

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Kontribusi industri semen terhadap emisi CO₂ dunia	2
Gambar 1. 2 Intensitas emisi ideal industri semen Indonesia untuk mencapai Paris Agreement (Climate Action Tracker, 2020a)	4
Gambar 2. 1. Proyeksi emisi CO ₂ industri semen Indonesia (Santoso, n.d.)	81
Gambar 2. 2. Gambar 4. Benchmark intensitas emisi pabrik semen Indonesia 2021	81
Gambar 2. 3. Gambar 5. Emisi GRK sektor IPPU (Industrial process & Product use) Indonesia 2019 (KLHK & Dirjen PPI, 2021)	82
Gambar 2. 4. Gambar 8 Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (BAPPENAS, 2017)	13
Gambar 2. 5. Gambar 7. Konsumsi dan pertumbuhan konsumsi semen di Indonesia ([ASI] Asosiasi Semen Indonesia, 2021)	79
Gambar 2. 6. Proses Pembuatan Semen (International Energy Agency, 2019)..	19
Gambar 2. 7. Komposisi penggunaan energi listrik dan panas pembuatan semen (International Energy Agency, 2019)	22
Gambar 2. 8. Emisi total CO ₂ global (Mckinsey Company, 2017)	25
Gambar 2. 9. Net Zero Emission CEMBERAU (CEMBERAU, 2017)	27
Gambar 2. 10. Skenario capaian emisi CO ₂ dan upaya penurunan 2050 (Chatham house, 2018)	28
Gambar 2. 11. Upaya penurunan emisi CO ₂ 2050 pada skenario 2DS dan RTS (International Energy Agency, 2019)	30
Gambar 2. 12. Simbol Pada Diagram (Sterman, 2002).	35
Gambar 2. 13. Contoh Flow Diagram.....	37
Gambar 2. 14. LambangLevel	37
Gambar 2. 15. Simbol Rate (Sterman 2004)	37
Gambar 2. 16. Simbol Auxiliary	38
Gambar 2. 17. Simbol Constant	38
Gambar 2. 18. Simbol Link & Delayed Link	38
Gambar 2. 19. Kerangka Pemikiran	45
Gambar 3. 1. Flowchart Penelitian.....	48

Gambar 3. 2. Flowchart Penelitian (Lanjutan).....	49
Gambar 3. 3. Struktur Hirarki AHP.....	40
Gambar 4. 1 Konsumsi dan pertumbuhan konsumsi semen di Indonesia ([ASI] Asosiasi Semen Indonesia, 2021).....	79
Gambar 4. 2 Benchmark intensitas emisi pabrik semen Indonesia 2021	81
Gambar 4. 3 Proyeksi emisi CO ₂ industri semen Indonesia (Santoso, n.d.).....	81
Gambar 4. 4 Emisi GRK sektor IPPU (Industrial process & Product use) Indonesia 2019 (KLHK & Dirjen PPI, 2021)	82
Gambar 4. 5 Model diagram sebab akibat upaya integrasi penurunan emisi	83
Gambar 4. 6 Hasil simulasi emisi CO ₂ dan produksi semen pada kondisi BAU..	84
Gambar 4. 7 Model Stock Flow Emisi CO ₂ Industri Semen Indonesia	85
Gambar 4. 8 Hasil Simulasi Skenario 1	86
Gambar 4. 9 Hasil Simulasi Skenario 2	87
Gambar 4. 10 Hasil Simulasi Skenario 4	89
Gambar 4. 11 Hasil Simulasi Skenario 5	89
Gambar 4. 12 Hasil Simulasi Skenario 5	91
Gambar 5. 1 Grafik Penurunan Emisi CO ₂ tahun 2050	97

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. PEDOMAN WAWANCARA PENENTUAN TARGET BERKELANJUTAN PENURUNAN EMISI KARBON DIOKSIDA PADA INDUSTRI SEMEN DI INDONESIA	108
Lampiran 2.	
KUESIONER PENETAPAN BOBOT/PRIORITAS KEPENTINGAN DARI KRITERIA-KRITERIA DALAM UPAYA-UPAYA YANG MEMPENGARUHI PENENTUAN TARGET EMISI CO ₂ INDUSTRI SEMEN DI INDONESIA ..	110
Lampiran 3. KUESIONER PENETAPAN BOBOT/PRIORITAS KEPENTINGAN MASING-MASING SUBKRITERIA DALAM UPAYA PENURUNAN TARGET EMISI CO ₂ PADA INDUSTRI SEMEN DI INDONESIA	113
Lampiran 4. DAFTAR RUMUS PADA SIMULASI SISTEM DINAMIK POWERSIM.....	117
Lampiran 5. DAFTAR RESPONDEN STAKE HOLDER INDUSTRI SEMEN INDONESIA	125
Lampiran 6. NILAI RASIO KONSESTENSI MODEL AHP	128
Lampiran 7 HASIL PENGOLAHAN DATA AHP MENGGUNAKAN SOFTWARE EXPERT CHOICE.....	131
Lampiran 8 Data Kualitatif Hasil Wawancara Narasumber	179

