GRK (kg/th) = Konsumsi energi (TJ/th) x Faktor emisi (kg/TJ)

(Persamaan 4.1)

Sumber: Permen LH Nomor 12 Tahun 2012

Konsumsi energi (TJ) = Konsumsi energi (L) x Nilai kalor (TJ/L)

(Persamaan 4.2)

Sumber: Permen LH Nomor 12 Tahun 2012

Pada proses produksi di PT Semen Indonesia (Persero) Tbk. menggunakan bahan bakar *Industrial Diesel Oil* (IDO) sebagai bahan bakar minyak penunjang proses produksi. Untuk IDO memiliki nilai kalor sebesar 0,000038 TJ/L (IPCC, 2006).

Kemudian untuk perhitungan beban emisi dari konsumsi energi listrik menggunakan rumus sesuai Persamaan 4.3. Untuk konsumsi listrik hanya menghasilkan emisi CO₂.

Beban emisi CO₂ (kg) = Konsumsi Listrik (MWh) x Faktor Emisi (kg CO₂/MWh)

(Persamaan 4.3)

Sumber: Petunjuk Teknis Perhitungan Emisi Gas Rumah Kaca (GRK) di Sektor Industri, Kemenperin 2012

Selanjutnya untuk menghitung beban emisi dari kegiatan proses produksi semen menggunakan perhitungan beban emisi Tier 3. Beban emisi didapatkan berdasarkan pengukuran aktual kadar emisi yang dapat berupa data dari *online analyzer* (*Continuous Emission Monitoring System-CEMS*) ataupun pengukuran manual (sampling) secara periodik untuk masing-masing parameter pada gas buang (stack) (Permen LH, 2012).

$$\mathbf{C\ correction = C\ terukur\ x\ (21-O_2\ correction)\ /\ (21-O_2\ terukur)}$$

- C correction* = Konsentrasi dengan koreksi O₂ yang ditetapkan dalam baku mutu emisi (mg/Nm³)
C terukur = Konsentrasi terukur sebelum dikoreksi dengan koreksi O₂ (mg/Nm³)
O₂ correction = Koreksi O₂ yang ditetapkan dalam baku mutu emisi (%)
O₂ terukur = Prosentase O₂ diukur langsung dalam gas emisi (%)

(Persamaan 4.4)

Sumber: Permen LH Nomor 12 Tahun 2012

$$\mathbf{E = C\ correction\ x\ Q\ x\ 0,0036\ x\ [Operation\ hour]}$$

$$\mathbf{Q = V\ x\ A}$$

- E* = Emisi (kg/tahun)
Q = Laju alir emisi volumetrik (m³/detik)
 0,0036 = Faktor konversi dari mg/detik ke kg/jam
Opr. Hour = Lama operasi sumber emisi selama 1 tahun (jam)
V = Laju alir (m/detik)
A = Luas penampang *stack* (m²)

(Persamaan 4.5)

Sumber: Permen LH Nomor 12 Tahun 2012

Proses kalsinasi untuk memproduksi klinker, batu kapur yang bahan utamanya adalah kalsium karbonat (CaCO₃) dipanaskan untuk menghasilkan CaO dan CO₂. Cara perhitungan beban emisi CO₂ dapat menggunakan 3 tingkatan ketelitian (tier). Untuk data yang didapat pada penelitian ini hanya memungkinkan perhitungan menggunakan Tier 1 dan Tier 2. Berdasarkan

penelitian yang telah dilakukan oleh Damayanti dan Puji (2012), bahwa ketidakpastian data pada perhitungan Tier 1 lebih tinggi dibandingkan Tier 2. Hal ini menunjukkan bahwa semakin tinggi tingkatan Tier akan menghasilkan hasil perhitungan yang lebih valid. Oleh karena itu, dalam perhitungan beban emisi CO₂ hasil dari kalsinasi pada penelitian ini menggunakan rumus Tier 2 sesuai Persamaan 4.6.

$$\text{Emisi CO}_2 = M_{cl} \times EF_{cl} \times CF_{ckd}$$

Emisi CO₂ = Emisi CO₂ dari produksi semen (ton)

M_{cl} = Massa produksi klinker (ton)

EF_{cl} = Faktor emisi klinker (ton CO₂ / ton klinker)

CF_{ckd} = Faktor koreksi emisi untuk *Cement Kiln Dust* (CKD)

(Persamaan 4.6)

Sumber: IPCC *Guideline* 2006

Kemudian untuk menghitung nilai faktor koreksi emisi untuk CKD menggunakan Persamaan 4.7.

$$CF_{ckd} = 1 + (M_d/M_{cl} \times C_d \times F_d \times EF_c/EF_{cl})$$

CF_{ckd} = Faktor koreksi emisi untuk CKD, tidak berdimensi

M_d = Massa CKD yang tidak digunakan kembali ke kiln (ton)

M_{cl} = Massa produksi klinker (ton)

C_d = Fraksi original karbonat pada CKD sebelum kalsinasi (fraksi)

F_d = Fraksi kalsinasi dari original karbonat pada CKD (fraksi)

EF_c = Faktor emisi karbonat (ton CO₂/ton karbonat)

EF_{cl} = Faktor emisi klinker yang belum dikoreksi CKD

(Persamaan 4.7)

Sumber: IPCC *Guideline* 2006

Nilai fraksi original karbonat pada CKD sebelum kalsinasi yaitu C_d = 0,89 dan fraksi kalsinasi dari *original* karbonat pada CKD berdasarkan IPCC *Guideline* 2006 F_d = 0,5. Faktor emisi CO₂ pada karbonat EF_c = 0,4397 ton CO₂/ton karbonat dan faktor emisi CO₂

pada klinker menggunakan nilai *default* yaitu 0,51 ton CO₂/ton klinker (IPCC, 2006).

4.2.1 Perhitungan Beban Emisi Unit Eksploitasi

Beban emisi dari unit eksploitasi berasal dari kegiatan penggunaan bahan bakar pada operasional alat dan kendaraan berat. Berdasarkan data dari Semen Indonesia CCR *Section 2* Tahun 2018, jarak ritase rata-rata pengangkutan material hasil tambang oleh *dump truck* ke unit *crusher* sejauh 854428,5 km/tahun untuk tambang kapur dan 1314000 km/tahun untuk tambang tanah liat. Emisi yang dihasilkan dari kendaraan berat dan kendaraan pengangkut material pada unit eksploitasi yaitu CO₂, *carbon monoxide* (CO), NO_x, PM, dan SO₂. Metode perhitungan beban emisi ini menggunakan pendekatan berdasarkan referensi dari berbagai literatur terkait dengan faktor emisi yang digunakan, dikarenakan terbatasnya data yang dapat diperoleh dari perusahaan. Berikut ini merupakan faktor emisi untuk perhitungan beban emisi.

Tabel 4.1 Faktor Emisi Excavator

Jenis Kendaraan	Faktor Emisi				
	CO ₂	CO	NO _x	PM	SO ₂
	gr/jam	gr/jam	gr/jam	gr/jam	gr/jam
Excavator	9805	790,77	912,97	86,6	62,43

Sumber: Sandanayake, 2015, Ahn et al., 2009

Tabel 4.2 Faktor Emisi Kendaraan Berat

Jenis Kendaraan	Faktor Emisi				
	CO ₂	CO	NO _x	PM	SO ₂
	kg/jam	lb/jam	lb/jam	lb/jam	lb/jam
Bulldozer	55,13	0,818	0,189	0,18	0,496
Backhoe	10,4	1,681	0,263	0,322	0,213
Wheel Loader	17,2	0,215	6,22	0,463	0,406
Grader	56,48	0,414	2,27	0,143	0,139

Sumber: Berger, 2008, Ahn et al., 2009, Lewis et al., 2015

Tabel 4.3 Faktor Emisi *Dump Truck*

Jenis Kendaraan	Faktor Emisi				
	CO ₂	CO	NO _x	PM	SO ₂
	kg/ton.km	lb/jam	lb/jam	lb/jam	lb/jam
Dump Truck	0,0275	8,4	17,7	1,4	0,82

Sumber: Sandanayake, 2015, Volvotrucks Corporation, 2019

Perhitungan beban emisi pada kendaraan berat dan kendaraan pengangkut material di unit eksplorasi sebagai berikut.

Beban emisi CO₂ dari *dump truck* (tambang tanah liat) selama 1 tahun:

Jumlah unit = 45 unit
 Jarak tempuh = 1.314.000 km
 Faktor emisi = 0,0275 kg/ton.km
 Berat tanah liat yang diangkut = 1.100 kg/m³ x 20 m³
 = 22.000 kg
 = 22 ton

Beban emisi = Faktor emisi x jarak tempuh x jumlah tanah liat yang diangkut x jumlah unit
 = 0,0275 kg/ton.km x 1314000 km x 22 ton x 45
 = 35.773.650kg CO₂
 = 35.774 ton CO₂

Beban emisi CO₂ dari *dump truck* (tambang batu kapur) selama 1 tahun:

Jumlah unit = 45 unit
 Kapasitas truk = 20 m³
 Massa jenis tanah liat = 1.300 kg/m³
 Jarak tempuh = 854.428,5 km
 Faktor emisi = 0,0275 kg/ton.km
 Berat tanah liat yang diangkut = 1.300 kg/m³ x 20 m³
 = 26.000 kg
 = 26 ton

Beban emisi = Faktor emisi x jarak tempuh x jumlah tanah liat yang diangkut x jumlah unit
 = 0,0275 kg/ton.km x 854.428,5 km x 26 ton x 45
 = 27.491.237 kg CO₂
 = 27.491 ton CO₂

Beban emisi excavator:

Jumlah = 21 unit

Jam operasi = 6.595 jam

Beban emisi CO = Faktor emisi x Jam operasi x Jumlah unit
= 790,77 gr/jam x 6.595 x 21 x 0,001 kg/gr
= 109.518 kg CO

Beban emisi dump truk:

Jumlah = 96 unit

Jam operasi = 6.595

Beban emisi CO = Faktor emisi x Jam operasi x Jumlah unit
= 8,4 lb/jam x 6.595 jam x 96 x 0,454 kg/lb
= 2.414.466 kg CO

Beban emisi bulldozer:

Jumlah = 11 unit

Jam operasi = 6.595

Beban emisi CO = Faktor emisi x Jam operasi x Jumlah unit
= 0,818 lb/jam x 6.595 jam x 11 x 0,454 kg/lb
= 109.518 kg CO

Beban emisi backhoe:

Jumlah = 1 unit

Jam operasi = 6.595

Beban emisi CO = Faktor emisi x Jam operasi x Jumlah unit
= 1,681 lb/jam x 6.595 jam x 1 x 0,454 kg/lb
= 26.941 kg CO

Beban emisi wheel loader:

Jumlah = 1 unit

Jam operasi = 6.595

Beban emisi CO = Faktor emisi x Jam operasi x Jumlah unit
= 0,215 lb/jam x 6.595 jam x 1 x 0,454 kg/lb
= 4.506 kg CO

Perhitungan beban emisi selengkapnya terdapat pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Perhitungan Beban Emisi Kendaraan Tambang

Jenis Kendaraan	Beban emisi				
	CO	NO _x	PM	SO ₂	CO ₂
	kg	kg	kg	kg	kg
Excavator	109.518	126.442	11.994	8.646	1.357.943
Dump Truk	2.414.466	5.087.626	402.411	235.698	63.264.887
Bulldozer	26.941	6.225	5.928	16.336	3.999.406
Backhoe	5.033	787	964	638	68.588

Jenis Kendaraan	Beban emisi				
	CO	NO _x	PM	SO ₂	CO ₂
	kg	kg	kg	kg	kg
Wheel Loader	4.506	130.364	9.704	8.509	794.038
Grader	8.677	47.577	2.997	2.913	2.607.399
Total	2.560.465	5.351.444	431.001	269.827	69.484.862

Sumber: Hasil Perhitungan

Jadi besar beban emisi total yang dihasilkan dari kegiatan eksplorasi semen selama satu tahun sebesar 69.484.862 ton CO₂, 2.560,47 ton CO, 5.351,44 ton NO₂, 431 ton PM, dan 269,83 ton SO₂. Untuk hasil rekapitulasi selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 4.19.

4.2.2 Perhitungan Beban Emisi Unit *Crusher*

Beban emisi dari unit *crusher* berasal dari kegiatan penggunaan listrik. Berdasarkan data dari Semen Indonesia, besar konsumsi listrik pada unit *crusher* dapat dilihat pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Konsumsi Listrik Unit *Crusher*

No	Unit	Satuan	Konsumsi Listrik			
			Tuban 1	Tuban 2	Tuban 3	Tuban 4
1	Limestone Crusher	kWh/T.produksi	1,13	1,19	1,14	1,07
2	Clay Crusher	kWh/T.produksi	2,29	2,31	2,3	2,23
3	Roller Mill	kWh/T.produksi	19,9	19,4	18,52	18,45

Sumber: Data Semen Indonesia, 2018

Berdasarkan data pada Tabel 4.6, maka rata-rata konsumsi listrik untuk *limestone crusher*, *clay crusher*, dan *roller mill* sebesar 1,13 kWh/T.produksi, 2,28 kWh/T.produksi, dan 19,07 kWh/T.produksi. Jumlah konsumsi energi listrik unit crusher sebesar 22,48 kWh/T.produksi. Jumlah produksi semen per tahun sebesar 12.395.563,05 ton (Data Semen Indonesia, 2018). Faktor emisi yang digunakan berdasarkan sistem ketenagalistrikan Jawa, Madura, Bali (Jamali) yaitu 0,725 (Kemenperin, 2012). Beban emisi CO₂ yang dihasilkan dari unit crusher dihitung menggunakan Persamaan 4.3.

Perhitungan beban emisi CO₂ dari unit *limestone crusher*, *clay crusher*, dan *roller mill* selama 1 tahun:

$$\begin{aligned} \text{Konsumsi listrik} &= 22,48 \text{ kWh/T.produksi} \times 12.395.563,05 \text{ ton} \\ &= 278.683.246,3 \text{ kWh} \\ &= 278.683,25 \text{ MWh} \\ \text{Beban emisi CO}_2 &= 278.683,25 \text{ MWh} \times 0,725 \text{ kg CO}_2/\text{MWh} \\ &= 202.045,35 \text{ kg CO}_2 \\ &= 202,04 \text{ ton CO}_2 \end{aligned}$$

Jadi beban emisi yang dihasilkan dari unit *crusher* selama satu tahun sebesar 202,04 ton CO₂ sekunder. Beban emisi CO₂ dari penggunaan listrik masuk ke dalam jenis kategori CO₂ sekunder. Untuk hasil rekapitulasi selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 4.19.

4.2.3 Perhitungan Beban Emisi Unit *Raw Mill*

Beban emisi dari unit *raw mill* berasal dari kegiatan proses produksi, dimana emisi yang dihasilkan dilewatkan ke *Electrostatic Precipitator* (EP) sebelum dilepas ke udara bebas melalui *stack* (cerobong). Data emisi didapatkan melalui hasil pengukuran manual dan uji lab oleh laboratorium yang ditunjuk oleh PT Semen Indonesia (Persero) Tbk. Untuk perhitungan beban emisinya menggunakan Persamaan 4.4 dan Persamaan 4.5. Berikut perhitungan beban emisi dari unit *raw mill*.

Perhitungan beban emisi SO₂ selama 1 tahun:

$$\begin{aligned} \text{Konsentrasi} &= 34 \text{ mg/Nm}^3 \\ \text{O}_2 \text{ correction} &= 1,64 \\ \text{O}_2 \text{ terukur} &= 12,4 \% \\ \text{Laju alir} &= 18,65 \text{ m/s} \\ \text{Diameter stack} &= 5,7 \text{ m} \\ \text{Jam operasi} &= 6.595 \text{ jam} \\ \text{C correction} &= 34 \text{ mg/Nm}^3 \times (21-1,64) / (21-12,4) \\ &= 76,54 \text{ mg/Nm}^3 \\ \text{Q} &= 18,65 \text{ m/s} \times 3,14 \times 0,25 \times 5,7^2 \\ &= 475,66 \text{ m}^3/\text{detik} \\ \text{E} &= 76,54 \text{ mg/Nm}^3 \times 475,66 \text{ m}^3/\text{detik} \times 0,0036 \times 6.595 \text{ jam} \\ &= 864.373,3 \text{ kg SO}_2 \end{aligned}$$

Untuk perhitungan beban emisi selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6 Perhitungan Beban Emisi Stack Unit Raw Mill

Perhitungan beban emisi Tier 3 (EP Raw Mill Tuban 1)										
Emisi	Konsentrasi	O ₂ correction	O ₂ terukur	Laju Alir	Diameter Stack	Konsentrasi Koreksi	Q	Jam Operasi	Beban Emisi	
	mg/Nm ³	-	%	m/s	M	mg/Nm ³	m ³ /detik	Jam	kg	ton
SO ₂	34	1,64	12,4	18,65	5,7	76,54	475,66	6.595	864.373,3	864,373
NO ₂	378	1,64	12,4	18,65	5,7	850,94	475,66	6.595	9.609.796,8	9.609,797
PM	2,88	1,64	12,4	18,65	5,7	6,48	475,66	6.595	73.217,5	73,217
Perhitungan beban emisi Tier 3 (EP Raw Mill Tuban 2)										
Emisi	Konsentrasi	O ₂ correction	O ₂ terukur	Laju Alir	Diameter Stack	Konsentrasi Koreksi	Q	Jam Operasi	Beban Emisi	
	mg/Nm ³	-	%	m/s	M	mg/Nm ³	m ³ /detik	Jam	kg	ton
SO ₂	23	2,21	14,6	17,22	5,7	67,53	439,19	6.595	704.116,4	704,116
NO ₂	152	2,21	14,6	17,22	5,7	446,26	439,19	6.595	4.653.291,0	4.653,291
PM	5,06	2,21	14,6	17,22	5,7	14,86	439,19	6.595	154.905,6	154,906

Perhitungan beban emisi Tier 3 (EP Raw Mill Tuban 3)										
Emisi	Konsentrasi	O ₂ correction	O ₂ terukur	Laju Alir	Diameter Stack	Konsentrasi Koreksi	Q	Jam Operasi	Beban Emisi	
	mg/Nm ³	-	%	m/s	M	mg/Nm ³	m ³ /detik	Jam	kg	ton
SO ₂	28	1,93	13,7	17,36	5,7	73,15	442,76	6.595	768.904,2	768,904
NO ₂	152	1,93	13,7	17,36	5,7	397,07	442,76	6.595	4.174.051,6	4.174,052
PM	5,06	1,93	13,7	17,36	5,7	13,22	442,76	6.595	138.952,0	138,952
Perhitungan beban emisi Tier 3 (EP Raw Mill Tuban 4)										
Emisi	Konsentrasi	O ₂ correction	O ₂ terukur	Laju Alir	Diameter Stack	Konsentrasi Koreksi	Q	Jam Operasi	Beban Emisi	
	mg/Nm ³	-	%	m/s	M	mg/Nm ³	m ³ /detik	Jam	kg	ton
SO ₂	20	1,28	10	17,98	5,7	35,85	458,57	6.595	390.364,7	390,365
NO ₂	199	1,28	10	17,98	5,7	356,75	458,57	6.595	3.884.129,1	3.884,129
PM	2,2	1,28	10	17,98	5,7	3,94	458,57	6.595	42.940,1	42,940

Sumber: Hasil Perhitungan

Jadi beban emisi yang dihasilkan dari unit *raw mill* selama satu tahun yaitu sebesar 2.727,759 ton SO₂, 22.321,268 ton NO₂, dan 410,015 ton PM. Untuk hasil rekapitulasi selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 4.19.

4.2.4 Perhitungan Beban Emisi Unit *Kiln-Cooler*

Beban emisi dari unit *kiln-cooler* berasal dari emisi yang dihasilkan oleh proses produksi dalam unit kiln-cooler untuk kemudian dilewatkan ke *Electrostatic Precipitator* (EP) sebelum dilepas ke udara bebas melalui *stack* (cerobong), penggunaan bahan bakar IDO, penggunaan listrik, pembakaran batubara serta bahan bakar alternatif dan dari proses kalsinasi. Data emisi dari *stack* didapatkan melalui hasil pengukuran manual dan uji lab oleh laboratorium yang ditunjuk oleh PT Semen Indonesia (Persero) Tbk. Untuk perhitungan beban emisinya menggunakan Persamaan 4.1, Persamaan 4.2, Persamaan 4.3, Persamaan 4.4, Persamaan 4.5, Persamaan 4.6, dan Persamaan 4.7. Nilai kalor setiap bahan bakar terdapat pada Tabel 4.7. Berikut perhitungan beban emisi dari unit *kiln-cooler*.

Tabel 4.7 Nilai Kalor Bahan Bakar

Bahan Bakar	Jumlah	Nilai Kalor
Batubara ^{a)}	2.029.825,92 ton	0,000018 TJ/kg
Sekam Padi ^{b)}	41.008,76 ton	0,000012 TJ/kg
Cocopeat ^{c)}	12.563,58 ton	0,000020 TJ/kg
Aval Tembakau ^{d)}	5.126,93 ton	0,000015 TJ/kg
Resin ^{e)}	860,92 ton	0,000038 TJ/kg
Refuse Derived Fuel ^{f)}	2.699,56 ton	0,000022 TJ/kg
Industrial Diesel Oil ^{a)}	1.450.809 L	0,000038 TJ/L

Sumber: ^{a)} Permen LH 12 Tahun 2012

^{b)} Wahyudi, 2006

^{c)} Moka, 2012

^{d)} Mijailovic *et al.*, 2014

^{e)} Tsiamis dan Marco, 2016

^{f)} Bui *et al.*, 2009

Perhitungan beban emisi CO₂ dari penggunaan bahan bakar IDO selama 1 tahun:

Pemakaian IDO = 1.450,89 KL

= 1.450.890 L

Konsumsi energi = 1.450.890 L x 0,000038 TJ/L

= 55,13 TJ

$$\begin{aligned} \text{Beban emisi} &= 55,13 \text{ TJ} \times 74.100 \text{ kg/TJ} \\ &= 4.085.416,1 \text{ kg CO}_2 \\ &= 4.085,416 \text{ ton CO}_2 \end{aligned}$$

Untuk perhitungan beban emisi dari penggunaan bahan bakar IDO selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 4.8.

Tabel 4.8 Perhitungan Beban Emisi Penggunaan IDO

Emisi	Faktor Emisi	Nilai Kalor	Konsumsi Energi	Beban Emisi	
	kg/TJ	TJ/L	TJ	kg	ton
CO ₂	74.100	0,000038	55,13	4.085.416,1	4.085,416
CH ₄	3	0,000038	55,13	165,4	0,165
N ₂ O	0,6	0,000038	55,13	33,1	0,033

Sumber: Hasil Perhitungan

Perhitungan beban emisi CO₂ dari penggunaan bahan bakar batubara selama 1 tahun:

$$\begin{aligned} \text{Pemakaian batubara} &= 2.029.825,92 \text{ ton} \\ \text{Konsumsi energi} &= 2.029.825.920 \text{ kg} \times 0,000018 \text{ TJ/kg} \\ &= 36.536,87 \text{ TJ} \\ \text{Beban emisi} &= 36.536,87 \text{ TJ} \times 74.100 \text{ kg/TJ} \\ &= 3.690.223.522,56 \text{ kg CO}_2 \\ &= 3.690.223,52 \text{ ton CO}_2 \end{aligned}$$

Untuk perhitungan beban emisi penggunaan batubara selengkapnya pada Tabel 4.9.

Tabel 4.9 Perhitungan Beban Emisi Penggunaan Batubara

Emisi	Faktor Emisi	Nilai Kalor	Konsumsi Energi	Beban Emisi	
	kg/TJ	TJ/kg	TJ	kg	ton
CO ₂	101.000	0,000018	36536,87	3.690.223.522,56	3.690.223,52
CH ₄	1	0,000018	36536,87	36.536,87	36,54
N ₂ O	1,5	0,000018	36536,87	54.805,30	54,81

Sumber: Hasil Perhitungan

Perhitungan beban emisi CO₂ dari penggunaan bahan bakar sekam padi selama 1 tahun:

Pemakaian sekam padi = 41.008,76 ton
 Konsumsi energi = 41.008.760 kg x 0,000012 TJ/kg
 = 492,11 TJ
 Beban emisi = 492,11 TJ x 100.000 kg/TJ
 = 49.210.512,00 kg CO₂
 = 49.210,51 ton CO₂

Untuk perhitungan beban emisi penggunaan sekam padi selengkapnya pada Tabel 4.10.

Tabel 4.10 Perhitungan Beban Emisi Penggunaan Sekam Padi

Emisi	Faktor Emisi	Nilai Kalor	Konsumsi Energi	Beban Emisi	
	kg/TJ	TJ/kg	TJ	kg	ton
CO ₂	100.000	0,000012	492,11	49.210.512,00	49.210,51
CH ₄	30	0,000012	492,11	14.763,15	14,76
N ₂ O	4	0,000012	492,11	1.968,42	1,97

Sumber: Hasil Perhitungan

Perhitungan beban emisi CO₂ dari penggunaan bahan bakar *cocopeat* selama 1 tahun:

Pemakaian *cocopeat* = 12.563,58 ton
 Konsumsi energi = 12.563.580 ton x 0,000020 TJ/kg
 = 820,18 TJ
 Beban emisi = 820,18 TJ x 106.000 kg/TJ
 = 86.938.571,20 kg CO₂
 = 86.938,57 ton CO₂

Untuk perhitungan beban emisi penggunaan *cocopeat* selengkapnya pada Tabel 4.11.

Tabel 4.11 Perhitungan Beban Emisi Penggunaan *Cocopeat*

Emisi	Faktor Emisi	Nilai Kalor	Konsumsi Energi	Beban Emisi	
	kg/TJ	TJ/kg	TJ	kg	ton
CO ₂	106.000	0,00002	820,18	86.938.571,20	86.938,57
CH ₄	1	0,00002	820,18	820,18	0,82
N ₂ O	1,5	0,00002	820,18	1.230,26	1,23

Sumber: Hasil Perhitungan

Perhitungan beban emisi CO₂ dari penggunaan bahan bakar aval tembakau selama 1 tahun:

Pemakaian aval tembakau = 5.126,93 ton
 Konsumsi energi = 5.126.930 kg x 0,000020 TJ/kg
 = 615,13 TJ
 Beban emisi = 615,13 TJ x 100.000 kg/TJ
 = 61.513.140,00 kg CO₂
 = 61.513,14 ton CO₂

Untuk perhitungan beban emisi penggunaan aval tembakau selengkapnya pada Tabel 4.12.

Tabel 4.12 Perhitungan Beban Emisi Penggunaan Aval Tembakau

Emisi	Faktor Emisi	Nilai Kalor	Konsumsi Energi	Beban Emisi	
	kg/TJ	TJ/kg	TJ	kg	ton
CO ₂	100.000	0,000015	615,13	61.513.140,00	61.513,14
CH ₄	30	0,000015	615,13	18.453,94	18,45
N ₂ O	4	0,000015	615,13	2.460,53	2,46

Sumber: Hasil Perhitungan

Perhitungan beban emisi CO₂ dari penggunaan bahan bakar resin selama 1 tahun:

Pemakaian resin = 860,92 ton
 Konsumsi energi = 860.920 kg x 0,000020 TJ/kg
 = 1.558,33 TJ
 Beban emisi = 1.558,33 TJ x 143.000 kg/TJ
 = 222.841.601,84 kg CO₂
 = 222.841,60 ton CO₂

Untuk perhitungan beban emisi penggunaan resin selengkapnya pada Tabel 4.13.

Tabel 4.13 Perhitungan Beban Emisi Penggunaan Resin

Emisi	Faktor Emisi	Nilai Kalor	Konsumsi Energi	Beban Emisi	
	kg/TJ	TJ/kg	TJ	kg	ton
CO ₂	143.000	0,000038	1558,33	222.841.601,84	222.841,60
CH ₄	30	0,000038	1558,33	46.749,99	46,75
N ₂ O	4	0,000038	1558,33	6.233,33	6,23

Sumber: Hasil Perhitungan

Perhitungan beban emisi CO₂ dari penggunaan bahan bakar *refuse derived fuel* (RDF) selama 1 tahun:

Pemakaian RDF = 2.699,56 ton

Konsumsi energi = 2.699.560 kg x 0,000020 TJ/kg
= 902,19 TJ

Beban emisi = 902,19 TJ x 91.700 kg/TJ
= 82.731.072,42 kg CO₂
= 82.731,07 ton CO₂

Untuk perhitungan beban emisi penggunaan RDF selengkapnya pada Tabel 4.14.

Tabel 4.14 Perhitungan Beban Emisi Penggunaan RDF

Emisi	Faktor Emisi	Nilai Kalor	Konsumsi Energi	Beban Emisi	
	kg/TJ	TJ/kg	TJ	kg	ton
CO ₂	91.700	0,000022	902,19	82.731.072,42	82.731,07
CH ₄	30	0,000022	902,19	27.065,78	27,07
N ₂ O	4	0,000022	902,19	3.608,77	3,61

Sumber: Hasil Perhitungan

Perhitungan beban emisi CO₂ dari penggunaan listrik menggunakan selama 1 tahun:

Konsumsi listrik = 30,64 kWh/T.produksi x 12.395.563,05 ton
= 379.893.018,6 kWh
= 379.893,02 MWh

Beban emisi CO₂ = 379.893,02 MWh x 0,725 kg CO₂/MWh
= 275.422,44 kg CO₂
= 275,42 ton CO₂

Selanjutnya menghitung beban emisi dari data pengukuran manual pada *stack* menggunakan Persamaan 4.4 dan Persamaan 4.5:

Perhitungan beban emisi PM pada unit *kiln-cooler* selama 1 tahun:

$$\text{Konsentrasi} = 27,5 \text{ mg/Nm}^3$$

$$\text{O}_2 \text{ correction} = 1,67$$

$$\text{O}_2 \text{ terukur} = 12,6 \%$$

$$\text{Laju alir} = 18,23 \text{ m/s}$$

$$\text{Diameter stack} = 4,8 \text{ m}$$

$$\text{Jam operasi} = 6.595 \text{ jam}$$

$$\text{C correction} = 27,5 \text{ mg/Nm}^3 \times (21-1,67) / (21-12,6)$$

$$= 63,28 \text{ mg/Nm}^3$$

$$Q = 18,23 \text{ m/s} \times 3,14 \times 0,25 \times 4,8^2$$

$$= 329,72 \text{ m}^3/\text{detik}$$

$$E = 63,28 \text{ mg/Nm}^3 \times 329,72 \text{ m}^3/\text{detik} \times 0,0036 \times 6.595 \text{ jam}$$

$$= 495.383,3 \text{ kg PM}$$

Untuk perhitungan selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 4.15.

Tabel 4.15 Perhitungan Beban Emisi *Stack* Unit *Kiln-Cooler*

Perhitungan beban emisi Tier 3 (EP Cooler Tuban 1 SK 1)										
Emisi	Konsentrasi	O ₂ correction	O ₂ terukur	Laju Alir	Diameter Stack	Konsentrasi Koreksi	Q	Jam Operasi	Beban Emisi	
	mg/Nm ³	-	%	m/s	M	mg/Nm ³	m ³ /detik	jam	kg	ton
PM	27,5	1,67	12,6	18,23	4,8	63,28	329,72	6.595	495.383,3	495,383
Perhitungan beban emisi Tier 3 (EP Cooler Tuban 1 SK 2)										
Emisi	Konsentrasi	O ₂ correction	O ₂ terukur	Laju Alir	Diameter Stack	Konsentrasi Koreksi	Q	Jam Operasi	Beban Emisi	
	mg/Nm ³	-	%	m/s	M	mg/Nm ³	m ³ /detik	jam	kg	ton
PM	33,98	1,12	8,5	22,74	4,8	54,04	411,28	6.595	527.703,1	527,703
Perhitungan beban emisi Tier 3 (EP Cooler Tuban 2)										
Emisi	Konsentrasi	O ₂ correction	O ₂ terukur	Laju Alir	Diameter Stack	Konsentrasi Koreksi	Q	Jam Operasi	Beban Emisi	
	mg/Nm ³	-	%	m/s	M	mg/Nm ³	m ³ /detik	jam	kg	ton
PM	26,67	1,04	7,5	21,2	4,8	39,43	383,43	6.595	358.967,5	358,967

Perhitungan beban emisi Tier 3 (EP Cooler Tuban 3)										
Emisi	Konsentrasi	O ₂ correction	O ₂ terukur	Laju Alir	Diameter Stack	Konsentrasi Koreksi	Q	Jam Operasi	Beban Emisi	
	mg/Nm ³	-	%	m/s	M	mg/Nm ³	m ³ /detik	jam	kg	ton
PM	30,7	1,05	7,7	21,33	4,8	46,05	385,78	6.595	421.783,8	421,784
Perhitungan beban emisi Tier 3 (EP Cooler Tuban 4)										
Emisi	Konsentrasi	O ₂ correction	O ₂ terukur	Laju Alir	Diameter Stack	Konsentrasi Koreksi	Q	Jam Operasi	Beban Emisi	
	mg/Nm ³	-	%	m/s	M	mg/Nm ³	m ³ /detik	jam	kg	ton
PM	38,85	1,04	7,5	18,45	4,8	57,44	333,69	6.595	455.075,6	455,076

Sumber: Hasil Perhitungan

Jadi beban emisi yang dihasilkan dari *stack* unit *kiln-cooler* selama satu tahun sebesar 2.258,913 ton PM. Untuk hasil rekapitulasi selengkapya dapat dilihat pada Tabel 4.19.

Kemudian melakukan perhitungan terhadap beban emisi dari proses kalsinasi pada unit *rotary kiln*. Untuk dapat menghitung beban emisi proses kalsinasi menggunakan Persamaan 4.6 dan Persamaan 4.7. M_d merupakan massa debu yang tidak dikembalikan ke dalam proses pembuatan klinker. Pada umumnya, debu dihasilkan dari *raw material* yang dibakar untuk pembuatan klinker dan akan dikembalikan lagi ke dalam kiln sebagai *return dust*. Menurut Marku *et al.* (2012), jumlah debu yang dihasilkan dari unit *raw mill* sebesar 5-10% jumlah *raw material*. Berdasarkan data Semen Indonesia (2018), jumlah *raw material* yang digunakan dalam satu tahun sebesar 19668452,15 ton. Dengan asumsi jumlah *return dust* sebesar 10%, maka:

$$\text{Return dust} = 10\% \times 19.668.452,15 \text{ ton} = 1.966.845,22 \text{ ton}$$

Untuk mengetahui nilai M_d , maka dilakukan perhitungan dengan mengasumsikan efisiensi penurunan debu pada *Electrostatic Precipitator (EP) Raw Mill* sebesar 99,9% (Cooper dan Alley, 1994). Karena *return dust* akan dimasukkan kembali ke dalam plant dan selanjutnya masuk ke dalam EP. Maka jumlah debu yang tidak dikembalikan ke dalam proses pembuatan klinker sebesar 0,1%.

$$M_d = 0,1\% \times 1.966.845,22 \text{ ton} = 19.668,45 \text{ ton}$$

Maka nilai CF ckd sebesar:

$$\begin{aligned} \text{CF ckd} &= 1 + (M_d/M_{cl} \times C_d \times F_d \times EF_c/EF_{cl}) \\ &= 1 + ((19.668,45 \text{ ton} / 9.978.633 \text{ ton}) \times 0,89 \times 0,5 \times \\ &\quad (0,4379/0,51)) \\ &= 1,001 \end{aligned}$$

Kemudian dihitung nilai beban emisi CO_2 sebesar:

$$\begin{aligned} \text{Beban emisi} &= M_{cl} \times EF_{cl} \times \text{CF ckd} \\ &= 9.978.633 \text{ t klinker} \times 0,51 \text{ t CO}_2/\text{t klinker} \times 1,001 \\ &= 5.092.935,7 \text{ ton CO}_2 \end{aligned}$$

Jadi beban emisi yang dihasilkan dari unit *kiln-cooler* sebesar 9.286.646,82 ton CO_2 primer, 275,42 ton CO_2 sekunder (penggunaan listrik), 144,56 ton CH_4 , dan 70,34 ton N_2O , 2.258,913 ton PM. Untuk hasil rekapitulasi selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 4.19.

4.2.5 Perhitungan Beban Emisi Unit *Finish Mill*

Beban emisi dari unit *finish mill* berasal dari kegiatan proses produksi, dimana emisi yang dihasilkan dilewatkan ke *Electrostatic Precipitator* (EP) sebelum dilepas ke udara bebas melalui *stack* (cerobong). Data emisi didapatkan melalui hasil pengukuran manual pada *stack* dan dilakukan uji lab oleh laboratorium yang ditunjuk oleh PT Semen Indonesia (Persero) Tbk. Kemudian beban emisi dari unit *finish mill* juga berasal dari penggunaan energi listrik dalam proses produksi. Untuk perhitungan beban emisinya menggunakan Persamaan 4.3, Persamaan 4.4, dan Persamaan 4.5. Berikut perhitungan beban emisi dari unit *finish mill*.

Perhitungan beban emisi CO₂ dari penggunaan listrik selama 1 tahun:

$$\begin{aligned}\text{Konsumsi listrik} &= 32,85 \text{ kWh/T.produksi} \times 12.395.563,05 \text{ ton} \\ &= 407.183.163,7 \text{ kWh} \\ &= 407.183,16 \text{ MWh} \\ \text{Beban emisi CO}_2 &= 407.183,16 \text{ MWh} \times 0,725 \text{ kg CO}_2/\text{MWh} \\ &= 295.207,79 \text{ kg CO}_2 \\ &= 295,21 \text{ ton CO}_2\end{aligned}$$

Perhitungan beban emisi PM dari *stack* selama 1 tahun:

$$\begin{aligned}\text{Konsentrasi} &= 1 \text{ mg/Nm}^3 \\ \text{O}_2 \text{ correction} &= 1,17 \\ \text{O}_2 \text{ terukur} &= 8,6 \% \\ \text{Laju alir} &= 7,38 \text{ m/s} \\ \text{Diameter stack} &= 0,68 \text{ m} \\ \text{Jam operasi} &= 6.595 \text{ jam} \\ \text{C correction} &= 1 \text{ mg/Nm}^3 \times (21-1,17) / (21-8,6) \\ &= 1,60 \text{ mg/Nm}^3 \\ \text{Q} &= 1,60 \text{ m/s} \times 3,14 \times 0,25 \times 0,68^2 \\ &= 2,68 \text{ m}^3/\text{detik} \\ \text{E} &= 1,60 \text{ mg/Nm}^3 \times 2,68 \text{ m}^3/\text{detik} \times 0,0036 \times 6.595 \text{ jam} \\ &= 101,9 \text{ kg PM}\end{aligned}$$

Untuk perhitungan emisi *stack* selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 4.16.

Tabel 4.16 Perhitungan Beban Emisi *Stack Unit Finish Mill*

Perhitungan beban emisi Tier 3 (Exhaust Dust Finish Mill Tuban 1)										
Emisi	Konsentrasi	O ₂ correction	O ₂ terukur	Laju Alir	Diameter Exhaust Fan	Konsentrasi Koreksi	Q	Jam Operasi	Beban Emisi	
	mg/Nm ³	-	%	m/s	m	mg/Nm ³	m ³ /detik	jam	kg	ton
PM	1	1,13	8,6	7,38	0,68	1,60	2,68	6.595	101,9	0,102
Perhitungan beban emisi Tier 3 (Exhaust Dust Finish Mill Tuban 2)										
Emisi	Konsentrasi	O ₂ correction	O ₂ terukur	Laju Alir	Diameter Exhaust Fan	Konsentrasi Koreksi	Q	Jam Operasi	Beban Emisi	
	mg/Nm ³	-	%	m/s	m	mg/Nm ³	m ³ /detik	jam	kg	ton
PM	1	1,17	9	7,48	0,68	1,65	2,72	6.595	106,5	0,107
Perhitungan beban emisi Tier 3 (Exhaust Dust Finish Mill Tuban 3)										
Emisi	Konsentrasi	O ₂ correction	O ₂ terukur	Laju Alir	Diameter Exhaust Fan	Konsentrasi Koreksi	Q	Jam Operasi	Beban Emisi	
	mg/Nm ³	-	%	m/s	m	mg/Nm ³	m ³ /detik	jam	kg	ton
PM	2	1,15	8,8	6,96	0,68	3,25	2,53	6.595	195,2	0,195

Perhitungan beban emisi Tier 3 (Cerobong Finish Mill Tuban 4 Mill 8)										
Emisi	Konsentrasi	O ₂ correction	O ₂ terukur	Laju Alir	Diameter Cerobong	Konsentrasi Koreksi	Q	Jam Operasi	Beban Emisi	
	mg/Nm ³	-	%	m/s	m	mg/Nm ³	m ³ /detik	jam	kg	ton
PM	10,5	1,19	9,2	7,8	2,65	17,63	43,00	6.595	17995,5	17,996
Perhitungan beban emisi Tier 3 (Cerobong Finish Mill Tuban 4 Mill 7)										
Emisi	Konsentrasi	O ₂ correction	O ₂ terukur	Laju Alir	Diameter Cerobong	Konsentrasi Koreksi	Q	Jam Operasi	Beban Emisi	
	mg/Nm ³	-	%	m/s	m	mg/Nm ³	m ³ /detik	jam	kg	ton
PM	1	1,17	9	7,91	2,65	1,65	43,61	6.595	1710,8	1,711

Sumber: Hasil Perhitungan

Jadi beban emisi yang dihasilkan dari unit *finish mill* selama satu tahun sebesar 295,21 ton CO₂ sekunder (penggunaan listrik) dan 20,11 ton PM. Untuk hasil rekapitulasi selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 4.19.

4.2.6 Perhitungan Beban Emisi Unit *Packer*

Beban emisi dari unit *packer* berasal dari kegiatan proses produksi, dimana emisi yang dihasilkan dilewatkan ke *Electrostatic Precipitator* (EP) sebelum dilepas ke udara bebas melalui *stack* (cerobong). Data emisi didapatkan melalui hasil pengukuran manual pada *stack* dan dilakukan uji lab oleh laboratorium yang ditunjuk oleh PT Semen Indonesia (Persero) Tbk. Kemudian beban emisi dari unit *packer* juga berasal dari penggunaan energi listrik pada proses produksi. Untuk perhitungan beban emisinya menggunakan Persamaan 4.3, Persamaan 4.4, dan Persamaan 4.5. Berikut perhitungan beban emisi dari unit *packer*.

Perhitungan beban emisi CO₂ dari penggunaan listrik selama 1 tahun:

$$\begin{aligned}\text{Konsumsi listrik} &= 1,42 \text{ kWh/T.produksi} \times 12.395.563,05 \text{ ton} \\ &= 17.563.952,7 \text{ kWh} \\ &= 17.563,95 \text{ MWh} \\ \text{Beban emisi CO}_2 &= 17.563,95 \text{ MWh} \times 0,725 \text{ kg CO}_2/\text{MWh} \\ &= 12.733,87 \text{ kg CO}_2 \\ &= 12,73 \text{ ton CO}_2\end{aligned}$$

Perhitungan beban emisi PM dari *stack* selama 1 tahun:

$$\begin{aligned}\text{Konsentrasi} &= 5,4 \text{ mg/Nm}^3 \\ \text{O}_2 \text{ correction} &= 1,21 \\ \text{O}_2 \text{ terukur} &= 9,4 \% \\ \text{Laju alir} &= 11,27 \text{ m/s} \\ \text{Diameter stack} &= 0,32 \text{ m} \\ \text{Jam operasi} &= 6.595 \text{ jam} \\ \text{C correction} &= 5,4 \text{ mg/Nm}^3 \times (21-1,21) / (21-9,4) \\ &= 9,21 \text{ mg/Nm}^3 \\ Q &= 11,27 \text{ m/s} \times 3,14 \times 0,25 \times 0,32^2 \\ &= 0,91 \text{ m}^3/\text{detik} \\ E &= 9,21 \text{ mg/Nm}^3 \times 0,91 \text{ m}^3/\text{detik} \times 0,0036 \times 6.595 \text{ jam} \\ &= 198,1 \text{ kg PM}\end{aligned}$$

Untuk perhitungan emisi *stack* selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 4.17.

Tabel 4.17 Perhitungan Beban Emisi *Stack Unit Packer*

Perhitungan beban emisi Tier 3 (Exhaust Dust Packer Tuban 1)										
Emisi	Konsentrasi	O ₂ correction	O ₂ terukur	Laju Alir	Diameter Exhaust Fan	Konsentrasi Koreksi	Q	Jam Operasi	Beban Emisi	
	mg/Nm ³	-	%	m/s	m	mg/Nm ³	m ³ /detik	jam	kg	ton
PM	5,4	1,21	9,4	11,27	0,32	9,21	0,91	6.595	198,1	0,198
Perhitungan beban emisi Tier 3 (Exhaust Dust Packer Tuban 2)										
Emisi	Konsentrasi	O ₂ correction	O ₂ terukur	Laju Alir	Diameter Exhaust Fan	Konsentrasi Koreksi	Q	Jam Operasi	Beban Emisi	
	mg/Nm ³	-	%	m/s	m	mg/Nm ³	m ³ /detik	jam	kg	ton
PM	1	1,17	9	8,97	0,32	1,65	0,72	6.595	28,3	0,028
Perhitungan beban emisi Tier 3 (Exhaust Dust Packer Tuban 3)										
Emisi	Konsentrasi	O ₂ correction	O ₂ terukur	Laju Alir	Diameter Exhaust Fan	Konsentrasi Koreksi	Q	Jam Operasi	Beban Emisi	
	mg/Nm ³	-	%	m/s	m	mg/Nm ³	m ³ /detik	jam	kg	ton
PM	1	1,17	9	9,71	0,32	1,65	0,78	6.595	30,6	0,031
Perhitungan beban emisi Tier 3 (Exhaust Dust Packer Tuban 4)										
Emisi	Konsentrasi	O ₂ correction	O ₂ terukur	Laju Alir	Diameter Exhaust Fan	Konsentrasi Koreksi	Q	Jam Operasi	Beban Emisi	
	mg/Nm ³	-	%	m/s	m	mg/Nm ³	m ³ /detik	jam	kg	ton
PM	2,3	1,17	9	12,81	0,32	3,80	1,03	6.595	92,9	0,093

Sumber: Hasil Perhitungan

Jadi beban emisi yang dihasilkan dari unit *packer* selama satu tahun sebesar 12,73 ton CO₂ sekunder dan 0,35 ton PM. Untuk hasil rekapitulasi selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 4.19.

4.2.7 Perhitungan Beban Emisi Unit *Coal Mill*

Beban emisi dari unit *coal mill* berasal dari kegiatan proses produksi, dimana emisi yang dihasilkan dilewatkan ke *Electrostatic Precipitator* (EP) sebelum dilepas ke udara bebas melalui *stack* (cerobong). Data emisi didapatkan melalui hasil pengukuran manual pada *stack* dan dilakukan uji lab oleh laboratorium yang ditunjuk oleh PT Semen Indonesia (Persero) Tbk. Kemudian beban emisi dari unit *coal mill* juga berasal dari penggunaan energi listrik pada proses produksi. Untuk perhitungan beban emisinya menggunakan Persamaan 4.3, Persamaan 4.4, dan Persamaan 4.5. Berikut perhitungan beban emisi dari unit *coal mill*.

Perhitungan beban emisi CO₂ dari penggunaan listrik selama 1 tahun:

$$\begin{aligned} \text{Konsumsi listrik} &= 50,80 \text{ kWh/T.produksi} \times 12.395.563,05 \text{ ton} \\ &= 629.705.199,4 \text{ kWh} \\ &= 629.705,2 \text{ MWh} \\ \text{Beban emisi CO}_2 &= 629.705,2 \text{ MWh} \times 0,725 \text{ kg CO}_2/\text{MWh} \\ &= 456.536,27 \text{ kg CO}_2 \\ &= 456,53 \text{ ton CO}_2 \end{aligned}$$

Perhitungan beban emisi PM dari *stack* selama 1 tahun:

$$\begin{aligned} \text{Konsentrasi} &= 28,44 \text{ mg/Nm}^3 \\ \text{O}_2 \text{ correction} &= 2,14 \\ \text{O}_2 \text{ terukur} &= 14,4 \% \\ \text{Laju alir} &= 17,61 \text{ m/s} \\ \text{Diameter stack} &= 4,1 \text{ m} \\ \text{Jam operasi} &= 6.595 \text{ jam} \\ \text{C correction} &= 28,44 \text{ mg/Nm}^3 \times (21-2,14) / (21-14,4) \\ &= 81,27 \text{ mg/Nm}^3 \\ \text{Q} &= 17,61 \text{ m/s} \times 3,14 \times 0,25 \times 4,1^2 \\ &= 232,38 \text{ m}^3/\text{detik} \\ \text{E} &= 81,27 \text{ mg/Nm}^3 \times 232,38 \text{ m}^3/\text{detik} \times 0,0036 \times 6.595 \text{ jam} \\ &= 448375 \text{ kg PM} \end{aligned}$$

Untuk perhitungan emisi *stack* selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 4.18.

Tabel 4.18 Perhitungan Beban Emisi *Stack Unit Coal Mill*

Perhitungan beban emisi Tier 3 (Stack Coal Mill Tuban 1)										
Emisi	Konsentrasi	O ₂ correction	O ₂ terukur	Laju Alir	Diameter Stack	Konsentrasi Koreksi	Q	Jam Operasi	Beban Emisi	
	mg/Nm ³	-	%	m/s	m	mg/Nm ³	m ³ /detik	jam	kg	ton
PM	28,44	2,14	14,4	17,61	4,1	81,27	232,38	6.595	448.375,0	448,375
Perhitungan beban emisi Tier 3 (Stack Coal Mill Tuban 2)										
Emisi	Konsentrasi	O ₂ correction	O ₂ terukur	Laju Alir	Diameter Stack	Konsentrasi Koreksi	Q	Jam Operasi	Beban Emisi	
	mg/Nm ³	-	%	m/s	m	mg/Nm ³	m ³ /detik	jam	kg	ton
PM	23,37	2,48	15,3	17,93	4,1	75,93	236,60	6.595	426.540,0	426,540
Perhitungan beban emisi Tier 3 (Stack Coal Mill Tuban 3)										
Emisi	Konsentrasi	O ₂ correction	O ₂ terukur	Laju Alir	Diameter Stack	Konsentrasi Koreksi	Q	Jam Operasi	Beban Emisi	
	mg/Nm ³	-	%	m/s		mg/Nm ³	m ³ /detik	jam	kg	ton
PM	31,3	2,32	14,9	16,77	4,1	95,85	221,29	6.595	503.592,3	503,592

Perhitungan beban emisi Tier 3 (Stack Coal Mill Tuban 4)										
Emisi	Konsentrasi	O ₂ correction	O ₂ terukur	Laju Alir	Diameter Stack	Konsentrasi Koreksi	Q	Jam Operasi	Beban Emisi	
	mg/Nm ³	-	%	m/s	m	mg/Nm ³	m ³ /detik	jam	kg	ton
PM	28,5	2,21	14,6	16,38	4,1	83,67	216,15	6.595	429.398,2	429,398
Perhitungan beban emisi Tier 3 (Stack New Coal Mill)										
Emisi	Konsentrasi	O ₂ correction	O ₂ terukur	Laju Alir	Diameter Stack	Konsentrasi Koreksi	Q	Jam Operasi	Beban Emisi	
	mg/Nm ³	-	%	m/s	m	mg/Nm ³	m ³ /detik	jam	kg	Ton
PM	43,3	1,05	7,7	17,12	4,1	64,95	225,91	6.595	348.367,5	348,367

Sumber: Hasil Perhitungan

Jadi total beban emisi yang dihasilkan dari unit *coal mill* selama satu tahun sebesar 456,53 ton CO₂ sekunder (penggunaan listrik) dan 2.156,27 ton PM (*stack coal mill*). Untuk hasil rekapitulasi selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 4.19.

4.2.8 Beban Emisi Per Ton Produksi Semen

Beban emisi yang dihasilkan dari keseluruhan proses produksi semen dimulai dari unit eksploitasi sampai dengan unit *packer* seperti pada Tabel 4.19.

Tabel 4.19 Beban Emisi Keseluruhan Proses

No	Unit	Emisi	Satuan	Sumber	Beban Emisi per Tahun
1	Tambang	CO ₂	kg	Kendaraan Tambang	63.334.371,8
		CO	kg	Kendaraan Tambang	2.560.464,6
		SO ₂	kg	Kendaraan Tambang	269.827,2
		NO ₂	kg	Kendaraan Tambang	5.351.444,1
		PM	kg	Kendaraan Tambang	431.001,2
2	Crusher	CO ₂	kg	Penggunaan Listrik	202.045,4
3	Raw Mill	SO ₂	kg	Stack	2.727,8
		NO ₂	kg	Stack	22.321,3
		PM	kg	Stack	410,0
4	Kiln	CO ₂	kg	Penggunaan Bahan Bakar	4.197.543.836,1
		CO ₂	kg	Proses Kalsinasi	5.089.102.979,0
		CH ₄	kg	Penggunaan Bahan Bakar	144.555,3
		N ₂ O	kg	Penggunaan Bahan Bakar	70.339,7
		PM	kg	Stack	2.258.913,3
5	Finish Mill	CO ₂	kg	Penggunaan Listrik	295.207,8
		PM	kg	Exhaust Fan dan Stack	20.110,0
6	Packer	CO ₂	kg	Penggunaan Listrik	12.733,9
		PM	kg	Exhaust Fan	350,0
7	Coal Mill	CO ₂	kg	Penggunaan Listrik	456.536,3
		PM	kg	Stack	2.156.273,0

Sumber: Hasil Perhitungan

Produksi semen berdasarkan data Semen Indonesia (2018) selama satu tahun sebesar 12.395.563,05 ton semen. Sehingga beban emisi per ton produksi semen dapat dihitung dengan cara membagi beban emisi dengan jumlah produksi semen. Beban emisi per ton produksi semen dapat dilihat pada Tabel 4.20.

Tabel 4.20 Beban Emisi per Ton Produksi Semen

Emisi	Total Beban Emisi		Beban Emisi per Ton Produksi
	kg	ton	ton/produk
CO ₂ Primer	9.349.981.187,0	9.349.981,2	0,7543006
CO ₂ Sekunder	966.523,3	966,5	0,0000780
CH ₄	144.555,3	144,6	0,0000117
N ₂ O	70.339,7	70,3	0,0000057
SO ₂	2.727,8	2,7	0,0000002
NO ₂	22.321,3	22,3	0,0000018
PM	4.436.056,3	4.436,1	0,0003579

Sumber: Hasil Perhitungan

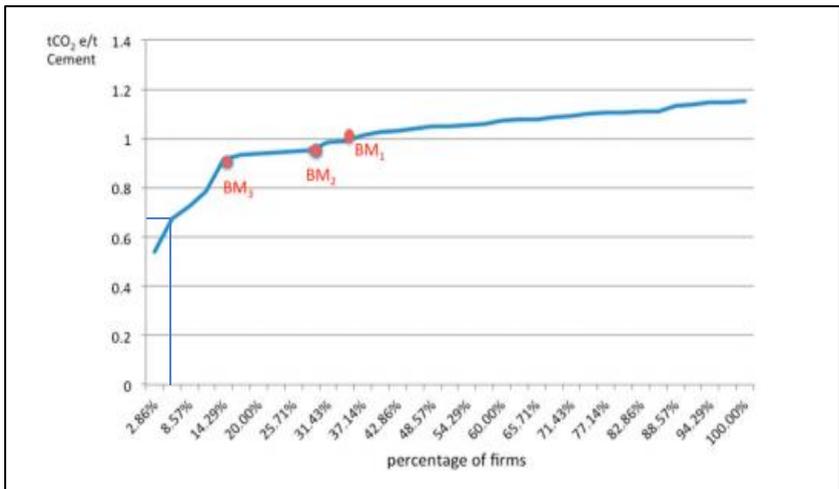
Dari data di atas, dapat diketahui nilai CO₂ *equivalent* (CO₂eq) yang dihasilkan berdasarkan emisi gas rumah kaca (GRK) yaitu CO₂, CH₄ dan N₂O. *Global Warming Potential* (GWP) dari GRK mengindikasikan jumlah gas yang menyebabkan pemanasan global dalam periode 100 tahun. GWP merupakan indeks, dengan CO₂ mempunyai nilai 1, CH₄ mempunyai nilai 25, dan N₂O mempunyai nilai 298 (IPCC, 2007). Maka nilai dari CO₂eq dari beban emisi yang dihasilkan dari 1 ton produk semen sebesar:

$$\begin{aligned} \text{CO}_2\text{eq} &= (0,7543006 \text{ ton/ton CO}_2 \times 1) + (0,0000117 \text{ ton/ton CH}_4 \times 25) + (0,0000057 \text{ ton/ton N}_2\text{O} \times 298) \\ &= 0,76 \text{ ton CO}_2\text{eq/ton semen} \end{aligned}$$

Jadi jumlah beban emisi yang dihasilkan dari produksi semen pada PT Semen Indonesia Tbk. Pabrik Tuban sebesar 0,76 ton CO₂eq per ton produksi semen.

4.2.9 Benchmarking

Benchmarking adalah suatu proses yang biasa digunakan dalam manajemen atau umumnya manajemen strategis, dimana suatu unit/bagian/organisasi mengukur dan membandingkan kinerjanya terhadap aktivitas atau kegiatan serupa unit/bagian/organisasi lain yang sejenis baik secara internal maupun eksternal. Untuk mengetahui apakah emisi CO₂eq yang dihasilkan berada di atas ataupun di bawah rata-rata industri semen dunia, maka dilakukan *benchmarking* berdasarkan pada emisi CO₂eq yang dihasilkan per ton produk semen. Menurut Dai *et al.* (2017), terdapat 3 pendekatan terkait dengan nilai benchmarking yaitu: BM1 sebesar 1 ton CO₂eq per ton produk semen, BM2 sebesar 0,95 ton CO₂eq per ton produk semen, dan BM3 sebesar 0,89 ton CO₂eq per ton produk semen. Dari 35 industri semen di Uni Eropa, didapatkan grafik *benchmark* sebagai berikut:



Gambar 4.3 Grafik *Benchmarking* Industri Semen

Sumber: Dai *et al.*, 2017

Apabila beban emisi GRK yaitu CO₂eq dari PT Semen Indonesia (Persero) Tbk. Pabrik Tuban dibandingkan dengan hasil grafik pada Gambar 4.3 di atas, maka PT Semen Indonesia (Persero) Tbk. Pabrik Tuban berada di bawah level BM₃. Jadi emisi GRK yang dihasilkan di bawah rata-rata industri semen di Uni Eropa.

Penilaian perbandingan hasil *benchmarking* tidak hanya dilakukan terhadap emisi CO₂eq per ton produk semen, namun juga pada energi yang digunakan dalam proses utama. Untuk melihat seberapa efisien penggunaan energi pada proses produksi semen di PT Semen Indonesia (Persero) Tbk. Pabrik Tuban, maka nilai intensitas energinya dibandingkan dengan nilai rata-rata dunia. Menurut Madloul, *et al.* (2012), konsumsi energi spesifik oleh unit kiln bervariasi bergantung pada jenis proses yang digunakan, yaitu proses kering dan proses basah. Untuk industri semen dengan proses basah mempunyai rata-rata konsumsi energi spesifik sebesar 5,29 GJ per ton klinker, sedangkan untuk proses kering sebesar 3,40 GJ per ton klinker. *Best practice* dari konsumsi energi spesifik di dunia dibawah 2,95 GJ per ton klinker. Untuk indeks pemakaian energi pada unit kiln PT Semen Indonesia (Persero) Tbk. Pabrik Tuban sebesar 3,66 GJ per ton klinker.

4.3 Life Cycle Assessment

Tahapan dalam penilaian daur hidup pada proses eksploitasi dan produksi semen PT Semen Indonesia (Persero) Tbk. adalah sebagai berikut:

4.3.1 Penentuan Tujuan dan Lingkup

Tujuan dari penilaian daur hidup penelitian ini untuk mengkaji dampak lingkungan pada kegiatan proses eksploitasi dan produksi PT Semen Indonesia (Persero) Tbk. Lingkup dari penilaian daur hidup ini yaitu:

- 1) Lingkup analisis sistem proses adalah *cradle to gate*, dimulai dari proses penambangan bahan baku untuk pembuatan semen sampai dengan proses *packing* semen.
- 2) Perhitungan beban emisi pada parameter CO₂, CH₄, N₂O, SO₂, NO₂, *particulate matter* (PM), dan CO.
- 3) Kategori *life cycle impact assessment* (LCIA) meliputi *global warming, carcinogenics, ecotoxicity, acidification, smog, dan respiratory effects..*
- 4) Metode yang digunakan dalam menjalankan SimaPro 8.5.2 yaitu TRACI 2.1.

4.3.2 Penentuan Life Cycle Inventory (LCI)

Life cycle inventory (LCI) merupakan bagian dari tahapan *life cycle assessment* (LCA), yang menjelaskan tentang inventarisasi masukan (*input*) data dan keluaran (*output*) data dari proses

produksi. Inventori dilakukan berdasarkan input dan output material di dalam sistem. Hasil LCI diklasifikasikan ke dalam kategori dampak, masing-masing dengan indikator kategori (Harjanto dan Saipul, 2018). Berikut LCI dari setiap proses produksi pada PT Semen Indonesia (Persero) Tbk.

1) Unit *Eksplorasi*

Eksplorasi atau kegiatan tambang yang ada di PT Semen Indonesia (Persero) Tbk. berfungsi sebagai unit penambang bahan baku yang diperlukan dalam pembuatan semen. Bahan baku yang diambil dari tambang yaitu batu kapur dan tanah liat. Dalam proses eksplorasi, alat berat dan kendaraan pengangkut material tambang digunakan untuk mendukung proses penambangan bahan baku. Selain itu juga dibutuhkan bahan bakar IDO dalam jumlah besar untuk dapat menggerakkan operasional yang ada pada unit eksplorasi. Sehingga dihasilkan emisi berupa gas CO₂, CH₄, N₂O, SO₂, NO₂, PM, dan CO. Berikut merupakan data *input* dan *output* dari kegiatan eksplorasi pada Tabel 4.21.

Tabel 4.21 Data Inventori Unit Eksploitasi

Nama Unit	Bahan Baku	Jumlah	Bahan Bakar	Jumlah	Energi Listrik	Jumlah	Emisi Udara	Jumlah	Produk	Jumlah
		ton		ton		kWh		ton		ton
Eksploitasi Batu Kapur dan Tanah Liat	-	-	IDO	12.512	-	-	CO ₂	2.016,15	Batu Kapur	15.474.525
							SO ₂	269,83	Tanah Liat	3.516.160
							NO ₂	5.351,44		
							PM	431,00		
							CO	2.560,46		

Sumber: Hasil Perhitungan

2) Unit *Crusher*

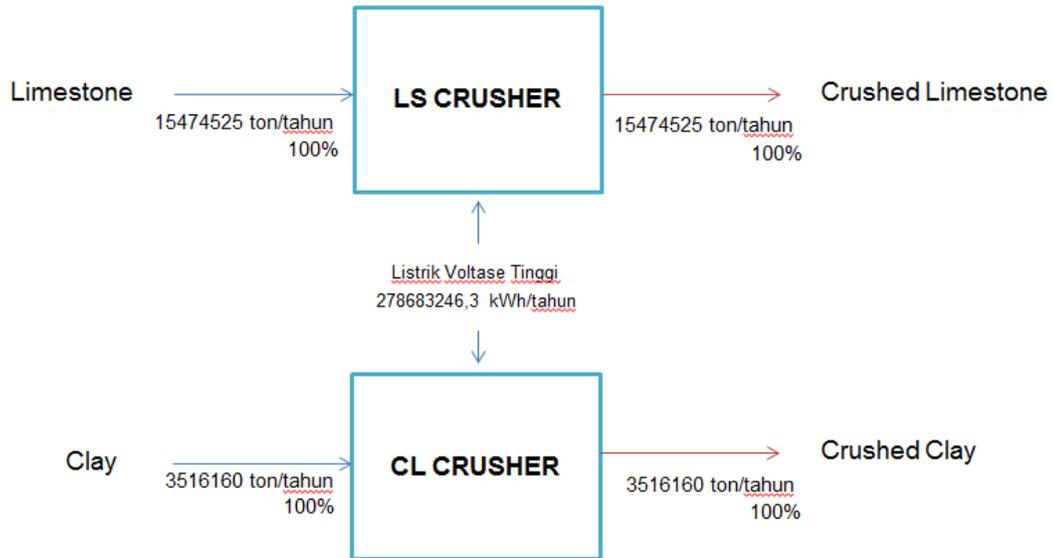
Unit *crusher* yang ada di PT Semen Indonesia (Persero) Tbk. berfungsi untuk menghancurkan tanah liat dan batu kapur yang berukuran besar sehingga menjadi lebih kecil untuk diolah di *raw mill*. Tanah liat dan batu kapur diterima dari unit eksploitasi. Tanah liat dipecah atau dihancurkan pada unit *clay crusher* dan *roller mill*. Batu kapur dipecah atau dihancurkan pada unit *limestone crusher* dan *roller mill*. Energi yang digunakan dalam unit *crusher* berupa energi listrik, dimana energi listrik ini berasal dari jaringan distribusi PT Perusahaan Listrik Negara (PLN) dengan voltase tinggi. Sehingga dihasilkan emisi berupa gas CO₂ yang berasal dari penggunaan energi listrik. Berikut merupakan data *input* dan *output* dari kegiatan eksploitasi pada Tabel 4.23.

Selanjutnya setelah didapatkan data *input* dan *output* maka dibuat *material balance* dari proses pada unit *crusher*. Basis perhitungan waktu dalam tahun, lebih spesifik selama 6.595 jam. Sedangkan satuan berat dalam ton. Tujuan dari adanya *material balance* untuk memastikan bahwa jumlah *input* material sama dengan *output* material. *Output* material meliputi produk dan emisi yang dihasilkan. Diagram *material balance* dapat dilihat pada Gambar 4.4.

Tabel 4.22 Data Inventori Unit *Crusher*

No	Nama Unit	Bahan Baku	Jumlah	Bahan Bakar	Jumlah	Energi Listrik	Jumlah	Emisi Udara	Jumlah	Produk	Jumlah
			Ton		ton		kWh		Ton		ton
1	Limestone Crusher	Limestone	15.474.525	-	-	Listrik Voltase Tinggi dari PLN	278.683.246,3	CO ₂ sekunder	202,5	Crushed Limestone	15.474.525
2	Clay Crusher	Clay	3.516.160	-	-					Crushed Clay	3.516.160

Sumber: Hasil Perhitungan



Gambar 4.4 Diagram *Material Balance* Unit *Crusher*
 Sumber: Hasil Perhitungan

3) Unit *Raw Mill*

Material yang dilewatkan timbangan otomatis campuran batu kapur, tanah liat, pasir silika, dan pasir besi dilakukan penggilingan dan pengeringan dalam *raw mill* hingga mencapai derajat kehalusan tertentu. Media pengeringannya adalah udara panas yang berasal dari kiln dan pre-heater. Udara panas tersebut juga berfungsi sebagai media pembawa bahan-bahan yang telah halus menuju proses selanjutnya. *Raw mill* memiliki bagian yang dinamakan *classifier* yang berfungsi untuk mengendalikan ukuran partikel yang boleh keluar dari *raw mill*, partikel dengan ukuran besar dikembalikan ke dalam *raw mill* untuk mengalami penghalusan selanjutnya sampai ukuran partikel mencapai ukuran yang diharapkan.

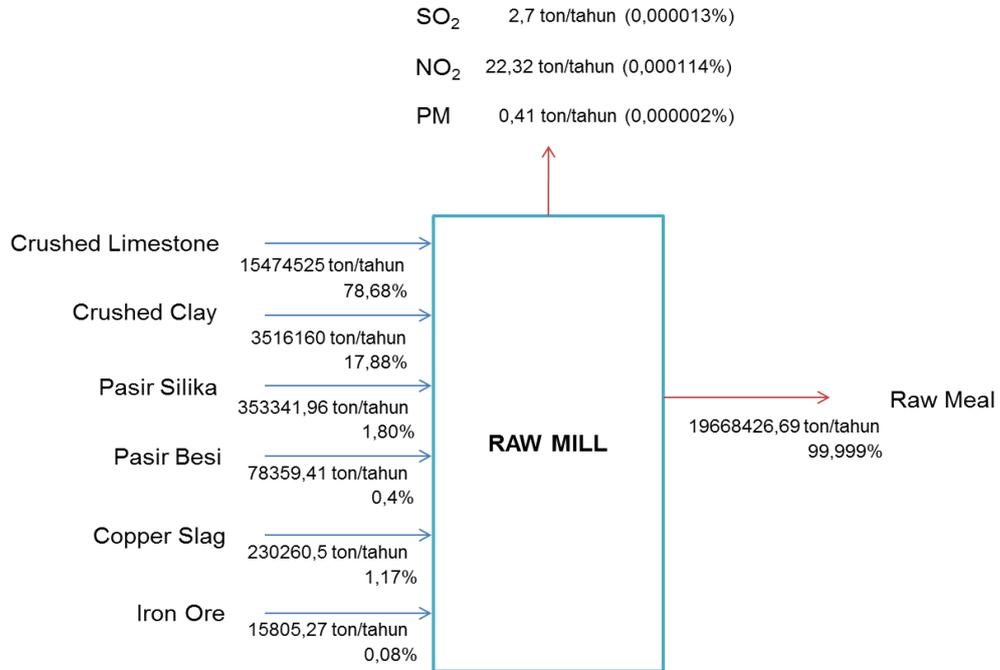
Sementara itu partikel yang ukurannya telah memenuhi kebutuhan akan terbawa udara panas menuju *cyclone*. Dimana *cyclone* ini berfungsi untuk memisahkan antara partikel yang cukup halus dan partikel yang terlalu halus (debu). Partikel yang cukup halus akan turun ke bagian bawah *cyclone* dan dikirim ke *blending* silo untuk mengalami pengadukan dan homogenasi. Partikel yang terlalu halus (debu) akan terbawa udara panas menuju *electrostatic precipitator*. Alat ini berfungsi untuk menangkap debu-debu tersebut sehingga tidak lepas ke udara. Debu-debu yang tertangkap, di kumpulkan di dalam *dust bin*, sementara itu udara akan keluar melalui *stack*. Emisi udara yang dikeluarkan oleh *stack* berupa SO₂, NO₂, dan PM. Berikut merupakan data *input* dan *output* dari kegiatan eksploitasi pada Tabel 4.23.

Selanjutnya setelah didapatkan data input dan output maka dibuat *material balance* dari proses pada unit *raw mill*. Basis perhitungan waktu dalam tahun, lebih spesifik selama 6.595 jam. Sedangkan satuan berat dalam ton. Tujuan dari adanya *material balance* untuk memastikan bahwa jumlah *input* material sama dengan *output* material. Output material meliputi produk dan emisi yang dihasilkan. Diagram *material balance* dapat dilihat pada Gambar 4.5.

Tabel 4.23 Data Inventori Unit *Raw Mill*

No	Nama Unit	Bahan Baku	Jumlah	Bahan Bakar	Jumlah	Energi Listrik	Jumlah	Emisi Udara	Jumlah	Produk	Jumlah
			ton		ton		kWh		ton		ton
1	Raw Mill	Batu Kapur	15.474.525,00	-	-	-	-	SO ₂	2,73	Raw Meal	19.668.426,69
		Tanah Liat	3.516.160,00					NO ₂	22,32		
		Pasir Silika	353.341,96					PM	0,41		
		Pasir Besi	78.359,41								
		Copper Slag	230.260,50								
		Iron Ore	15.805,28								

Sumber: Hasil Perhitungan



Gambar 4.5 Diagram *Material Balance* Unit *Raw Mill*

Sumber: Hasil Perhitungan

4) Unit *Kiln-Cooler*

Fungsi *kiln* adalah untuk pembakaran material menjadi terak klinker. Cara kerjanya diawali umpan kiln dari *pre-heater* akan masuk melalui *inlet chamber*. Tenaga gerak dari motor dan main gear menyebabkan kiln berputar. Perputaran pada kiln diatur oleh girth gear yang berfungsi sebagai pengaman dan mengurangi beban main gear karena pengaruh kemiringan dan gaya putar kiln, maka umpan akan bergerak perlahan di sepanjang kiln. Dari arah yang berlawanan gas panas hasil pembakaran batubara dihembuskan oleh *burner*, sehingga terjadi kontak panas dan perpindahan panas antara umpan *kiln* dengan gas panas. Kontak panas tersebut akan mengakibatkan terjadinya reaksi kimia untuk membentuk komponen semen. Panas pada proses pembakaran yang keluar akan diserap blower. Pembakaran akan terus berlangsung sampai terbentuk klinker dan akan keluar menuju klinker *cooler*. Proses pembakaran kapur selama pembentukan klinker (kalsinasi) menghasilkan emisi CO₂.

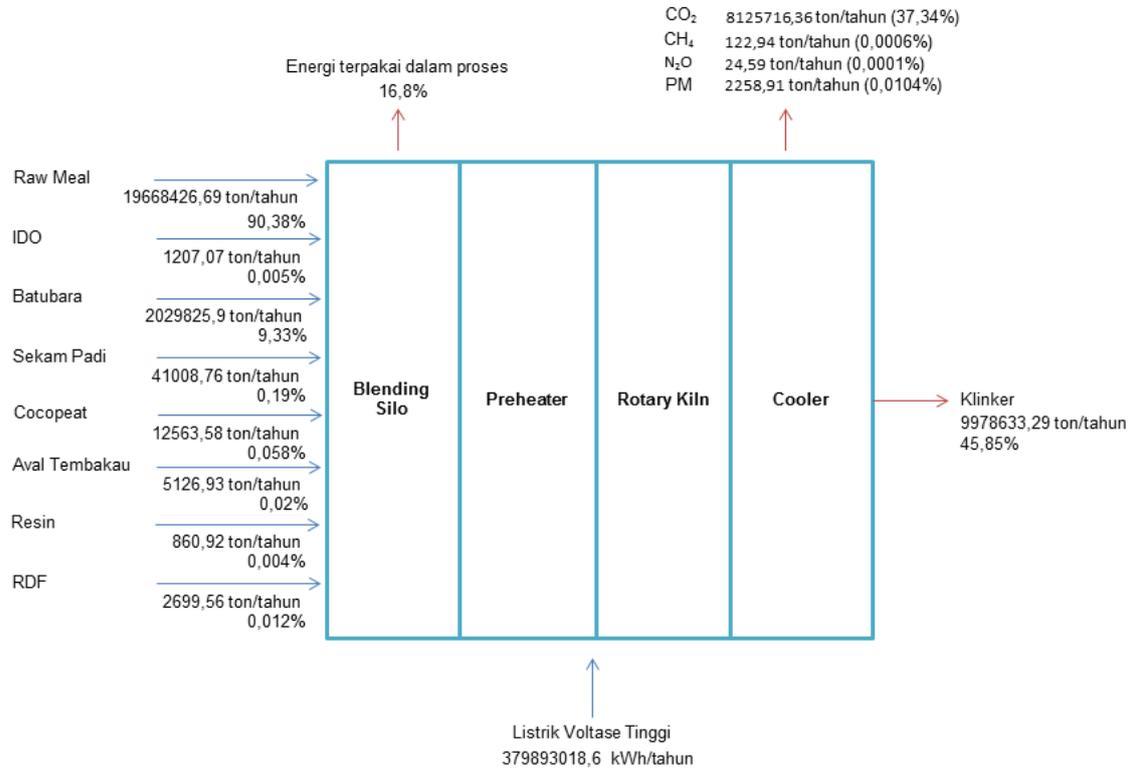
Setelah dipanaskan klinker didinginkan secara mendadak. Tujuan pendinginan secara mendadak adalah agar dihasilkan klinker yang bersifat *amorf* sehingga mudah digiling. Alat utama yang digunakan untuk proses pendinginan klinker adalah *cooler*. Setelah proses pembentukan klinker selesai dilakukan dalam tanur putar, klinker tersebut terlebih dahulu didinginkan di dalam *cooler* sebelum disimpan di dalam klinker silo. *Cooler* yang digunakan menggunakan udara luar sebagai pendingin. Udara yang keluar dari cooler dimanfaatkan sebagai media pemanas pada *raw mill*, sebagai pemasok udara panas pada *kiln*, dan sebagian lain di buang ke udara bebas. Sebelum dibuang ke udara bebas, dialirkan ke *stack electrostatic presipitator* terlebih dahulu. Emisi udara yang dikeluarkan oleh *stack* berupa PM. Berikut merupakan data *input* dan *output* dari kegiatan eksploitasi pada Tabel 4.24.

Selanjutnya setelah didapatkan data input dan output maka dibuat *material balance* dari proses pada unit *kiln-cooler*. Basis perhitungan waktu dalam tahun, lebih spesifik selama 6.595 jam. Sedangkan satuan berat dalam ton. Tujuan dari adanya *material balance* untuk memastikan bahwa jumlah *input* material sama dengan *output* material. Output material meliputi produk dan emisi yang dihasilkan. Diagram *material balance* dapat dilihat pada Gambar 4.6.

Tabel 4.24 Data Inventori Unit *Kiln-Cooler*

No	Nama Unit	Bahan Baku	Jumlah	Bahan Bakar	Jumlah	Energi Listrik	Jumlah	Emisi Udara	Jumlah	Produk	Jumlah
			ton		ton		kWh		ton		ton
1	Kiln-Cooler	Raw Meal	19.668.426,69	IDO	1.207,1	Listrik Voltase Tinggi dari PLN	379.893.018,6	CO ₂ Primer	9.286.646,8	Klinker	9.978.633,3
				Batubara	2.029.825,9			CO ₂ Sekunder	275,4		
				Sekam Padi	41.008,8			CH ₄	144,6		
				Cocopeat	12.563,6			N ₂ O	70,3		
				Aval Tembakau	5.126,9			PM	2.258,9		
				Resin	860,9						
				RDF	2.699,6						

Sumber: Hasil Perhitungan



5) Unit *Finish Mill*

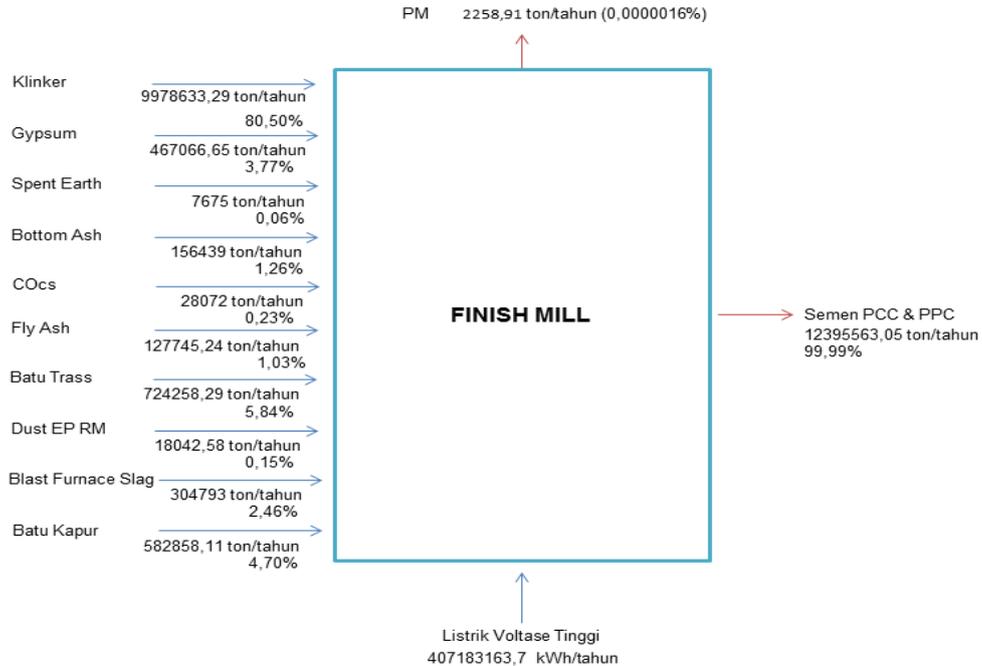
Finish mill merupakan unit kegiatan pembuatan semen pada tahap akhir. Dimana pada tahapan ini akan terjadi proses pencampuran, penggilingan, dan penghalusan. Selain itu di tahapan ini akan ada penambahan material ketiga untuk menentukan jenis semen yang akan di proses. Material ketiga yang ditambahkan yaitu gypsum, spent earth, bottom ash, COcs, *fly ash*, batu trass, *dust EP raw mill*, *blast furnace slag*, dan batu kapur sesuai dengan komposisi pembentukan semen PCC dan PPC. Energi yang digunakan selama proses *finishing* disini yaitu energi listrik yang disuplai dari *Waste Heat Recovery Power Generator (WHRPG)* dan PLN. Emisi yang dihasilkan dari kegiatan produksi pada unit *finish mill* berupa emisi PM. Emisi PM ini diukur dari cerobong exhaust dust. Berikut merupakan data *input* dan *output* dari kegiatan eksploitasi pada Tabel 4.25.

Selanjutnya setelah didapatkan data *input* dan *output* maka dibuat *material balance* dari proses pada unit *finish mill*. Basis perhitungan waktu dalam tahun, lebih spesifik selama 6.595 jam. Sedangkan satuan berat dalam ton. Tujuan dari adanya *material balance* untuk memastikan bahwa jumlah *input* material sama dengan *output* material. Output material meliputi produk dan emisi yang dihasilkan. Diagram *material balance* dapat dilihat pada Gambar 4.7.

Tabel 4.25 Data Inventori Unit *Finish Mill*

No	Nama Unit	Bahan Baku	Jumlah	Bahan Bakar	Jumlah	Energi Listrik	Jumlah	Emisi Udara	Jumlah	Produk	Jumlah
			ton		ton		kWh		ton		ton
1	Finish Mill	Klinker	9.978.633,29	-	-	Listrik Voltase Tinggi dari PLN dan WHRPG	407.183.163,7	CO ₂ Sekunder	308,64	Semen	12.395.563,05
		Gypsum	467.066,65					PM	20,11		
		Spent Earth	7.675								
		Bottom Ash	156.439								
		COcs	28.072								
		Fly Ash	127.745,24								
		Batu Trass	724.258,29								
		Dust EP RM	18.042,58								
		Blast Furnace Slag	304.793								
		Batu Kapur	582.858,11								

Sumber: Hasil Perhitungan



Gambar 4.7 Diagram *Material Balance* Unit *Finish Mill*

Sumber: Hasil Perhitungan

6) Unit *Packer*

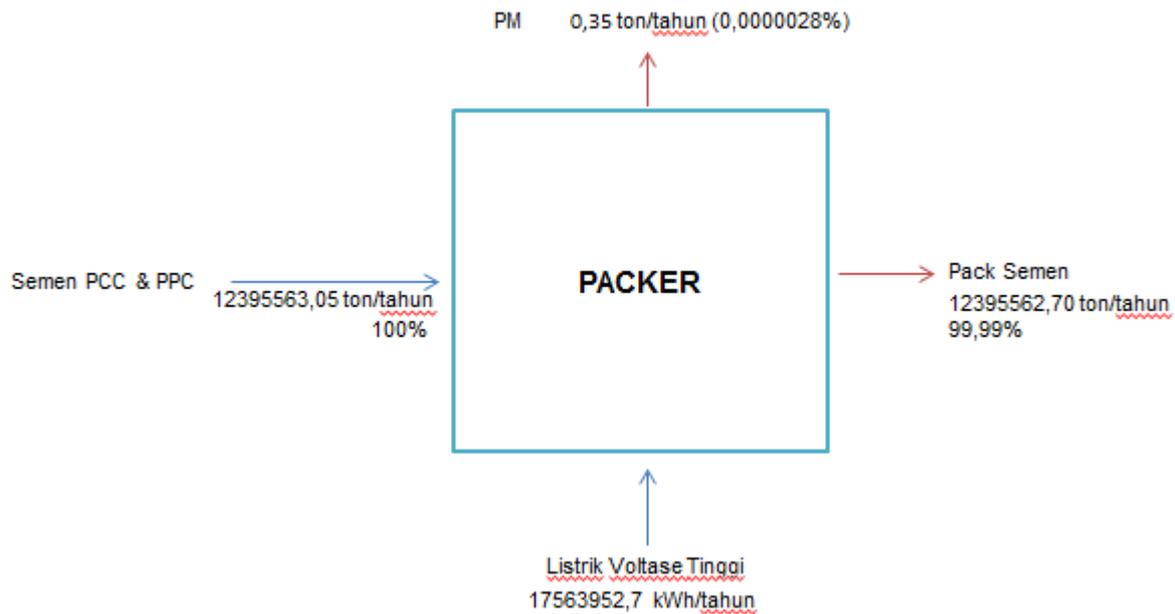
Setelah melalui tahap pengolahan akhir pada *finish mill*, maka semen dari silo semen akan ditransportasikan dengan *air slight* menuju tempat *packer*. Adapun proses pengepakan semen menggunakan mesin *rotary packer*. *Filling spot* dimasukkan ke dalam lubang yang terdapat pada kantong kemasan, kemudian semen dicurahkan melalui *filling spot* ke dalam kantong. Pada alat *rotary packer* terdapat timbangan yang berfungsi untuk mengukur berat semen yang masuk ke dalam kemasan. Energi yang digunakan selama proses packing semen yaitu energi listrik dengan voltase tinggi dari PLN. Emisi yang dihasilkan berupa PM dari *stack exhaust dust packer*. Berikut merupakan data *input* dan *output* dari kegiatan eksploitasi pada Tabel 4.26.

Selanjutnya setelah didapatkan data *input* dan *output* maka dibuat *material balance* dari proses pada unit *finish mill*. Basis perhitungan waktu dalam tahun, lebih spesifik selama 6.595 jam. Sedangkan satuan berat dalam ton. Tujuan dari adanya *material balance* untuk memastikan bahwa jumlah *input* material sama dengan *output* material. *Output* material meliputi produk dan emisi yang dihasilkan. Diagram *material balance* dapat dilihat pada Gambar 4.8.

Tabel 4.26 Data Inventori Unit *Packer*

No	Nama Unit	Bahan Baku	Jumlah	Bahan Bakar	Jumlah	Energi Listrik	Jumlah	Emisi Udara	Jumlah	Produk	Jumlah
			ton		ton		kWh		ton		ton
1	Packer	Semen	12.395.563,05	-	-	Listrik Voltase Tinggi dari PLN	17.563.952,7	CO ₂ Sekunder	12,73	Semen	12.395.562,70
								PM	0,35		

Sumber: Hasil Perhitungan



Gambar 4.8 Diagram *Material Balance* Unit *Packer*
 Sumber: Hasil Perhitungan

7) Unit Coal Mill

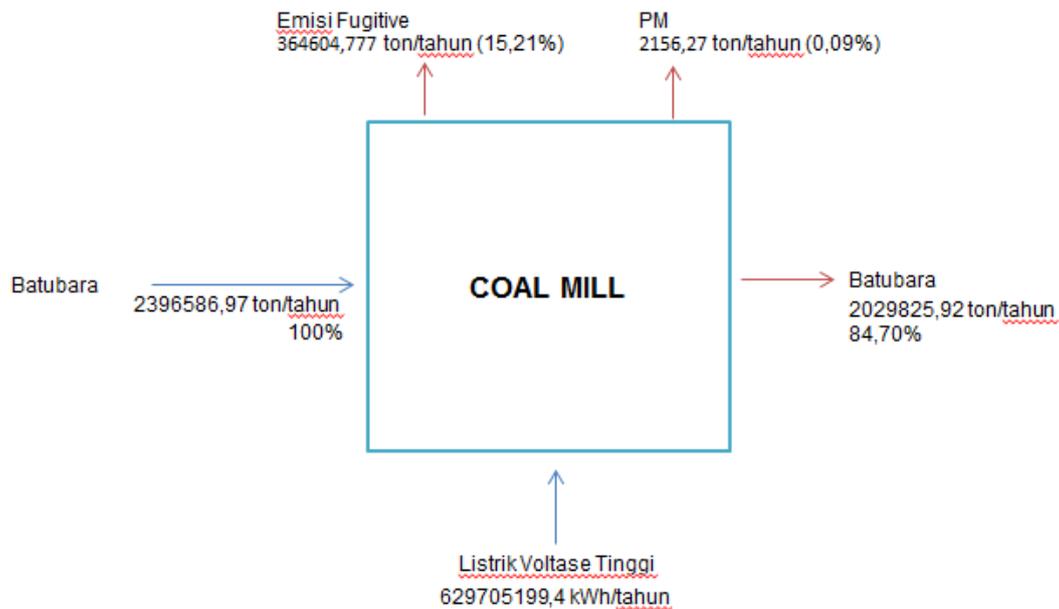
Prinsip kerja coal mill secara umum dimulai dengan batubara yang dilewatkan lewat *chute inlet* dari *coal feeder*, batubara kemudian jatuh dan ditampung pada *bowl assembly* (semacam meja yang berputar secara sentripetal) untuk menghempaskan batubara ke *wheat ball* (penghancur batubara). Energi gerak yang digunakan untuk memutar *bowl assembly* berasal dari *coal mill motor* yang dihubungkan dengan *gearbox* yang dapat menurunkan rpm motor dari 1.500 rpm menjadi 60 rpm. Setelah mengalami proses penghancuran batubara kemudian menjadi abu yang siap dibakar di burner pada boiler. Agar abu hasil penghancuran tersebut tidak membentuk kerak pada bagian yang lain, maka dilakukan *spring* atau disemprot menggunakan udara panas yang berasal dari PAF (*Primary Air Fan*). Selanjutnya abu batubara menuju ke *classifier assembly*, abu batubara disaring sehingga hanya batu bara yang sudah memenuhi ukuran yang ditentukan yang akan dikirimkan menuju *burner*. Sedangkan abu batubara yang tidak dapat melewati *classifier assembly* akan jatuh kembali menuju *bowl assembly* untuk menjalani proses penghancuran lagi (Sadewa et al., 2018).

Sumber energi penggerak dari coal mill ini berasal dari energi listrik. Kemudian jenis batubara yang digunakan yaitu *lignite*. Akibat adanya proses penghancuran batubara menimbulkan emisi PM yang dikeluarkan melalui *stack coal mill*. Berikut merupakan data *input* dan *output* dari kegiatan eksploitasi pada Tabel 4.27. Selanjutnya setelah didapatkan data input dan output maka dibuat *material balance* dari proses pada unit *coal mill*. Basis perhitungan waktu dalam tahun, lebih spesifik selama 6.595 jam. Sedangkan satuan berat dalam ton. Tujuan dari adanya *material balance* untuk memastikan bahwa jumlah *input* material sama dengan *output* material. Output material meliputi produk dan emisi yang dihasilkan. Diagram *material balance* dapat dilihat pada Gambar 4.9.

Tabel 4.27 Data Inventori Unit *Coal Mill*

No	Nama Unit	Bahan Baku	Jumlah	Bahan Bakar	Jumlah	Energi Listrik	Jumlah	Emisi Udara	Jumlah	Produk	Jumlah
			Ton		ton		kWh		ton		ton
1	Coal Mill	Batubara	2.396.586,97	-	-	Listrik Voltase Tinggi dari PLN	629.705.199,4	CO ₂ Sekunder	456,54	Batubara	2.029.825,92
								PM	2.156,27		

Sumber: Hasil Perhitungan



Gambar 4.9 Diagram *Material Balance* Unit *Coal Mill*
 Sumber: Hasil Perhitungan

4.3.3 Penentuan *Life Cycle Impact Assessment (LCIA)*

Prakiraan dampak berdasarkan *input* dan *output* pada setiap kegiatan. Metode yang digunakan dalam proses penentuan dampak yaitu TRACI 2.1. Jenis pendekatan yang digunakan yaitu pendekatan *midpoint*, dimana pendekatan *midpoint* ini merujuk pada hasil *impact assessment* yang spesifik per kategori dampak. Beberapa kategori dampak yang dapat dianalisis dengan pendekatan TRACI 2.1 ini meliputi *ecotoxicity, global warming, smog formation, acidification, eutrophication, carcinogenics, non carcinogenics, respiratory effects, ozone depletion, dan fossil fuel depletion* (Menoufi, 2011).

LCIA merupakan penanganan dari dampak terhadap lingkungan, semua dampak penggunaan dari sumberdaya dan emisi yang dihasilkan dikelompokkan dan dikuantifikasi kedalam jumlah tertentu kategori dampak yang kemudian diberi bobot sesuai dengan tingkat kepentingannya. Tahapan pada LCIA sendiri terdiri dari *Characterization, Normalization, Weighting, dan Single score* (Sari, 2017). Hasil dari LCIA ini berupa diagram pohon yang menunjukkan besar kontribusi dampak per proses produksi. Garis merah berpanah pada diagram pohon menunjukkan hubungan antar kegiatan. Dampak yang diteliti adalah *global warming 100a, ecotoxicity, acidification, smog, dan respiratory effects*. Penilaian dampak keseluruhan nantinya akan dihitung sebanyak 2 kali sesuai dengan tahapan pada LCIA. Berikut penjelasan terkait dengan perhitungan penilaian dampak:

1. *Global Warming 100a*

Impact ini membahas mengenai dampak yang dihasilkan dari peningkatan suhu permukaan bumi seperti adanya perubahan iklim. Dimana penyebab dari dampak ini akibat meningkatnya gas rumah kaca di atmosfer. Satuan dari *impact* ini adalah ton CO₂ eq.

2. *Ecotoxicity*

Impact ini membahas mengenai dampak yang dihasilkan dari zat beracun yang mempengaruhi di lingkungan manusia. Satuan *impact* ini adalah *Comparative Toxicity Unit (CTUe)*.

3. *Respiratory Effects*

Impact ini membahas mengenai dampak yang dihasilkan dari peningkatan jumlah partikulat di atmosfer, sehingga mempengaruhi terhadap kesehatan manusia. Dimana penyebab dari dihasilkannya partikulat berasal dari kegiatan

pembakaran batubara dan pembakaran bahan bakar lainnya. Satuan *impact* ini adalah ton PM_{2,5} eq.

4. *Carcinogenics*

Impact ini membahas mengenai dampak yang dihasilkan dari zat kimia yang mempengaruhi di lingkungan manusia sehingga menimbulkan potensi penyakit kanker. Satuan *impact* ini adalah *Comparative Toxicity Unit* (CTUh).

5. *Smog Formation*

Impact ini membahas mengenai dampak yang dihasilkan dari reaksi kimia antara nitrogen dioksida (NO₂) dengan *volatile organic compound* (VOC) pada siang hari. Hal ini dapat berpengaruh terhadap kesehatan manusia, antara lain dapat menyebabkan gangguan pernafasan. Satuan *impact* ini adalah kg O₃ eq.

6. *Acidification*

Impact ini membahas mengenai dampak yang dihasilkan dari zat asam yang masuk ke dalam lingkungan (asam nitrit dan asam sulfat) sehingga menyebabkan keasaman di lingkungan meningkat. Satuan dari *impact* ini yaitu kg SO₂ eq.

Berikut penjelasan mengenai penilaian dampak secara keseluruhan yang akan dihitung sebanyak 2 kali:

- *Characterization*

Characterization merupakan tahapan dimana aplikasi SimaPro akan menampilkan kontribusi relatif terhadap dampak lingkungan. Tahap ini mengukur kontribusi dampak produk atau kegiatan pada setiap indikator dampak. Dalam perhitungannya digunakan *characterization factor* untuk mengkonversi hasil LCI kedalam bentuk satuan masing-masing dampak.

- *Normalization*

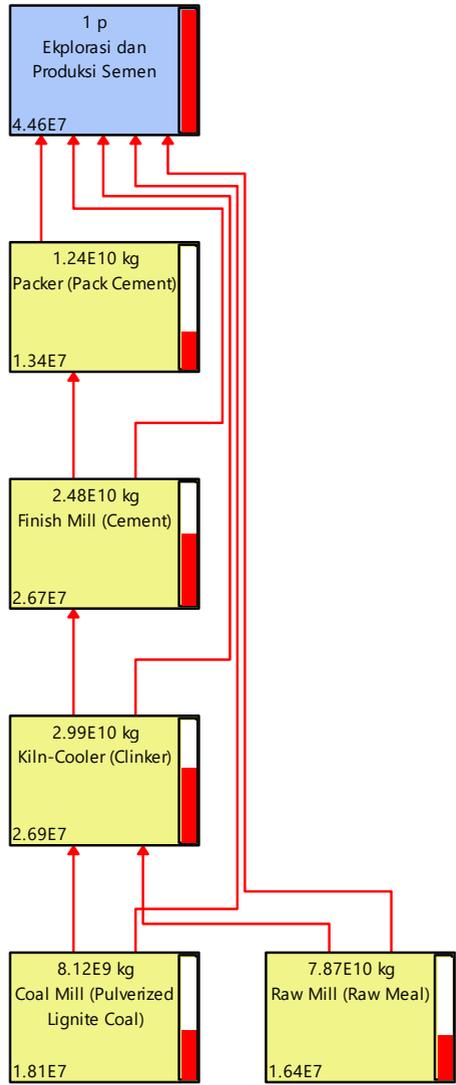
Normalization merupakan perbandingan terhadap indikator dampak yang dipilih. Tahap ini menormalkan hasil indikator dengan membagi dengan nilai referensi yang dipilih. Berikut nilai *normalization factor*.

Tabel 4.28 *Normalization Factor*

<i>Impact Category</i>	<i>Normalization Factor</i>
<i>Ecotoxicity</i>	7.6×10^1
<i>Carcinogenics</i>	$5,5 \times 10^{-6}$
<i>Non Carcinogenics</i>	$3,7 \times 10^{-5}$
<i>Global Warming</i>	$2,4 \times 10^4$
<i>Ozone Depletion</i>	$1,6 \times 10^{-1}$
<i>Acidification</i>	$9,1 \times 10^1$
<i>Eutrophication</i>	$2,2 \times 10^1$
<i>Smog</i>	$1,4 \times 10^3$
<i>Respiratory Effects</i>	$2,4 \times 10^1$
<i>Fossil Fuel Depletion</i>	$1,7 \times 10^4$

Sumber: Ryberg *et al.*, 2013

Normalisasi berhubungan dengan besarnya nilai dampak yang diukur pada tahap karakterisasi yang dihitung berdasarkan referensi umum, menempatkan nilai dampak dalam kaitannya dengan kegiatan produksi. Sehingga diperoleh pemahaman yang lebih baik dari kontribusi sistem produk dengan nilai dampak (Ryberg, 2013). Berdasarkan indikator dan tahapan *impact assessment* diatas dapat ditentukan menggunakan aplikasi SimaPro 8.5.2 dalam menganalisa dampak dari kegiatan proses produksi semen. Berikut Gambar 4.10 menampilkan *network* dari kegiatan proses produksi semen. *Network* kegiatan proses produksi semen menampilkan bahwa dalam kegiatannya dipengaruhi oleh proses eksploitasi dan produksi semen.



Gambar 4.10 Diagram Pohon Dampak *Carcinogenics* Proses Produksi Semen Tahap Normalisasi

Garis merah berpanah menunjukkan hubungan antar kegiatan. Dimana garis merah tebal menandakan besarnya kontribusi dampak terhadap lingkungan. Gambar 4.10 di atas merupakan salah satu contoh *network* (diagram pohon) dari salah satu dampak setelah tahap LCIA. Diagram pohon yang ada pada aplikasi SimaPro menunjukkan besar dampak dari tahap karakterisasi atau normalisasi. Untuk gambar diagram pohon selengkapnya dapat dilihat pada Lampiran.

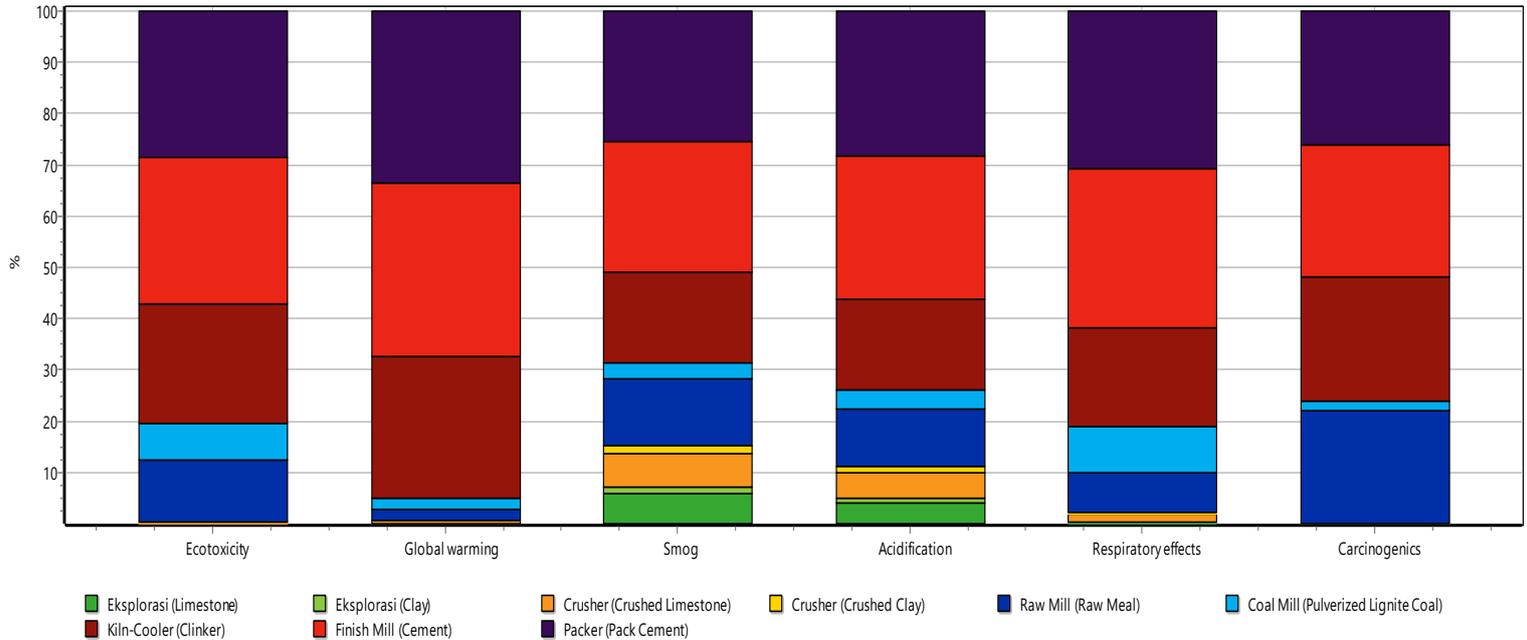
Penilaian dampak berfungsi untuk mengidentifikasi seberapa besar suatu proses berkontribusi terhadap dampak lingkungan yang dihasilkan dari suatu proses. Dari keseluruhan kegiatan pada proses produksi semen memberikan kontribusi dampak terhadap lingkungan. Berikut ini merupakan *impact assessment* (penilaian dampak) untuk tahap karakterisasi dari kegiatan proses eksploitasi dan produksi semen pada Tabel 4.29 dan Gambar 4.11.

1) *Characterization*

Setelah dilakukan penilaian dampak, masuk ke dalam tahap karakterisasi dari setiap dampak yang diakibatkan oleh proses eksploitasi dan produksi oleh aplikasi SimaPro. Pada tahap karakterisasi, setiap proses muncul nilai dampak yang dihitung secara otomatis oleh aplikasi SimaPro berdasarkan input *material*, bahan bakar, energi dan emisi. Dari Tabel 4.30 diketahui bahwa kegiatan eksploitasi batu kapur memberikan kontribusi dampak terbesar terhadap *smog formation* sebesar $7,36 \times 10^7$ kg O₃ eq, sedangkan kegiatan eksploitasi tanah liat memberikan kontribusi dampak terbesar terhadap *smog formation* juga sebesar $1,73 \times 10^7$ kg O₃ eq. Pada unit *crusher* memberikan kontribusi dampak terbesar terhadap *ecotoxicity* sebesar $8,39 \times 10^8$ CTUe (*limestone crusher*) dan $1,97 \times 10^8$ CTUe (*clay crusher*). Unit *raw mill* memberikan kontribusi dampak terbesar terhadap *ecotoxicity* sebesar $3,61 \times 10^{10}$ CTUe. Kemudian unit *coal mill* memberikan kontribusi dampak terbesar terhadap *ecotoxicity* sebesar $2,09 \times 10^{10}$ CTUe. Unit *kiln-cooler* memberikan kontribusi dampak terbesar terhadap *ecotoxicity* sebesar $6,99 \times 10^{10}$ CTUe. Unit *finish mill* memberikan kontribusi dampak terbesar terhadap *ecotoxicity* sebesar $8,52 \times 10^{10}$ CTUe. Kemudian unit *packer* memberikan kontribusi dampak terbesar terhadap *ecotoxicity* sebesar $8,52 \times 10^{10}$ CTUe.

Tabel 4.29 Akumulasi Dampak Tahap Karakterisasi Proses Eksploitasi dan Produksi Semen

Impact category	Unit	Total	Eksplorasi (Limestone)	Eksplorasi (Clay)	Crusher (Crushed Limestone)	Crusher (Crushed Clay)	Raw Mill (Raw Meal)	Coal Mill (Pulverized Lignite Coal)	Kiln-Cooler (Clinker)	Finish Mill (Cement)	Packer (Pack Cement)
Ecotoxicity	CTUe	1.71E+11	1.55E+07	3.63E+06	8.39E+08	1.97E+08	4.19E+09	2.09E+10	3.80E+10	5.33E+10	5.34E+10
Global warming	kg CO2 eq	3.47E+10	7.17E+06	1.68E+06	1.79E+08	4.21E+07	2.93E+08	7.90E+08	9.64E+09	1.19E+10	1.19E+10
Smog	kg O3 eq	1.05E+09	7.36E+07	1.73E+07	8.34E+07	1.96E+07	1.13E+08	3.79E+07	1.71E+08	2.69E+08	2.70E+08
Acidification	kg SO2 eq	6.84E+07	3.31E+06	7.76E+05	4.13E+06	9.69E+05	5.68E+06	3.05E+06	1.10E+07	1.97E+07	1.97E+07
Respiratory effects	kg PM2.5 eq	1.55E+07	5.08E+04	1.19E+04	3.05E+05	7.16E+04	5.52E+05	1.76E+06	2.79E+06	4.98E+06	5.00E+06
Carcinogenics	CTUh	2.35E+03	1.79E-01	4.21E-02	9.24E+00	2.17E+00	2.16E+02	2.39E+02	4.73E+02	7.05E+02	7.05E+02



Method: TRACI 2.1 V1.04 / US 2008 / Characterization
 Analyzing 1 p 'Eksplorasi dan Produksi Semen';

Sumber: SimaPro 8.5.2

2) Normalization

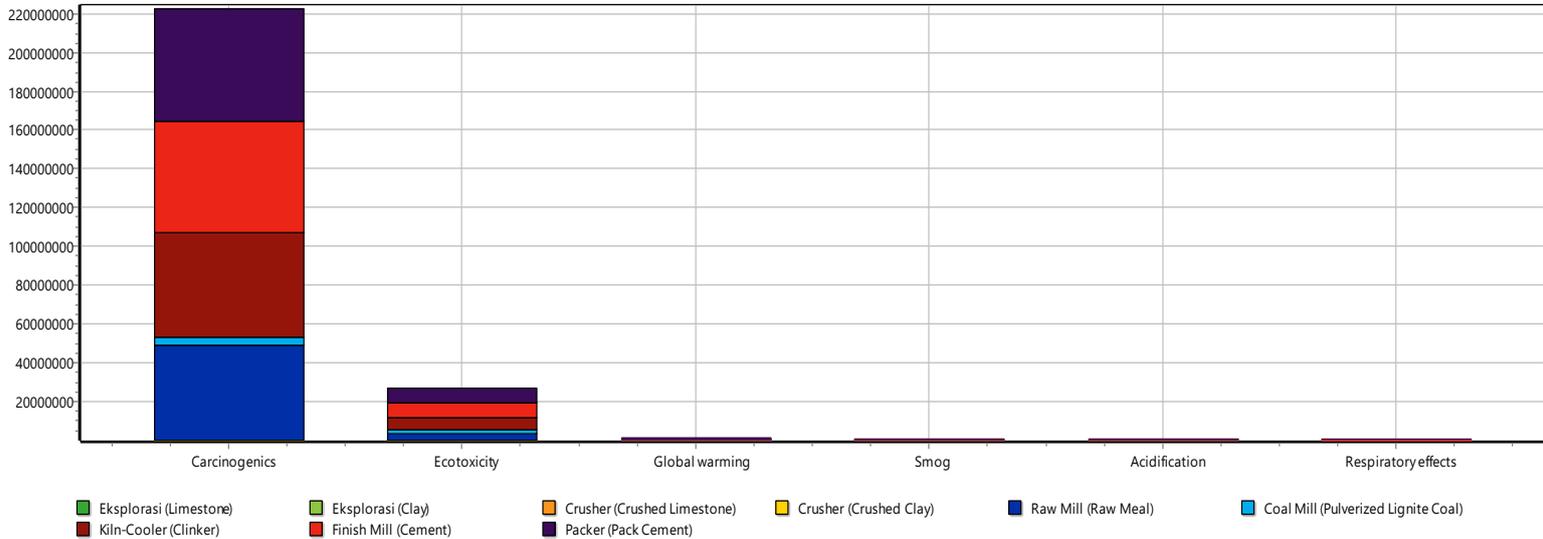
Dampak yang dihasilkan dari kegiatan proses eksploitasi dan produksi semen kemudian dikonversi ke dalam satuan yang sama pada tahap normalisasi. Tujuan dari penyetaraan satuan disini agar penilaian dampak (*impact assessment*) yang dihasilkan pada proses *running* SimaPro dapat dibandingkan satu sama lain. Pada tahap normalisasi ini, nilai yang keluar merupakan hasil kali antara nilai dampak pada karakterisasi dengan faktor normalisasi. Berikut merupakan penilaian dampak untuk tahap normalisasi pada proses eksploitasi dan produksi semen PT Semen Indonesia (Persero) Tbk. Pabrik Tuban pada Tabel 4.30 dan Gambar 4.12.

Dari Tabel 4.30 setelah dilakukan tahap normalisasi diketahui bahwa kegiatan eksploitasi batu kapur memberikan kontribusi dampak terbesar terhadap *smog formation* sebesar 52.864, sedangkan kegiatan eksploitasi tanah liat memberikan kontribusi dampak terbesar terhadap *smog formation* juga sebesar 12.400. Pada unit *crusher* memberikan kontribusi dampak terbesar terhadap *carcinogenics* sebesar 175.212 (*limestone crusher*) dan 41.099 (*clay crusher*). Unit *raw mill* memberikan kontribusi dampak terbesar terhadap *carcinogenics* sebesar 4.103.875. Kemudian unit *coal mill* memberikan kontribusi dampak terbesar terhadap *carcinogenics* sebesar 4.535.108. Unit *kiln-cooler* memberikan kontribusi dampak terbesar terhadap *carcinogenics* sebesar 8.971.191. Unit *finish mill* memberikan kontribusi dampak terbesar terhadap *ecotoxicity* sebesar 4.814.522. Kemudian unit *packer* memberikan kontribusi dampak terbesar terhadap *carcinogenics* sebesar 13.378.377.

Tabel 4.30 Akumulasi Dampak Tahap Normalisasi Proses Eksploitasi dan Produksi Semen

Impact category	Total	Eksplorasi (Limestone)	Eksplorasi (Clay)	Crusher (Crushed Limestone)	Crusher (Crushed Clay)	Raw Mill (Raw Meal)	Coal Mill (Pulverized Lignite Coal)	Kiln-Cooler (Clinker)	Finish Mill (Cement)	Packer (Pack Cement)
Carcinogenics	44.574.076	3.403	798	175.212	41.099	4.103.875	4.535.108	8.971.191	13.378.377	13.365.014
Ecotoxicity	15.430.755	1.398	328	75.769	17.773	378.365	1.886.941	3.435.352	4.814.522	4.820.307
Global warming	1.431.345	296	69	7.409	1.738	12.081	32.607	398.161	489.215	489.768
Smog	757.075	52.864	12.400	59.906	14.052	80.968	27.244	122.730	193.223	193.688
Acidification	752.742	36.400	8.538	45.497	10.672	62.488	33.589	121.454	216.726	217.377
Respiratory effects	640.330	2.095	491	12.581	2.951	22.767	72.745	114.913	205.487	206.300
Total		96.456	22.625	376.374	88.285	4.660.544	6.588.234	13.163.800	19.284.188	19.305.817

Sumber: Hasil Perhitungan



Method: TRACI 2.1 V1.04 / US 2008 / Normalization
 Analyzing 1 p 'Eksplorasi dan Produksi Semen';

Gambar 4.12 Diagram Normalisasi Penilaian Dampak Proses Eksploitasi dan Produksi Semen

4.3.4 Interpretasi Data

Dampak yang muncul dari setiap proses memiliki besaran yang berbeda tergantung pada *input material*, bahan bakar, energi yang digunakan, emisi yang dikeluarkan serta proses produksi yang terjadi. Berbagai jenis dampak yang muncul perlu dianalisis lebih dalam untuk menafsirkan data pada aplikasi SimaPro dengan data serta proses eksisting pada proses eksploitasi dan produksi semen. Tujuan hal ini dilakukan untuk mengetahui titik *hotspot* atau titik dengan dampak terbesar dari serangkaian proses eksploitasi dan produksi semen di PT Semen Indonesia (Persero) Tbk. Pabrik Tuban. Berikut merupakan analisis tiap dampak yang ditimbulkan pada proses produksi semen.

1) Analisis *Hotspot* Proses dan *Hotspot* Dampak

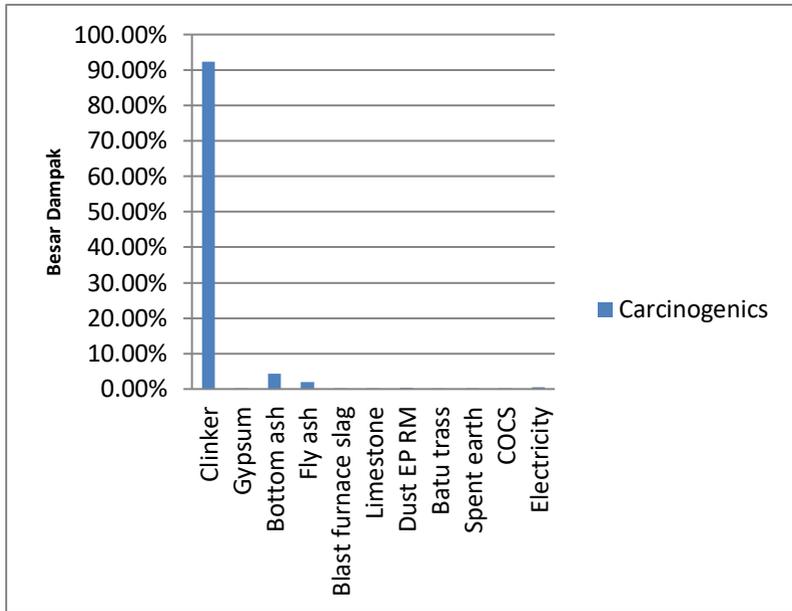
Hotspot proses merupakan titik dengan dampak terbesar dari suatu sistem proses. Dampak terbesar ditentukan berdasarkan hasil penilaian dampak (*Life Cycle Impact Assessment*) dan input data (*Life Cycle Inventory*) baik berupa bahan baku, bahan bakar, energi listrik, serta emisi pada tahap sebelumnya. Dari tahap LCIA dapat diketahui kontribusi dampak yang dihasilkan dari proses yang ada pada PT Semen Indonesia (Persero) Tbk. Pabrik Tuban. Berdasarkan Tabel 4.30, dapat dilihat bahwa titik *hotspot* proses berada pada proses *finish mill*. Unit *finish mill* memberikan kontribusi dampak sebesar 19.305.817. Dimana nilai ini merupakan hasil dari perhitungan akhir *midpoint* pada aplikasi SimaPro 8.5.2. Apabila diurutkan berdasarkan kontribusi besar dampaknya dari proses eksploitasi hingga proses produksi yaitu berurutan: unit *finish mill* (19.305.817), unit *packer* (19.284.188), unit *kiln-cooler* (13.163.800), unit *coal mill* (6.588.234), unit *raw mill* (4.660.544), unit *limestone crusher* (376.374), unit *clay crusher* (88.285), unit eksploitasi batu kapur (96.456), dan eksploitasi tanah liat (22.625).

Hotspot dampak merupakan titik dengan dampak terbesar dalam suatu proses. Pada penelitian ini, dianalisa beberapa dampak dari *hotspot* proses sesuai dengan lingkup penelitian. Dampak yang dianalisa meliputi *ecotoxicity*, *global warming*, *smog*, *acidification*, *respiratory effects*, dan *carcinogenics*. Besar nilai yang keluar dari setiap dampak berbeda antara satu dengan yang lainnya. Hal ini tergantung pada proses produksi yang ada pada unit tersebut. Karena proses antara satu unit dengan yang lainnya berbeda,

maka akan ada perbedaan nilai dampak yang dihasilkan pada setiap proses produksi semen. Nilai dampak dipengaruhi oleh input data pada tahap LCI. Input data berupa jenis bahan baku yang digunakan, jenis bahan bakar, jenis energi, serta emisi yang dihasilkan beserta dengan kuantitasnya. Berdasarkan besar dampak pada tahap normalisasi, dampak terbesar dari unit *finish mill* yaitu *carcinogenics*. Nilai pada tahap normalisasi dijadikan acuan untuk memilih jenis dampak yang memiliki dampak terbesar. Karena pada tahap karakterisasi, masing masing dampak memiliki satuan yang berbeda. Sehingga besar dampak tidak dapat dibandingkan antara satu dengan yang lainnya. Pada tahap normalisasi dilakukan penyetaraan nilai dari semua jenis dampak. Nilai yang didapat dari tahap normalisasi merupakan hasil dari nilai pada tahap karakterisasi yang dibagi dengan faktor normalisasi. Faktor normalisasi ini dapat dilihat pada Tabel 4.28.

Carcinogenics

Karsinogenik merupakan hal-hal yang dapat menyebabkan kanker. Pada umumnya, kanker timbul karena paparan terhadap suatu karsinogen secara berkali-kali dan aditif pada dosis tertentu, tetapi pada keadaan tertentu dapat juga timbul dari dosis tunggal karsinogen (Kartawiguna, 2011). Pada unit *finish mill* terjadi proses pencampuran, penggilingan, dan penghalusan. Selain itu di tahapan ini ada penambahan material ketiga untuk menentukan jenis semen yang akan di proses. Material yang digunakan berupa klinker, gypsum, *spent earth*, *bottom ash*, *fly ash*, *crude oil contaminated soil* (COCS), batu trass, *dust electrostatic presipitator raw mill*, *blast furnace slag*, dan batu kapur. Kemudian energi yang digunakan yaitu jenis energi listrik. Untuk mengetahui sumber utama penyebab dampak *carcinogenics*, maka dilakukan *running data* per proses pada aplikasi SimaPro. Hasil *running* aplikasi SimaPro dapat dilihat pada Gambar 4.13.



Gambar 4.13 Diagram Kontribusi Material dan Energi Terhadap Dampak *Carcinogenics*

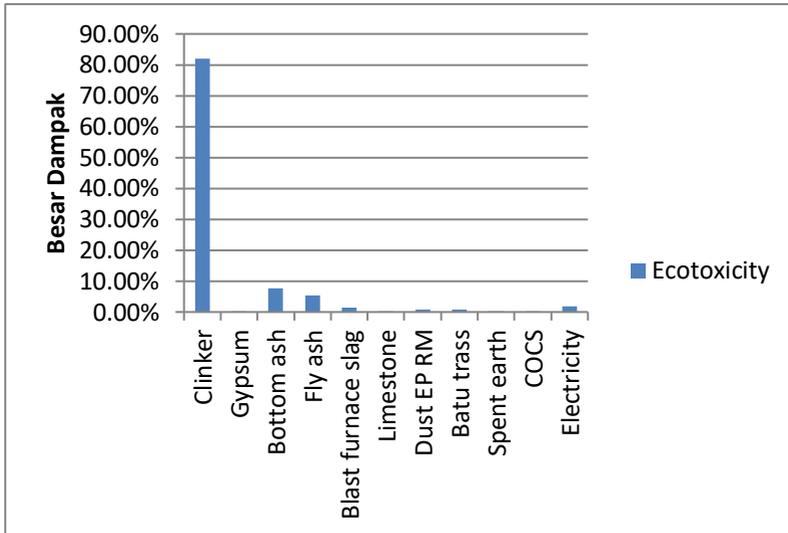
Sumber: Hasil Perhitungan

Dari diagram di atas, besar kontribusi material dan energi terhadap dampak *carcinogenics* yaitu *clinker* (92,41%), *gypsum* (0,01%), *bottom ash* (4,40%), *fly ash* (1,99%), *blast furnace slag* (0,17%), *limestone* (0,005%), *dust EP RM* (0,28%), *batu trass* (0,20%), *spent earth* (0,0003%), *COCS* (0,003%), dan *electricity* (0,53%). Berdasarkan data pada Gambar 4.13, *clinker* mempunyai kontribusi dampak terbesar terhadap *carcinogenics*. Berdasarkan *Material Safety Data Sheet* (MSDS) (2017), klinker termasuk ke dalam bahan berbahaya oleh OSHA *Hazard Communication Standard*. Dimana klinker mempunyai kandungan senyawa kalsium, senyawa kalsium silikat, dan senyawa kalsium lainnya yang mengandung Fe dan Al. Klinker berperan sebagai karsinogen melalui inhalasi pernafasan dan dermal.

Ecotoxicity

Ekotoksitas merujuk pada potensi dari komponen biologi, kimia, atau fisika yang berpengaruh terhadap ekosistem dengan

konsentrasi yang dapat mengganggu keseimbangan lingkungan (EPRI, 2010). Berdasarkan penggunaan material dan energi yang digunakan pada unit *finish mill*, belum dapat ditentukan material/energi yang menjadi sumber utama penyebab dampak *ecotoxicity*. Untuk mengetahui sumber utama penyebab dampak *carcinogenics*, maka dilakukan *running data* per proses pada aplikasi SimaPro. Hasil *running* aplikasi SimaPro dapat dilihat pada Gambar 4.14.



Gambar 4.14 Diagram Kontribusi Material dan Energi Terhadap Dampak *Ecotoxicity*

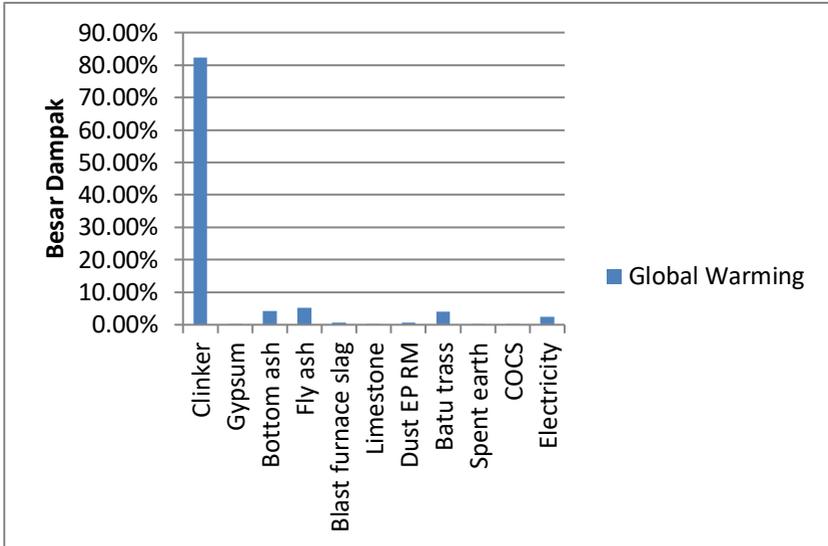
Sumber: Hasil Perhitungan

Dari diagram di atas, besar kontribusi material dan energi terhadap dampak *ecotoxicity* yaitu *clinker* (82,07%), *gypsum* (0,04%), *bottom ash* (7,65%), *fly ash* (5,44%), *blast furnace slag* (1,43%), *limestone* (0,02%), *dust EP RM* (0,77%), *batu trass* (0,82%), *spent earth* (0,001%), *COCS* (0,02%), dan *electricity* (1,74%). Berdasarkan data pada Gambar 4.14, *clinker* mempunyai kontribusi dampak terbesar terhadap *ecotoxicity*. *Ecotoxicity* pada *clinker* disebabkan karena kandungan senyawa anorganik serta kandungan logam berat. Sehingga apabila senyawa anorganik dan logam berat tersebut lepas ke lingkungan akan menyebabkan

dampak *ecotoxicity* (Chen et al., 2010). Kandungan klinker berupa SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , K_2O , dan LSF (Farhan, 2016). *Bottom ash* dan *fly ash*, yang termasuk ke dalam jenis coal ash mengandung arsenik, timbal, merkuri, cadmium, selenium, aluminium, antimony, barium, berilium, boron, chlorine, cobalt, manganese, molibdenium, nikel, talium, vanadium, dan zinc (US EPA, 2007). Dimana logam berat ini mempunyai potensi menyebabkan gangguan pada ekosistem lingkungan dengan waktu paparan yang panjang.

Global Warming

Global warming atau pemanasan global adalah suatu bentuk ketidakseimbangan ekosistem di bumi yang diakibatkan oleh peningkatan suhu rata-rata permukaan bumi. Selama kurang lebih 100 tahun terakhir, suhu rata-rata permukaan bumi meningkat sebesar $0,74\text{ }^\circ\text{C}$ (Utina, 2015). Penyebab utama pemanasan ini adalah pembakaran bahan bakar fosil yang melepas gas CO_2 dan yang lainnya ke atmosfer (Sulistyono, 2012). Berdasarkan penggunaan material dan energi yang digunakan pada unit *finish mill*, belum dapat ditentukan material/energi yang menjadi sumber utama penyebab dampak *global warming*. Untuk mengetahui sumber utama penyebab dampak *global warming*, maka dilakukan *running data* per proses pada aplikasi SimaPro. Hasil *running* aplikasi SimaPro dapat dilihat pada Gambar 4.15.



Gambar 4.15 Diagram Kontribusi Material dan Energi Terhadap Dampak *Global Warming*

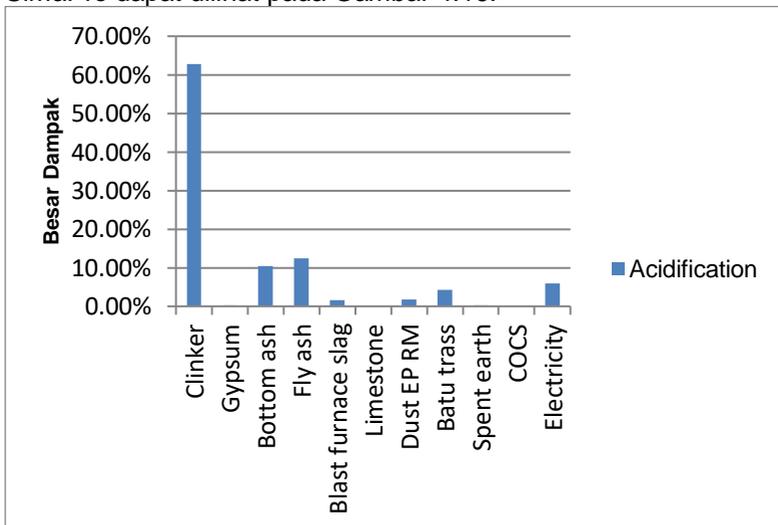
Sumber: Hasil Perhitungan

Dari diagram di atas, besar kontribusi material dan energi terhadap dampak *global warming* yaitu *clinker* (82,24%), *gypsum* (0,04%), *bottom ash* (4,18%), *fly ash* (5,29%), *blast furnace slag* (0,71%), *limestone* (0,03%), *dust EP RM* (0,75%), batu trass (4,11%), *spent earth* (0,10%), COCS (0,06%), dan *electricity* (2,50%). Berdasarkan diagram pada Gambar 4.15, klinker mempunyai kontribusi terbesar terhadap dampak *global warming*. Karena pada saat produksi klinker, dibutuhkan pemanasan dengan suhu tinggi dari pembakaran bahan bakar serta batubara. Selain itu, dalam proses pembentukannya terjadi kalsinasi dari batu kapur yang melepaskan CO₂ dalam jumlah besar (Atmaja, 2015). Sama halnya dengan material *bottom ash* dan *fly ash* yang memberikan kontribusi dampak terhadap *global warming* meskipun tidak sebesar klinker. Penyebab utama dikarenakan *bottom ash* dan *fly ash* dihasilkan dari pembakaran batubara, dimana di dalam proses pembakaran dilepaskan gas CO₂ ke atmosfer, sehingga berpengaruh terhadap *global warming*. Abu terbang (*fly ash*) didefinisikan sebagai butiran halus hasil residu pembakaran batubara atau bubuk batubara. Abu dasar atau lebih dikenal

dengan *bottom ash* adalah sisa proses pembakaran batubara pada pembangkit tenaga listrik yang mempunyai ukuran partikel lebih besar dan lebih berat dari pada *fly ash*, sehingga *bottom ash* akan jatuh pada dasar boiler (Kinasti, 2018).

Acidification

Asidifikasi merupakan keadaan lingkungan dengan tingkat derajat keasaman (pH) berada lebih dari 7. Penyebab dari berubahnya kondisi lingkungan berada pada level asam disebabkan karena beberapa senyawa kimia yang terserap ke dalam air/tanah (Stillman dan Adam, 2015). Polusi udara yang dihasilkan dari proses pembakaran pada industri maupun kendaraan berupa CO₂, SO₂, dan NO₂ (Luthfi et al., 2017). Senyawa tersebut secara alami akan mengalami reaksi dengan air, sehingga dihasilkan ion hidrogen yang menyebabkan peningkatan asidifikasi. Berdasarkan penggunaan material dan energi yang digunakan pada unit *finish mill*, belum dapat ditentukan material/energi yang menjadi sumber utama penyebab dampak *acidification*. Untuk mengetahui sumber utama penyebab dampak *acidification*, maka dilakukan *running data* per proses pada aplikasi SimaPro. Hasil *running* aplikasi SimaPro dapat dilihat pada Gambar 4.16.



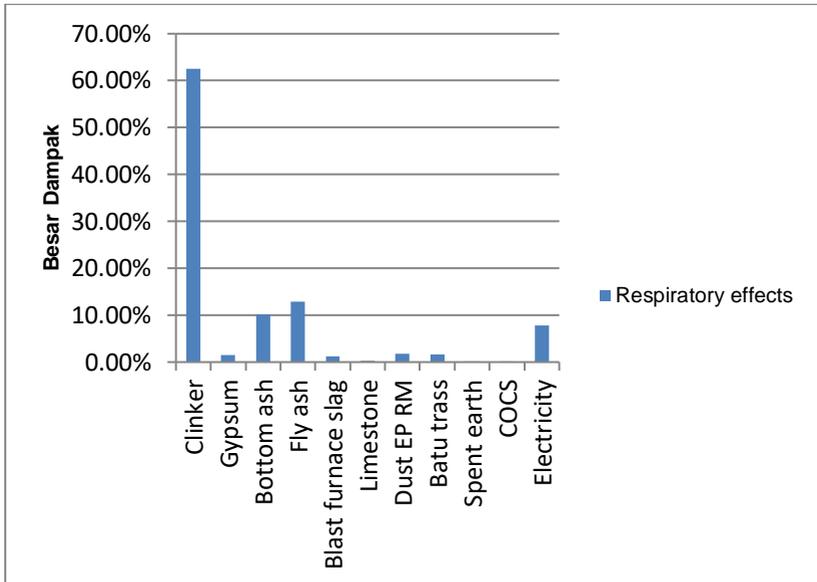
Gambar 4.16 Diagram Kontribusi Material dan Energi Terhadap Dampak *Acidification*

Sumber: Hasil Perhitungan

Dari diagram di atas, besar kontribusi material dan energi terhadap dampak *acidification* yaitu *clinker* (62,87%), *gypsum* (0,20%), *bottom ash* (10,49%), *fly ash* (12,40%), *blast furnace slag* (1,61%), *limestone* (0,16%), *dust EP RM* (1,75%), batu trass (4,23%), *spent earth* (0,30%), COCS (0,12%), dan *electricity* (5,88%). Berdasarkan data di atas, *clinker* menjadi penyumbang kontribusi terbesar terhadap dampak asidifikasi. Karena pada saat produksi klinker, dibutuhkan pemanasan dengan suhu tinggi dari pembakaran bahan bakar serta batubara. Kemudian dari proses kalsinasi batu kapur juga melepaskan CO₂ dalam jumlah besar (Atmaja, 2015). Total dihasilkan CO₂ dari proses pembakaran bahan bakar dan proses kalsinasi sebesar 8125716,36 ton CO₂. Dengan beban emisi CO₂ sebesar ini, tentu akan menimbulkan dampak asidifikasi ke lingkungan. Penyumbang kontribusi terhadap dampak asidifikasi selanjutnya adalah *bottom ash* dan *fly ash* menurut hasil *running* pada SimaPro. Apabila dianalisis lebih dalam, *bottom ash* dan *fly ash* dihasilkan dari pembakaran batubara pada pembangkit listrik, dimana di dalam proses pembakaran dilepaskan gas CO₂ ke atmosfer (Kinasti, 2018). Emisi CO₂ tersebut apabila bereaksi dengan air akan menyebabkan peningkatan pH air (Stillman dan Adam, 2015). Sehingga berpengaruh terhadap dampak asidifikasi perairan maupun tanah.

Respiratoy Effects

Respiratory effects polusi udara disebabkan oleh polutan yang ada pada udara. Polutan yang dapat menyebabkan gangguan pada pernapasan pada umumnya yaitu partikulat atau debu. Seberapa parah gangguan pernapasan yang disebabkan tergantung pada jenis polutan, konsentrasi, dan seberapa lama waktu paparan terhadap polutan tersebut (Fortoul, 2014). Selain partikulat, polutan lain yang dapat berperan menyebabkan gangguan pernapasan yaitu ozon, NO_x, serta polutan dengan kandungan logam (Yang dan Omaye, 2009). Berdasarkan penggunaan material dan energi yang digunakan pada unit *finish mill*, belum dapat ditentukan material/energi yang menjadi sumber utama penyebab dampak *respiratory effects*. Untuk mengetahui sumber utama penyebab dampak *respiratory effects*, maka dilakukan *running* data per proses pada aplikasi SimaPro. Hasil *running* aplikasi SimaPro dapat dilihat pada Gambar 4.17.



Gambar 4.17 Diagram Kontribusi Material dan Energi Terhadap Dampak *Respiratory Effects*

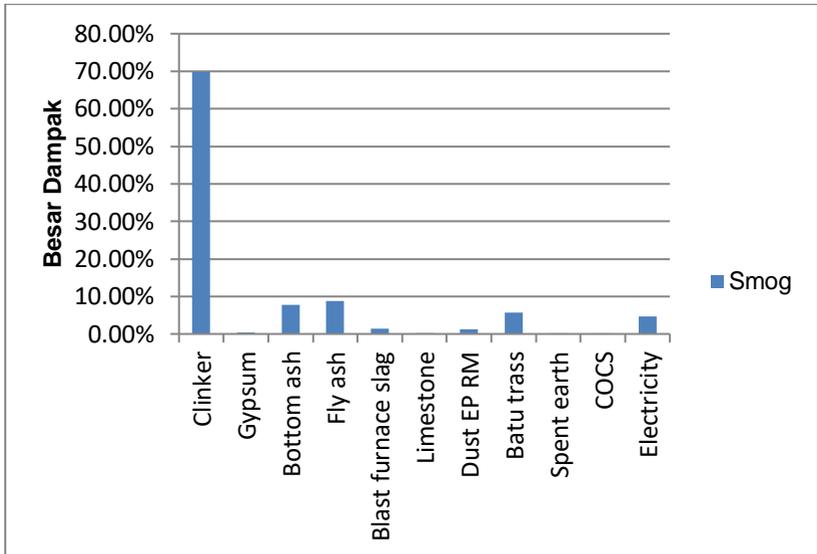
Sumber: Hasil Perhitungan

Dari diagram di atas, besar kontribusi material dan energi terhadap dampak *respiratory effects* yaitu *clinker* (62,55%), *gypsum* (1,45%), *bottom ash* (10,19%), *fly ash* (12,88%), *blast furnace slag* (1,26%), *limestone* (0,26%), *dust EP RM* (1,82%), batu trass (1,69%), *spent earth* (0,09%), COCS (0,03%), dan *electricity* (7,79%). *Clinker* mempunyai kontribusi terbesar dalam menyebabkan gangguan pernapasan. Dengan bentuknya yang kering dan mudah terbawa oleh udara, maka *clinker* dapat dengan mudah masuk ke dalam sistem pernapasan manusia. Menurut Material Safety Data Sheet (2017), *clinker* berpotensi menyebabkan gangguan kesehatan terhadap paparan melalui jalur inhalasi, kontak mata dan kulit. Bahaya kesehatan akibat paparan melalui inhalasi yaitu dapat menyebabkan iritasi pada trakea, emfisema, bronkitis akut, serta gangguan pada paru-paru. Dengan jumlah produksi *clinker* sebesar 9978633.29 ton dalam waktu satu tahun, memberikan kontribusi terbesar terhadap *respiratory effects* diantara material/energi lainnya. *Bottom ash*

dan *fly ash*, yang termasuk ke dalam jenis *coal ash* mengandung arsenik, timbal, merkuri, cadmium, selenium, aluminium, antimony, barium, berilium, boron, klorin, cobalt, manganese, molibdenium, nikel, talium, vanadium, dan zinc (US EPA, 2007). Semua kandungan logam tersebut dapat menjadi beracun, terutama dengan paparan yang berkepanjangan. Kanker, penyakit paru-paru, gangguan pernapasan, gangguan ginjal, masalah reproduksi, cacat lahir, gangguan sistem saraf, dan masalah pada perilaku. Debu pada sisa pembakaran batubara mempunyai ukuran bervariasi, mulai dari pada rentang 0,5 sampai dengan 300 µm. Dengan ukuran seperti itu, akan dengan mudah masuk ke dalam sistem pernapasan yang dapat menyebabkan gangguan kesehatan (Shrivastava *et al.*, 2015).

Smog

Smog merupakan campuran dari polutan yang terbentuk ketika nitrogen oksida dan *volatile organic compound* (VOC) bereaksi dengan sinar matahari, menciptakan kabut berwarna coklat (EPA, 2004). Dua polutan primer yang menjadi penyebab utama terbentuknya smog yaitu nitrogen oksida dan VOC, ketika bereaksi dengan sinar matahari dapat menghasilkan polutan sekunder. Contoh dari senyawa VOC yaitu *benzene*, CFC, *chlorocarbons*, bahan bakar fosil, *methylene chloride*, MTBE, dll. Banyak senyawa kimia berbahaya yang terbentuk dari reaksi antara polutan primer dan sinar matahari, salah satunya yaitu *peroxyacetyl nitrate* (PAN). Polutan sekunder lainnya yang mempunyai dampak serius ketika dihasilkan yaitu *ground level ozone*. *Ground level ozone* merupakan komponen utama dari *photochemical smog*, yang menyebabkan masalah pencemaran udara pada negara berkembang selama beberapa dekade terakhir (An *et al.*, 2008). Berdasarkan penggunaan material dan energi yang digunakan pada unit *finish mill*, belum dapat ditentukan material/energi yang menjadi sumber utama penyebab dampak *smog*. Untuk mengetahui sumber utama penyebab dampak *smog*, maka dilakukan *running data* per proses pada aplikasi SimaPro. Hasil *running* aplikasi SimaPro dapat dilihat pada Gambar 4.17.



Gambar 4.18 Diagram Kontribusi Material dan Energi Terhadap Dampak Smog

Sumber: Hasil Perhitungan

Dari diagram di atas, besar kontribusi material dan energi terhadap dampak smog yaitu *clinker* (69,76%), *gypsum* (0,33%), *bottom ash* (7,66%), *fly ash* (8,79%), *blast furnace slag* (1,43%), *limestone* (0,29%), *dust EP RM* (1,24%), *batu trass* (5,71%), *spent earth* (0,11%), *COCS* (0,05%), dan *electricity* (4,62%). Berdasarkan data di atas, *clinker* memberikan kontribusi dampak terbesar diantara material lainnya. Untuk memproduksi *clinker*, dibutuhkan proses pembakaran dengan suhu tinggi. Pembakaran tersebut salah satunya menggunakan batubara. Jumlah batubara yang digunakan pada proses pembakaran mencapai 2029825.92 ton per tahun. Pembakaran batubara menghasilkan emisi SO_2 , NO_x , TSP dan PM (Zhao *et al.*, 2008). Dengan pembakaran batubara dalam jumlah besar, tentu menghasilkan emisi dari pembakaran tersebut salah satunya berupa NO_x . Karena salah satu polutan primer yang menyebabkan terbentuknya smog adalah NO_x , maka kontribusi *clinker* pada dampak smog menjadi yang terbesar diantara material lainnya. Selain itu, produk samping yang dihasilkan dari pembakaran batubara berupa *bottom ash* dan *fly*

ash, maka material ini juga mempunyai kontribusi yang cukup terhadap dampak *smog*. Kontribusi *clinker* lebih besar daripada *fly ash* dan *bottom ash* dikarenakan jumlah produksi *clinker* lebih besar daripada jumlah *bottom ash* dan *fly ash*.

Rencana Program lingkungan

Berdasarkan hasil analisis terhadap unit *finish mill*, didapatkan bahwa *clinker* merupakan penyebab utama besarnya dampak lingkungan yang diakibatkan oleh unit *finish mill*. Apabila dilihat dari sumbernya, *clinker* diproduksi oleh unit *kiln*. Maka program alternatif perbaikan akan fokus pada kegiatan di unit *kiln*. Namun, alternatif program lingkungan juga akan dilakukan pada unit lain. Sehingga dibuat skenario program yang akan *dirunning* kembali pada aplikasi SimaPro.

2) Validasi Data

Model merupakan representatif dari sistem nyata, bukan berarti semua variable dari sistem nyata ditransformasikan ke model karena yang berpartisipasi adalah variable yang relevan dengan permasalahan dari sistem nyata yang akan dipecahkan. Validasi adalah langkah untuk meyakinkan bahwa model bersifat seperti sistem nyatanya. Tujuan validasi yaitu menghasilkan model yang *representative* terhadap perilaku sistem nyatanya sedekat mungkin untuk dapat digunakan sebagai substitusi dari sistem nyata dalam melakukan eksperimen tanpa mengganggu jalannya sistem. Kemudian validasi juga digunakan untuk meningkatkan kredibilitas model, sehingga model dapat digunakan oleh para manajer dan para pengambil keputusan lainnya (Law dan Kelton, 1991). Pada prinsipnya tidak ada model yang memiliki validitas 100%, akan tetapi suatu model hanya valid untuk satu atau beberapa set *experimental* saja. Untuk melakukan validasi untuk set *experimental* yang banyak, maka akan menghabiskan biaya yang besar pula (Sargent, 2013). terdapat 3 tahap yang dilakukan untuk memperkuat perhitungan dan fakta pada tahap interpretasi data LCA: *completeness check*, *sensitivity check*, dan *consistency check*.

Completeness check

Completeness check merupakan prosedur yang dilakukan secara kualitatif, dimana prosedur ini fokus pada informasi yang didapatkan pada tahap inventori data. Pada banyak penelitian

mengenai LCA, ada beberapa kasus dimana data yang didapatkan di tahap LCI masih kurang bahkan tidak tersedia. Apabila data tersebut tidak dapat didapatkan, maka akan tercipta data *gab*. Oleh karena itu, dibutuhkan suatu pendekatan untuk mengetahui nilai dari data *gab* tersebut, atau apabila hal tersebut tidak dapat dilakukan maka *goal* dan *scope* LCA harus disesuaikan dengan data yang ada.

Consistency check

Consistency check juga merupakan prosedur yang dilakukan secara kualitatif. Prosedur ini bertujuan untuk memastikan bahwa metode, prosedur, dan pengolahan data dilakukan dengan cara yang konsisten dari awal hingga akhir. Subjek yang disorot dalam prosedur consistency check meliputi: daerah, batasan sistem, metode alokasi, perbedaan antara awal dan akhir proses, valuasi/pembobotan.

Sensitivity check

Sensitivity check melibatkan proses yang sistematis untuk memperkirakan dampak dari variasi parameter terhadap capaian atau tujuan penelitian. Hal ini dilaksanakan untuk memperkuat keyakinan pada data yang diolah dengan menggunakan model/aplikasi. *Sensitivity check* melibatkan serangkaian metode untuk mengkuantifikasi ketidakpastian dalam output data yang dihubungkan dengan ketidakpastian dalam input data (Justin et al., 2016). Dengan kata lain *sensitivity check* dilakukan untuk menganalisis seberapa sensitive suatu model terhadap fluktuasi pada parameter dan data yang digunakan. Hasil dari *sensitivity check* mempunyai implikasi penting pada banyak tahap, seperti mengidentifikasi error pada model itu sendiri, menginformasikan kalibrasi model, dan mengetahui hubungan antara input dan output model. Untuk variasi input pada model dapat menggunakan nilai 5% atau 10%. Dari hasil analisis LCA pada tahap interpretasi data, didapatkan unit *finish mill* sebagai titik hotspot proses. Variasi data akan dilakukan dengan cara menaikkan material, energi, dan emisi sebesar 10% dan menurunkannya sebesar 10%. Hasil perbandingan dapat dilihat pada Tabel 4.31.

Tabel 4.31 Penambahan dan Pengurangan Material, Energi, dan Emisi Unit *Finish Mill*

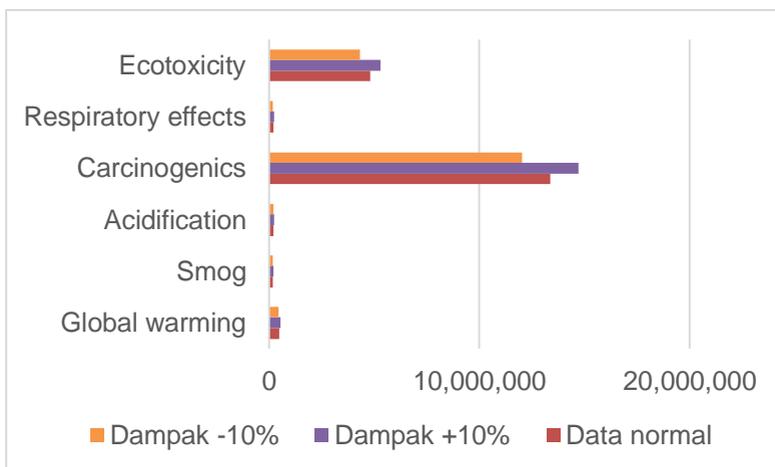
Material	Jumlah (ton)			Energi	Jumlah (ton)			Emisi	Jumlah (ton)		
	Normal	+10%	-10%		Normal	+10%	-10%		Normal	+10%	-10%
Klinker	9.978.633,3	10.976.496,6	8.980.770,0	Listrik	407.183.163,7	447.901.480,0	366.464.847,3	PM	20,1	22,1	18,1
Gypsum	467.066,7	513.773,3	420.360,0								
Spent Earth	7.675,0	8.442,5	6.907,5								
Bottom Ash	156.439,0	172.082,9	140.795,1								
COcs	28.072,0	30.879,2	25.264,8								
Fly Ash	127.745,2	140.519,8	114.970,7								
Batu Trass	724.258,3	796.684,1	651.832,5								
Dust EP RM	18.042,6	19.846,8	16.238,3								
Blast Furnace Slag	304.793,0	335.272,3	274.313,7								
Batu Kapur	582.858,1	641.143,9	524.572,3								

Sumber: Hasil Perhitungan

Jumlah material, energi serta emisi yang sudah ditambah dan dikurangi sebesar 10% kemudian dilakukan *running* kembali menggunakan SimaPro. Hasil *running* dapat dilihat pada Tabel 4.32.

Tabel 4.32 Hasil Penilaian Dampak

Kategori Dampak	Besar Dampak		
	Normal	+10%	-10%
Global warming	489.215	538.137	440.294
Smog	193.223	212.546	173.901
Acidification	216.726	238.399	195.054
Carcinogenics	13.378.377	14.716.215	12.040.539
Respiratory effects	205.487	226.036	184.939
Ecotoxicity	4.814.522	5.295.974	4.333.070



Sumber: SimaPro 8.5.2

Gambar 4.19 Diagram Hasil Penilaian Dampak pada *Sensitivity Check*

Dampak *global warming* pada kondisi normal pada unit *finish mill* menghasilkan nilai 489.215; (+) 10% memiliki nilai 538.137; dan (-) 10% dengan nilai 440.294. Maka deviasi pada masing-masing variasi data sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{Deviasi (+) 10\%} &= \text{Dampak saat (+)10\%} - \text{Data normal} \\ &= 538.137 - 489.215 \\ &= 48.922 \end{aligned}$$

$$\text{Deviasi (-) 10\%} = \text{Data normal} - \text{Dampak saat (-)10\%}$$

$$= 512.574,3 - 461.316,9$$

$$= 51.257,4$$

Dengan penambahan dan pengurangan material, energi, emisi menghasilkan deviasi pada dampak *global warming* sebesar:

$$\text{Deviasi (+) 10\%} \pm \text{Deviasi (-) 10\%} = 51.257,4 \pm 51.257,4$$

$$= \pm 0,00000$$

Berikut data deviasi selengkapnya pada Tabel 4.33

Tabel 4.33 Data Deviasi Per Kategori Dampak

Kategori Dampak	Deviasi	%Deviasi
Global warming	0,00000000	0,000000
Smog	0,00000005	0,000005
Acidification	0,00000000	0,000000
Carcinogenics	0,00000000	0,000000
Respiratory effects	0,00000005	0,000005
Ecotoxicity	0,00000002	0,000002

Sumber: Hasil Perhitungan

Berdasarkan Tabel 4.33, hasil *sensitivity check* dengan cara penambahan dan pengurangan data material, energi, dan emisi sebesar 10% menghasilkan perubahan pada penilaian dampak sebesar 10% dengan deviasi terbesar $\pm 0,000005$. Jadi data yang diolah di dalam aplikasi SimaPro sensitif.

3) Alternatif Program Lingkungan

Pemilihan alternatif program lingkungan dilakukan untuk mengurangi dampak lingkungan dari proses eksploitasi dan produksi semen. Dasar pemilihan program lingkungan ini berdasarkan pada analisis LCA. Hasil LCA proses eksploitasi dan produksi semen menunjukkan bahwa unit *kiln* menjadi fokus dari program lingkungan. Berikut ini merupakan beberapa pilihan alternatif program lingkungan:

Tabel 4.34 Program Lingkungan

No	Program Lingkungan	Unit	Parameter
1	Pengurangan penggunaan batubara dengan cara substitusi bahan bakar alternatif	Kiln	Batubara
			RDF
2	Penurunan <i>Specific Heat Consumption</i> (SHC)	Kiln	Batubara
3	Penggunaan <i>Efficient Coal Separator</i>	Kiln	Listrik
4	Kiln <i>Shell Heat Loss Reduction (Improved Refractories)</i>	Kiln	Batubara
5	Pengurangan penggunaan batubara dengan cara substitusi bahan bakar alternatif	Kiln	Batubara
			RDF
6	Pemanfaatan Motor Efisiensi Tinggi	Coal Mill	Listrik
7	Pemasangan Inverter untuk Penghematan Listrik	Finish Mill	Listrik
8	Kiln <i>Shell Heat Loss Reduction (Improved Refractories)</i>	Kiln	Batubara
9	<i>Adjustable Speed Drive</i> untuk <i>Kiln Fan</i>	Kiln	Listrik
10	Pemanfaatan Motor Efisiensi Tinggi	Coal Mill	Listrik
11	Pemasangan Inverter untuk Penghematan Listrik	Finish Mill	Listrik
12	Modifikasi Geometri <i>Top Cyclone</i>	Kiln	PM

a) Program Lingkungan Berdasarkan *Hotspot* Dampak

Titik *hotspot* dampak berdasarkan analisis LCA yaitu dampak *carcinogenics*. Potensi dampak *carinogenics* pada unit kiln berasal dari penggunaan batubara sebagai bahan bakar utama pembakaran untuk proses pembentukan klinker yang membutuhkan suhu tinggi. Berikut ini merupakan alternatif perbaikan lingkungan untuk menurunkan dampak *carcinogenics*:

Pengurangan penggunaan batubara dengan cara substitusi bahan bakar alternatif

Mengurangi jumlah batubara sebesar 10% dan diganti dengan *Refused Derive Fuel* (RDF) yang mempunyai nilai kalor hampir sama dengan batubara. Nilai kalor batubara sebesar 0,000018

TJ/kg (Permen LH 12 Tahun 2012). Sedangkan RDF memiliki nilai kalor sebesar 0,000022 TJ/kg (Tsiamis dan Marco, 2016).

Penurunan *Specific Heat Consumption* (SHC)

Dengan kadar air yang tinggi pada *fine coal*, yaitu di kisaran 15-21%, maka pembakaran batubara di *kiln* maupun kalsiner menjadi terlambat atau waktu terbakarnya menjadi lebih lama. Energi panas yang tersedia akan digunakan lebih dulu untuk menguapkan air dari batubara. Untuk menurunkan SHC, dilakukan:

1. Membuat kestabilan kualitas *raw material*, *fine coal*, dan memperbaiki *coal feeder*. Hal ini sangat diperlukan agar operasi dapat berjalan dengan normal dan kapasitas desain tercapai.
2. Penambahan *coal predryer* untuk mengurangi kadar air batubara sebelum masuk ke *coal mill* sehingga kapasitas *coal mill* menjadi sesuai desain dan menghasilkan *fincoal* dengan kualitas yang baik.

Dengan adanya program ini, konsumsi batubara dapat dihemat sebesar 4% (Audit Energi ISBI, 2018).

Penggunaan *Efficient Coal Separator*

Pemasangan *coal separator* untuk persiapan bahan bakar batubara yang akan digunakan di burner. Dalam sistem tertutup, partikel batubara yang lebih besar terpisah dari gas serta partikel batubara halus di separator. Terdapat *classifier* statis yang berfungsi untuk membedakan bentuk geometri batubara sehingga batubara yang masuk ke dalam burner mempunyai ukuran partikel seragam. Batubara yang tidak sesuai dengan ukuran yang diinginkan akan dikembalikan lagi ke dalam *crusher* batubara untuk dihaluskan. Hal ini dapat meningkatkan kualitas serta efisiensi pembakaran batubara di dalam *burner kiln*. Dengan penggunaan *coal separator* dapat menghemat penggunaan listrik sebesar 0,26 kWh/ton klinker serta mengurangi emisi CO₂ sebesar 2,27 kton (Price et al., 2009).

Kiln Shell Heat Loss Reduction (Improved Refractories)

Menggunakan pelapisan pada zona pembakaran untuk mengurangi kehilangan panas (*heat loss*) saat proses pembakaran. Sehingga suhu panas yang dihasilkan lebih

bertahan lama serta stabil untuk proses pemanasan *material* dengan suhu tinggi. Digunakan *refractory* dengan tujuan untuk mengisolasi panas. Selain itu, *refractory* membantu melindungi selubung baja *kiln* dari panas, tekanan kimia dan mekasnis. Pilihan *refractory* yang dapat digunakan terbuat dari batu bata yang mempunyai kemampuan mengembangkan dan mempertahankan pelapisan. Pelapisan membantu mengurangi kehilangan panas dan melindungi zona pembakaran pada lapisan *refractory*. Dengan adanya *kiln shell* ini dapat menghemat energi sebesar 2177 TJ serta mengurangi 206 kton CO₂ (Price et al., 2009).

b) Program Lingkungan Berdasarkan Non *Hotspot* Dampak

Pemanfaatan Motor Efisiensi Tinggi

Motor berefisiensi tinggi dirancang khusus untuk meningkatkan efisiensi energi dibandingkan dengan motor standar. Perbaikan desain difokuskan pada penurunan kehilangan mendasar dari motor termasuk penggunaan baja silikon dengan tingkat kehilangan yang rendah, inti yang lebih panjang (untuk meningkatkan bahan aktif), kawat yang lebih tebal (untuk menurunkan tahanan), laminasi yang lebih tipis, celah udara antara stator dan rotor yang lebih tipis, batang baja pada rotor sebagai pengganti aluminium, bearing yang lebih bagus dan fan yang lebih kecil, dan lainnya. Akan tetapi untuk penggantian motor yang ada yang belum habis masa pakainya dengan motor yang efisien energinya, tidak selalu layak secara finansial, oleh karena itu direkomendasikan untuk mengganti dengan motor yang efisien energinya hanya jika motor-motor tersebut sudah rusak. Dengan adanya program ini dapat meningkatkan efisiensi penggunaan listrik lebih besar 7% (Audit Energi ISBI, 2018).

Pemasangan Inverter untuk Penghematan Listrik

Motor induksi memiliki kelemahan, yaitu dalam hal pengaturan kecepatan dan torsi awal yang rendah. Dengan demikian bagi motor induksi yang pengaturan perputarannya dihubungkan dengan sistim bukaan damper seperti yang banyak dijumpai pada motor untuk kipas pendingin proses produksi yang akan memberikan dampak efisiensi motor menurun. Untuk mengatasi permasalahan ini dapat digunakan sistem kontrol

dengan mengatur tegangan input dan frekuensinya untuk mendapatkan pengaturan kecepatan dan torsi sesuai dengan kebutuhan proses produksi di industri. Parameter yang dibutuhkan motor induksi adalah pengaturan kecepatan dan torsi motor. Untuk itu dibutuhkan pengaturan yang fleksibel dengan cara mengubah frekuensi input-nya dari 50 Hz (standar PLN) menjadi frekuensi yang diinginkan agar motor dapat berputar pada kecepatan yang diinginkan. Ini dapat dilakukan dengan menggunakan inverter sebagai pengubah frekuensi. Potensi penghematan listrik dengan menggunakan inverter sebesar 39.248.123 kWh per tahun (Audit Energi ISBI, 2018).

Modifikasi Geometri Top Cyclone

Meningkatkan efisiensi pemisahan *top cyclone* dari sistem *suspension preheater*, yaitu tempat dimana bahan baku semen diumpankan. Sebagian besar bahan baku tersaring oleh *top cyclone* ini akan diproses menjadi klinker, dan yang tidak dapat disaring, karena terlalu lembut ukuran partikelnya, akan dikembalikan ke silo atau dicampur kembali dengan *fresh kiln feed* (bahan baku yang baru) setelah dipisahkan dari gas pembawa di *electrostatic precipitator* (EP). Penurunan kadar abu yang didapatkan sebesar 2% serta meningkatkan produksi klinker sebesar 3,8% (Darmanto dan Arief, 2006).

Adjustable Speed Drive untuk Kiln Fan

Sebagian besar energi dikonsumsi oleh mesin pada pembuatan semen. Efisiensi energi pada sistem kendali dapat ditingkatkan dengan cara mereduksi energi yang hilang atau dengan cara meningkatkan efisiensi motor. Sebagian besar motor diatur pada kecepatan tetap atau tidak dapat dirubah sesuai kebutuhan. Dengan adanya *adjustable speed drives* (ASDs) dapat diaplikasikan untuk kipas di dalam *kiln*, *cooler*, *preheater*, *separator* dan *mill*, serta berbagai macam sistem kendali. Dengan adanya ASDs ini dapat menghemat pemakaian energi sebesar 26,68 GWh dan pengurangan emisi CO₂ sebesar 27,43 kton CO₂ (Price et al., 2009).

4.4 Skenario Program Lingkungan

Setelah didapatkan beberapa alternatif program lingkungan, selanjutnya dibuat skenario program untuk *dirunning* kembali pada aplikasi SimaPro 8.5.2. Berikut ini merupakan beberapa skenario yang akan diiterasikan pada SimaPro:

a. Skenario A

Program perbaikan lingkungan dari skenario A meliputi:

1. Pengurangan penggunaan batubara dengan cara substitusi bahan bakar alternatif
2. Penurunan *Specific Heat Consumption* (SHC)
3. Penggunaan *Efficient Coal Separator*
4. Kiln *Shell Heat Loss Reduction (Improved Refractories)*

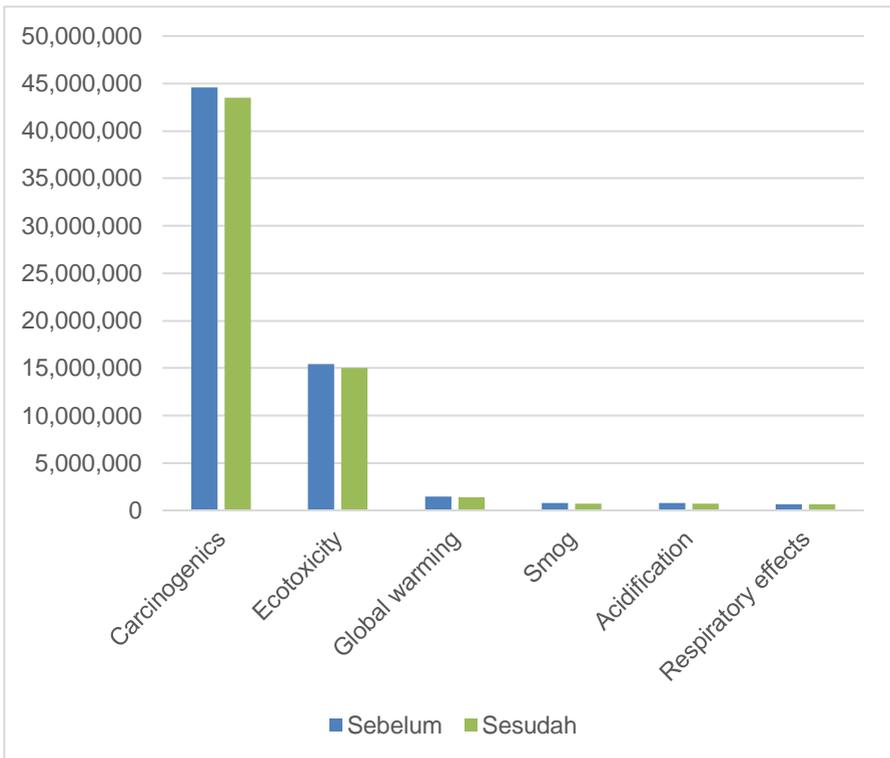
Setelah dilakukan *running* pada aplikasi SimaPro 8.5.2 dibandingkan perubahan dampak dari sebelum adanya program dengan sesudah adanya program lingkungan. Hasil dari *running* pada aplikasi SimaPro dapat dilihat pada Tabel 4.34.

Tabel 4.35 Perbandingan Dampak Lingkungan antara Sebelum dan Sesudah Program Skenario A

Impact Category	Sebelum	Sesudah	Perubahan (%)
<i>Carcinogenics</i>	44.574.076	43.491.278	2,43
<i>Ecotoxicity</i>	15.430.755	15.001.171	2,78
<i>Global warming</i>	1.431.345	1.414.124	1,20
<i>Smog</i>	757.075	742.815	1,88
<i>Acidification</i>	752.742	734.318	2,45
<i>Respiratory effects</i>	640.330	610.092	4,72

Sumber: Hasil Perhitungan dan SimaPro 8.5.2

Dari tabel di atas dapat diketahui bahwa dampak yang mengalami perubahan terbesar yaitu dari *respiratory effect* dengan perubahan sebesar 4,72%. Kemudian dampak yang mengalami perubahan paling kecil yaitu *global warming* dengan perubahan sebesar 1,20%. Apabila dilihat dari grafik, perbedaan perubahan dampak dapat dilihat Gambar 4.20.



Gambar 4.20 Diagram Perbandingan Dampak Lingkungan antara Sebelum dan Sesudah Program Skenario A

b. Skenario B

Program perbaikan lingkungan dari skenario B meliputi:

1. Pengurangan penggunaan batubara dengan cara substitusi bahan bakar alternatif
2. *Kiln Shell Heat Loss Reduction (Improved Refractories)*
3. Pemanfaatan Motor Efisiensi Tinggi
4. Pemasangan Inverter untuk Penghematan Listrik

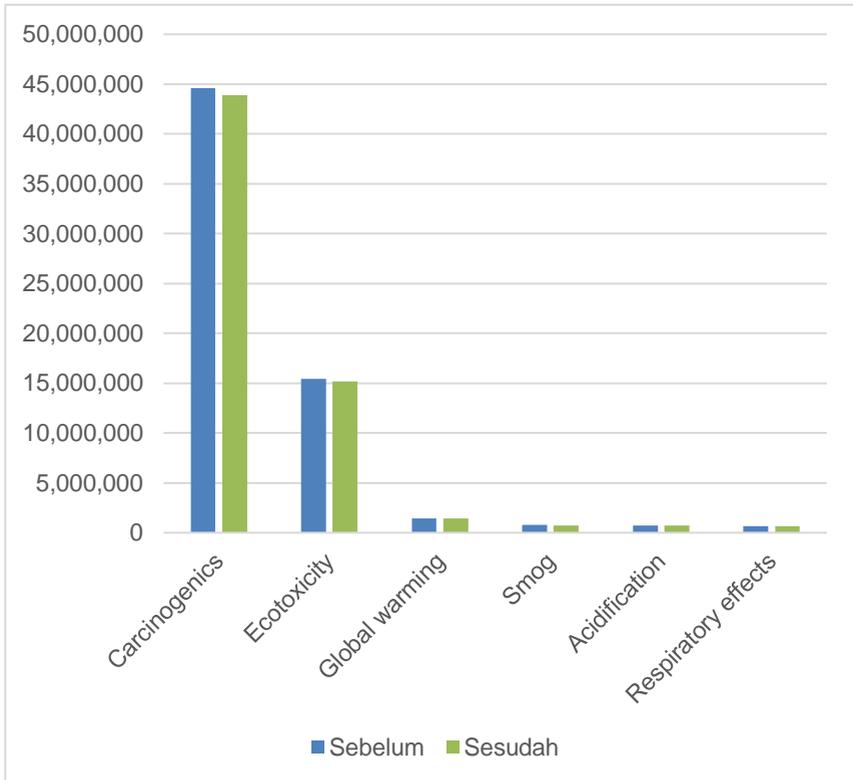
Setelah dilakukan running pada aplikasi SimaPro 8.5.2 dibandingkan perubahan dampak dari sebelum adanya program dengan sesudah adanya program lingkungan. Hasil dari running pada aplikasi SimaPro dapat dilihat pada Tabel 4.35.

Tabel 4.36 Perbandingan Dampak Lingkungan antara Sebelum dan Sesudah Program Skenario B

Impact Category	Sebelum	Sesudah	Perubahan (%)
<i>Carcinogenics</i>	44.574.076	43.874.554	1,57
<i>Ecotoxicity</i>	15.430.755	15.164.340	1,73
<i>Global warming</i>	1.431.345	1.424.403	0,48
<i>Smog</i>	757.075	751.448	0,74
<i>Acidification</i>	752.742	746.237	0,86
<i>Respiratory effects</i>	640.330	626.090	2,22

Sumber: Hasil Perhitungan dan SimaPro 8.5.2

Dari tabel di atas dapat diketahui bahwa dampak yang mengalami perubahan terbesar yaitu dari *respiratory effect* dengan perubahan sebesar 2,22%. Kemudian dampak yang mengalami perubahan paling kecil yaitu *global warming* dengan perubahan sebesar 0,48%. Apabila dilihat dari grafik, perbedaan perubahan dampak dapat dilihat Gambar 4.21.



Gambar 4.21 Diagram Perbandingan Dampak Lingkungan antara Sebelum dan Sesudah Program Skenario B

c. Skenario C

Program perbaikan lingkungan dari skenario C meliputi:

1. Pemanfaatan Motor Efisiensi Tinggi
2. Pemasangan Inverter untuk Penghematan Listrik
3. Modifikasi Geometri *Top Cyclone*
4. Adjustable *Speed Drive* untuk *Kiln Fan*

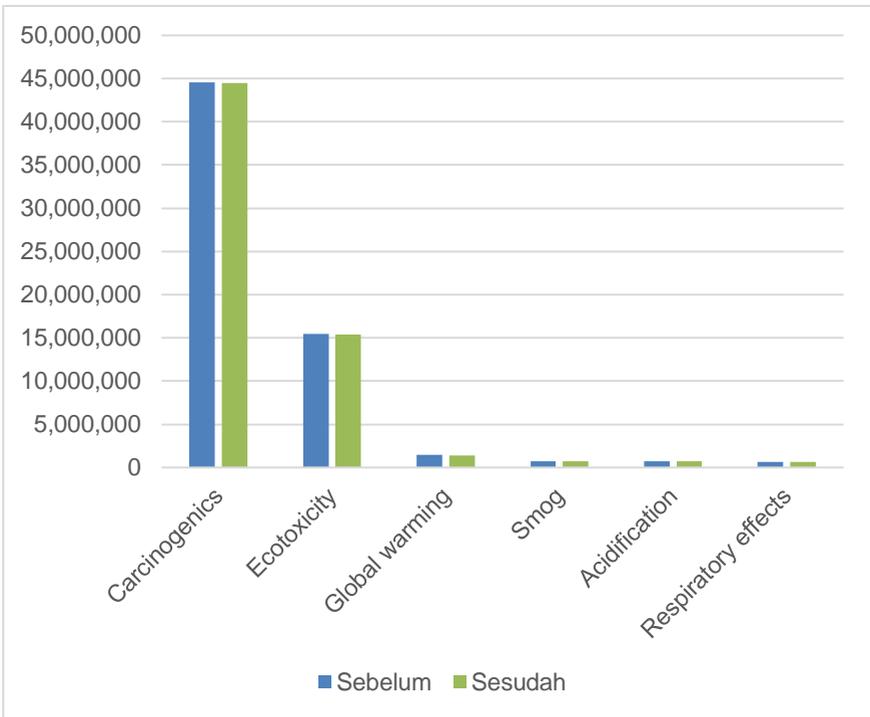
Setelah dilakukan *running* pada aplikasi SimaPro 8.5.2 dibandingkan perubahan dampak dari sebelum adanya program dengan sesudah adanya program lingkungan. Hasil dari *running* pada aplikasi SimaPro dapat dilihat pada Tabel 4.36.

Tabel 4.37 Perbandingan Dampak Lingkungan antara Sebelum dan Sesudah Program Skenario C

Impact Category	Sebelum	Sesudah	Perubahan (%)
<i>Carcinogenics</i>	44.574.076	44.510.660	0,14
<i>Ecotoxicity</i>	15.430.755	15.403.303	0,18
<i>Global warming</i>	1.431.345	1.428.721	0,18
<i>Smog</i>	757.075	754.870	0,29
<i>Acidification</i>	752.742	749.655	0,41
<i>Respiratory effects</i>	640.330	636.474	0,60

Sumber: Hasil Perhitungan dan SimaPro 8.5.2

Dari tabel di atas dapat diketahui bahwa dampak yang mengalami perubahan terbesar yaitu dari *respiratory effect* dengan perubahan sebesar 0,60%. Kemudian dampak yang mengalami perubahan paling kecil yaitu *carcinogenics* dengan perubahan sebesar 0,14%. Apabila dilihat dari grafik, perbedaan perubahan dampak dapat dilihat Gambar 4.22.



Gambar 4.22 Diagram Perbandingan Dampak Lingkungan antara Sebelum dan Sesudah Program Skenario C

Berdasarkan 3 skenario program lingkungan yang *di-running* di dalam aplikasi SimaPro, menghasilkan beberapa perubahan terhadap kategori dampak yang dinilai. Perubahan yang terjadi bersifat positif, artinya dampak lingkungan dari proses produksi dan eksploitasi berkurang meskipun tidak terlalu signifikan. Diantara 3 skenario program lingkungan, skenario A mempunyai kontribusi penurunan dampak yang paling besar. Indikasinya adalah dapat diturunkannya titik *hotspot* dampak *carcinogenics* sebesar 2,43%, lebih besar dibandingkan skenario B dan C yang mampu menurunkan sebesar 1,57% dan 0,14%. Selain itu, skenario A juga mampu menurunkan dampak *respiratory effect* sebesar 4,72%, dimana angka ini merupakan angka penurunan dampak terbesar diantara dampak dan skenario lainnya.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan yang telah dilakukan, didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Beban emisi dari proses eksploitasi dan produksi semen sebesar 9.349.981,2 ton CO₂, 144,6 ton CH₄, 70,3 ton N₂O, 272,6 ton SO₂, 5.373,8 ton NO₂, 4.867,1 ton PM, 2.560,5 ton CO, dan 966,5 ton CO₂ sekunder.
2. Besar kontribusi dampak proses eksploitasi dan produksi semen berdasarkan hasil LCA yaitu *carcinogenics* 44.574.076, *ecotoxicity* 15.430.755, *global warming* 1.431.345, *smog* 757.075, *acidification* 752.742, dan *respiratory effects* 640.330. *Hotspot* proses dari kegiatan produksi semen berada pada unit kiln, dengan *hotspot* dampak yaitu *carcinogenics*.
3. Berdasarkan 3 skenario yang telah dirunning, skenario A memberikan perubahan dampak yang paling besar jika dibandingkan dengan lainnya, yaitu sebesar 2,4%; 2,7%; 1,2%; 1,8%; 2,4%; dan 4,7% untuk dampak berturut-turut *carcinogenics*, *ecotoxicity*, *global warming*, *smog*, *acidification*, dan *respiratory effects*.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil evaluasi penelitian, berikut saran yang dapat dilakukan:

1. Menggunakan data uji emisi kendaraan berat di unit eksploitasi, sehingga data emisi yang dihasilkan mendekati keadaan sebenarnya di lapangan.
2. Melanjutkan penelitian dengan *scope* kajian dari *gate to grave*, dimulai dari distribusi semen sampai dengan semen tersebut digunakan.
3. Membuat kajian terkait nilai besar dampak potensial dari hasil LCA untuk mengklasifikasikan ke dalam dampak penting dan tidak penting, sehingga dapat ditentukan prioritasnya.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR PUSTAKA

- Ahn, C. Wenjia P., dan Feniosky P. 2009. **Enhanced Estimation of Air Emissions from Construction Operations Based on Discrete Event Simulation**. Nottingham University Press : UK
- Alfianto, P.N. dan Puji L. 2014. **Analisis Emisi Debu dan Partikulat Terhadap Penggunaan Bahan Bakar Alternatif di Industri Semen**. Jurnal Teknik Lingkungan 20 (1) : 11-19.
- An, D., Hoang X., dan Nguyen T. 2008. **Photochemical Smog Introduction and Episode Selection for the Ground-Level Ozone in Hanoi, Vietnam**. Journal of Sciences, 24 : 169-175
- Andistiara, N. 2018. **Kajian Dampak Proses Eksploitasi dan Produksi Gas Alam Terhadap Lingkungan dengan Menggunakan Metode Life Cycle Assessment (LCA)**. ITS : Surabaya
- Ancona, C., Bauleo, L., Massari, S., Sozzi, R., Davoli, M., Forastiere, F. 2016. **Long Term Effects of Industrial Pollution: A Residential Cohort Approach in the Civitavecchia Area (Central Italy)**. Abstracts of the 28th Annual Meeting of the International Society for Environmental Epidemiology (ISEE), Rome (Italy). Environmental Health Perspectives, Research Triangle Park, NC.
- Anonim. 2004. **SNI 15-2049-2004 Tentang Semen Portland**. Badan Standarisasi Nasional.
- Atmaja, I.G.D. 2015. **Industri Semen dan Emisi Carbon Dioxide (CO₂) di Pulau Jawa**. Media Bina Ilmiah 9 (2) : 63-65.
- Bagaswara, M.E.A dan Yuswono H. 2017. **Analisis dan Rekayasa Proses Produksi untuk Mengendalikan Environmental Impact Menggunakan Metode LCA**. Jurnal Metris 18 : 95-104
- Barata. 2005. **Monitoring dan Pemantauan Pencemaran Udara PT Semen Baturaja**. Jurnal Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung.
- Boesch, M.E. dan Hellweg S. 2010. **Identifying Improvement Potentials In Cement Production With Life Cycle Assessment**. Environment Science Technology, Vol 44 : 9143-9149

- Bui, Q., Nam M., dan Khanh V. 2009. **Calorific Value and Energy Yield of Refuse Derived Fuel (RDF) from Rice Husk and Plastic Wastes**. Journal of Science and Technology, 47 (5): 396-404
- Cahyono, W.E. 2010. **Urgensi Menjaga Lapisan Ozon bagi Penghuni Bumi**. Jurnal LAPAN, 8 (2) : 39-41
- Chaerunnisa L.H., Budi P., dan Haryono S. 2017. **Estimasi Emisi Pencemar Udara Konvensional (SO_x, NO_x, CO, dan Partikulat) Transportasi Umum Berdasarkan Metode International Vehicle Emission di Beberapa Ruas Jalan Kota Semarang**. Jurnal Teknik Lingkungan, 6 (3) : 1-17
- Chan, L., Chan C., dan Qin. 1998. **Analysis of the Seasonal Behavior of Tropospheric Ozone at Hong Kong**. Atmospheric Environment, 32 : 159.
- Chen, C., Habert, Bouzidi, dan Jullien. 2010. **Environmental Impact of Cement Production: Detail of The Different Processes and Cement Plant Variability Evaluation**. Journal of Cleaner Production, 18 (5) : 478-485
- Connell, D.W., 2005. **Basic Concepts of Environmental Chemistry**. Taylor and Francis, Boca Raton, FL.
- Cooper, D. dan Alley. 1994. **Air Pollution Control: A Design Approach Fourth (4th) Edition**. Waveland Press : US
- Dai, F., Ling X., dan Ding M. 2017. **How to Set the Allowance Benchmarking for Cement Industry in China's Carbon Market: Marginal Analysis and the Case of the Hubei Emission Trading Pilot**. Sustainability, 9 (322) : 1-15
- Darmanto, P.S., dan Arief S. 2006. **Modifikasi Top Cyclone untuk Meningkatkan Kinerja Suatu Pabrik Semen**. Jurnal Teknik Mesin, 21 (1): 10-15
- European Environmental Agency. 1997. **Life Cycle Assessment: A Guide to Approaches, Experiences and Information Sources**. United Kingdom
- EPA. 2004. **Photochemical Smog**. United State.
- EPA. 2012. **TRACI User's Manual**. United State.
- EPRI. 2010. **Is Coal Ash Toxic?**. EPRI, Palo Alto, CA.
- Farhan, M. 2016. **Penambahan Abu Batubara Sebagai Bahan Campuran untuk Proses Pembuatan Semen**. Politeknik Negeri Sriwijaya : Palembang.
- Finahari. 2007. **Gas CO₂ dan Polutan Radioaktif dari PLTU Batubara**. Jurnal Pengembangan Energi Nuklir 9 (1): 1-8

- Fortoul, 2014. **Air Pollution and Its Effects in the Respiratory System**. The Impact of Air Pollution on Health, Economy, Environment and Agricultural Sources, Universidad Nacional Autonoma de Mexico (UNAM) Mexico.
- Gaffney, J.S., Nancy A., dan John E.F. 2008. **Formation and Effects of Smog**. Environmental and Ecological Chemistry, Vol II.
- Harjanto, T. dan Saipul B. 2018. **Life Cycle Assessment Pilihan Penggunaan Alat Transportasi Bagi Siswa SMA di Cilacap dalam Kerangka Penerapan Mekanisme Pembangunan Bersih**. Jurnal Rekayasa Teknologi Industri Hijau, 2 (1)
- Herprayoga, R. 2014. **Kajian Life Cycle Assessment (LCA) untuk Mereduksi Dampak Pencemaran Udara PT Semen Bosowa Maros dengan Pendekatan Analytical Hierarchy Process (AHP)**. ITS : Surabaya.
- Hermawan, Puti F.M., Muhamad A., R. Driejana. 2013. **Peran Life Cycle Analysis (LCA) pada Material Konstruksi dalam Upaya Menurunkan Dampak Emisi Karbon Dioksida pada Efek Gas Rumah Kaca**. Konferensi Nasional Teknik Sipil 7 UNS : Surakarta.
- Hidayat, S. 2009. **Semen: Jenis dan Aplikasinya**. Kawan Pustaka : Surabaya.
- Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguer, M., van der Linder, P.J., Dai, X., Maskell, K., dan Johnson, C.A. 2001. **Climate Change 2001: Scientific Basic**. Cambridge University Press.
- IPCC. 2006. **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. OECD : Paris
- IPCC. 2007. **IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007**. Cambridge University Press : Cambridge
- ISO 14001. 2004. **Environmental Management System – Requirements with Guidance For Use**. Geneva : ISO
- Kartawiguna, E. 2011. **Faktor-Faktor yang Berperan dalam Karsinogenis**. Fakultas Kedokteran Universitas Trisakti : Jakarta.
- Kemenperin. 2012. **Petunjuk Teknis Perhitungan Emisi Gas Rumah Kaca (GRK) di Sektor Industri**. Jakarta
- Kemenperin. 2018. **Pasokan Semen Nasional**, <URL: <https://www.kemenperin.go.id>>

- Kinasti, M.A., Endah L., dan Devita M. 2018. **Potensi Pemanfaatan Limbah Pembakaran Batubara (Bottom Ash) Pada PLTU sebagai Media Tanam dalam Upaya Mengurangi Pencemaran Lingkungan.** Jurnal Kilat, 7 (1) : 36-46
- Law, A.M. and Kelton, W.D. 1991. **Simulation Modelling and Analysis.** 2nd Edition, McGraw-Hill, New York.
- Lewis, P., Heni F., dan Indrid A. 2015. **Engine Variable Impact Analysis of Fuel Use and Emissions for Heavy-Duty Diesel Maintenance Equipment.** Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2482 (1) : 8-15
- Linarsih dan Sarto. 2018. **Emisi Gas Metana dan Karbon Dioksida pada Proses Pengolahan Limbah Cair Kelapa Sawit.** Berita Kedokteran Masyarakat, 34 (3) : 107-114
- Luthfi, M., Dwi A., Muji S., dan Suroto M. 2018. **Uji Komposisi Bahan Bakar Dan Emisi Pembakaran Peralite dan Premium.** Jurnal Teknologi, 10 (1) : 67-72
- Marku, J., Dumi I., Lico E., Dilo T., dan Cakaj O. 2012. **The Characteristic and the Utilization of CKD As Partial Replacement of Portland Cement in Mortar and Concrete Production.** Faculty of Natural Sciences : Albania
- Material Safety Data Sheet Portland Cement Clinker 2017. **OSHA Hazard Communication Standard (29 CFR 1910.1200).** Houston, United States of America
- Menoufi, A.I.M. 2011. **Life Cycle Analysis and Life Cycle Impact Assessment Methodologies: A Stable of the Art.** Universitat de Lleida : Lleida.
- Mijailovic, I., Radojicic., Ecim-Djuric., Stefanovic., dan Kulic. 2014. **Energy Potential of Tobacco Stalks in Briquettes and Pellets Production.** Journal of Environmental Protection and Ecology, 15 (3) : 1034-1041
- Minallah. 2017. **Desain Pabrik Sodium Karbonat dari CO₂ Flue Gas Pabrik Semen.** Jurnal Teknik ITS 6 (1) : 142-144
- Moka, V.K. 2012. **Estimation of Calorific Value of Biomass from Its Elementary Components by Regression Analysis.** National Institute of Technology Rourkela : Odisha
- Nugrainy, G.S., Sudarno, dan Cahyadi. 2015. **Upaya Penurunan Emisi SO₂ dari Bahan Bakar Batubara Kualitas Rendah (Tipe: Subbituminous) dengan Campuran Batu Kapur**

- (Limestone) pada Proses Pembakaran.** Jurnal Teknik Lingkungan 4 (1).
- Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 12 Tahun 2012. **Pedoman Penghitungan Beban Emisi Kegiatan Industri Minyak dan Gas Bumi.** Jakarta.
- Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 41 Tahun 1999. **Pengendalian Pencemaran Udara.** Jakarta.
- Piersanti, et al. 2018. **Air Quality Modeling and Inhalation Health Risk Assessment for A New Generation Coal-Fired Power Plant in Central Italy.** Science of the Total Environment, 644 : 884–898
- PreConsultant. 2018. **What's New Simapro 8.5,** <URL: <https://www.pre-sustainability.com/>>.
- Pringgajaya, K.A. dan Udisakti C. 2012. **Implementasi Life Cycle Assessment (LCA) dan Pendekatan Analytical Network Process (ANP) untuk Pengembangan Produk Hetric Lamp yang Ramah Lingkungan.** Jurnal Teknik ITS 1 (1) : 515-520.
- Prodjosantoso, A.K. 1992. **Globalisasi Masalah Penipisan Lapisan Ozon dan Usaha-Usaha Penanggulangannya.** Cakrawala Pendidikan Nomor 1.
- Purnawan, I. dan Prabowo A. 2017. **Pengaruh Penambahan Limestone terhadap Kuat Tekan Semen Portland Komposit.** Jurnal Rekayasa Proses, 11 (2) : 86-93
- Puspitorini. 2013. **Studi Pemanfaatan Batubara Kualitas Rendah Sebagai Bahan Bakar Rotary Cement Kiln Berbasis CFD.** Jurnal Teknik POMITS, 2 (1) ISSN: 2337-3539
- Rachmawati. 2013. **Pengaruh Emisi Udara Pada Sentra Pengolahan Batu Kapur Terhadap Kapasitas Vital Paru Pekerja Dan Masyarakat Di Desa Karas Kecamatan Sedan Kabupaten Rembang.** Jurnal Ilmu Lingkungan, 11 (1) : 6-22
- Ratnani, R.D. 2008. **Teknik Pengendalian Pencemaran Udara yang Diakibatkan Oleh Partikel.** Momentum, 4 (2) : 27-32
- Revani, R., I Made A., dan Aguk Z. 2012. **Rancang Bangun Alat Pereduksi Particulate Matter (PM) Gas Buang Mesin Diesel dengan Metode Cyclone.** Jurnal Teknik ITS, 1 (1) : 292-296
- RIVM, 2018. **LCIA : The ReCiPe Model** <URL: <https://www.rivm.nl/en/life-cycle-assessment-lca/recipe>>

- Ryberg, M., Jane B., Marisa D., Melissa Z., dan Ralph K. 2013. **Updated US and Canadian Normalization Factors for TRACI 2.1**. Clean Techn Environ Policy.
- Santoso, M., Mariana M., Diah D., dan Rita M. 2016. **Karakteristik Partikulat Udara Ambien dan Terespirasi di Sekitar Kawasan Industri Non Formal**. Jurnal Sains dan Teknologi Nuklir Indonesia, 17 (1) : 49-58
- Saputri, E. 2018. **Kajian Dampak Proses Pengolahan Minyak Bumi di Pertamina RU IV Balongan Terhadap Lingkungan dengan Menggunakan Metode Life Cycle Assessment (LCA)**. ITS : Surabaya
- Sari, A.T. 2017. **Life Cycle Assessment (LCA) Emisi pada Proses Produksi Bahan Bakar Minyak (Bbm) Jenis Solar dengan Pendekatan Metode Analytical Hierarchy Process (AHP)**. ITS : Surabaya
- Sargent, R.G. 2013. **Verification and Validation of Simulation Models**. Journal of Simulation, 7 : 12-24
- Semen Indonesia, 2018. **Laporan Keberlanjutan 2017 PT Semen Indonesia**. Tuban Jawa Timur.
- Semen Indonesia, 2018. **Laporan Tahunan 2017 PT Semen Indonesia**. Tuban Jawa Timur.
- Semen Indonesia, 2014. **Dokumen Program Penilaian Peringkat Kerja (PROPER) 2013**. Tuban Jawa Timur.
- Shanmuganathan, P., Lakshmipathiraj, Srikanth, Nachiappan, Sumathy. 2008. **Toxicity Characterization and Long-Term Stability Studies on Copper Slag from The ISASMELT Process**. Resources, Conservation and Recycling, 52 : 601-611
- Shrivastava, S., Praveen S., Akanchha S., dan Lekhika S. 2015. **Fly Ash Disposal and Diseases in Nearby Villages (A Survey)**. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences, 4 (2) : 939-946
- Sidik, F. dan Ahmad G.A. 2018. **Laporan Kerja Praktik : Studi Teknologi Pengendalian Emisi SO_x, NO_x, CO₂, dan Particulate Matter (PM) di PT Semen Indonesia (Persero) Tbk. Pabrik Tuban – Jawa Timur**. Teknik Lingkungan ITS : Surabaya.
- Slamet, L. 2001. **Pemanfaatan Gas Metan sebagai Sumber Energi**. Berita Dirgantara, 2 (1) : 31-34

- Stillman, J. dan Adam W. 2015. **Biochemical Adaptation to Ocean Acidification**. *Journal of Experimental Biology*, 218 : 1946-1955.
- Sugiyono, A. 2006. **Penanggulangan Pemanasan Global di Sektor Pengguna Energi**. *Jurnal Sains & Teknologi Modifikasi Cuaca*, 7 (2) : 15-19
- Suhariyono, G. dan Muji W. 2003. **Distribusi Diameter Partikel Debu PM₁₀ dan PM_{2.5} dalam Udara Sekitar Kawasan Pabrik Semen, Citeureup-Bogor**. Puslitbang Keselamatan Radiasi dan Biomedika Nuklir BATAN
- Talayansa, L., Sri W., dan Anshariah. 2017. **Analisis Emisi SO₂ Hasil Pembakaran Batubara pada PLTU Jeneponto**. *Jurnal Geomine* 5 (2) : 80-83.
- Tsiamis, D. dan Marco J. 2016. **Determining Accurate Heating Values of Non-Recycled Plastics (NRP)**. Earth Engineering Center: New York
- US EPA. 2007. **Coal Combustion Waste Damage Case Assessments**. United States.
- Utina, R. 2015. **Pemanasan Global : Dampak dan Upaya Meminimalisasinya**. *Jurnal Saintek Universitas Negeri Gorontalo*, 3 (3) : 1-11
- Wahyudi. 2006. **Penelitian Nilai Kalor Biomassa: Perbandingan antara Hasil Pengujian dengan Hasil Perhitungan**. *Jurnal Ilmiah Semesta Teknika*, 9 (2) : 208-220
- Wahyudi, J. 2017. **Penerapan Life Cycle Assessment untuk Menakar Emisi Gas Rumah Kaca yang Dihasilkan dari Aktivitas Produksi Tahu**. ISSN 2407-9189
- Widowati dan Sutoyo. 2009. **Upaya Mengurangi Penipisan Lapisan Ozon**. *Buana Sains*, 9 (2) : 141-146
- Yang, W. dan Omaye, S.T. 2009. **Air Pollutants, Oxidative Stress and Human Health**. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environment Mutagenesis*, 674 (1-2) : 45-54
- Zhao, Y., Shuxiao W., Lei D., Yu L., Pengfei C., dan Jiming H. 2008. **Primary Air Pollutant Emissions ff Coal-Fired Power Plants in China: Current Status and Future Prediction**. *Atmospheric Environment*, 42 : 8442–8452

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LAMPIRAN

BIOGRAFI PENULIS



Anwar Rosyid lahir di Jember pada tanggal 20 Mei 1996. Penulis menempuh pendidikan formal di SDN 04 Rambipuji (2003-2009), SMPN 1 Rambipuji (2009-2012), SMAN 1 Jember (2012-2015). Pada tahun 2015, penulis melanjutkan pendidikan di Departemen Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) dan terdaftar dengan NRP 03211540000054.

Selama masa perkuliahan, penulis aktif sebagai anggota Komunitas Pecinta dan Pemerhati Lingkungan (KPPL) selama periode 2016-2018. Selain itu, penulis juga aktif sebagai anggota pada tim kerohanian Al-Kaun Himpunan Mahasiswa Teknik Lingkungan (HMTL) periode 2016-2017. Penulis juga aktif dalam berbagai kepanitian, salah satunya sebagai Ketua Hari Air Sedunia 2017. Kemudian penulis juga pernah menjadi asisten laboratorium untuk mata kuliah Kimia Lingkungan 1 tahun 2016. Pengalaman kerja praktik pada industri geothermal di PT Geodipa Energi Unit Dieng pada tahun 2018. Apabila ingin menghubungi peneliti dapat melalui email anwar.rosyid96@gmail.com