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

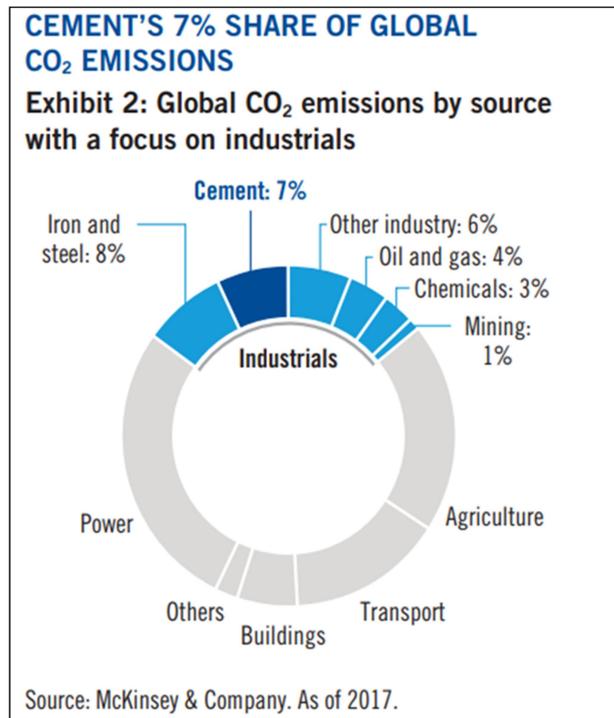
Semen digunakan untuk membuat beton, bahan manufaktur yang paling banyak dikonsumsi secara global. Beton membangun rumah, sekolah, rumah sakit, tempat kerja, sistem transportasi dan infrastruktur untuk air bersih, sanitasi dan energi, yang penting untuk kualitas hidup dan kesejahteraan sosial dan ekonomi. Seperti kita ketahui meningkatnya populasi secara global dan pola urbanisasi, ditambah dengan kebutuhan pembangunan infrastruktur, mendorong permintaan semen dan beton, produksi semen global akan tumbuh sebesar 12-23% pada tahun 2050 dari level saat ini (International Energy Agency, 2019), kebutuhan semen di Indonesia tercatat 76,4 juta ton pada tahun 2019, meskipun terdapat kontraksi pada tahun 2020 sebesar 12,3% karena pandemi Covid-19 karena penundaan sebagian besar proyek konstruksi dan infrastruktur di Indonesia ([ASI] Asosiasi Semen Indonesia, 2021), pada tahun 2021 tercatat 62,2 juta ton dan dengan meningkatnya kebutuhan semen juga akan meningkatkan dampak terhadap lingkungan.

Industri semen mempunyai dampak lingkungan utama yang disebabkan oleh konsumsi energi yang sangat besar dimana efek konsumsi initerjadi emisi gas rumah kaca yang didominasi oleh emisi karbondioksida (CO₂) yang mempengaruhi perubahan iklim (Güereca et al., 2015). Proses produksi semen membutuhkan energi panas yang besar (Fahri & Lestari, 2013). Biaya operasional proses pembuatan semen sekitar 30%- 40% adalah biaya untuk operasional energi terutama energi dari bahan bakar yang berasal dari fosil, seperti *coal* (batubara) dan solar industri dominan digunakan sebagai *source* energi dalam pabrik semen di Indonesia (Harjanto et al., 2012).

Global Warming (pemanasan suhu bumi) akibat gas rumah kaca (GRK)

dimana pada saat ini dunia telah menghadapi salah satu problem lingkungan utama karena hal ini. Emisi gas karbon yang terakumulasi ke atmosfer banyak dihasilkan oleh pembakaran bahan bakar fosil, sehingga isu pemanasan global yang mempengaruhi iklim bumi ini menjadi salah satu goal dalam *Sustainable development goals* (SDG's) yaitu tujuan No 13 tentang Perubahan Iklim (*Climate Action*). Indonesia pada tahun 2009 berkomitmen untuk penurunan emisi GRK tahun 2030 sebesar 26% dengan bawah upaya apapun (BAU, *business as usual*) dan 41% dengan bantuan internasional.

Sektor semen adalah konsumen energi industri terbesar ketiga di dunia, terdiri dari 7% penggunaan energi industri global (10,7 exajoule [EJ] CO₂ eq). Produksi semen melibatkan penguraian batu kapur (kalsium karbonat), yang mewakili sekitar 60% dari total emisi CO₂ yang dihasilkan dalam proses tersebut, dan sisa emisi CO₂ disebabkan oleh pembakaran bahan bakar dan penggunaan energi lain.



Gambar 1. 1 Kontribusi industri semen terhadap emisi CO₂ dunia

Emisi CO₂ langsung dari industri semen diperkirakan akan meningkat 4% secara global di bawah Skenario Teknologi Referensi Badan Energi Internasional (IEA) (RTS2) pada tahun 2050 meskipun ada peningkatan 12% dalam produksi semen global pada periode yang sama (International Energy Agency, 2019).

Presiden Joko Widodo menindaklanjuti pertemuan COP-21 (*Paris Agreement*) dengan terbitnya Undang-undang No. 16 Tahun 2016 yang mana isi dari undang-undang ini adalah komitmen untuk mencegah laju kenaikan temperatur rata-rata bumi di bawah 2°C di atas tingkat pada masa pra-industrialisasi dan melanjutkan upaya untuk menekan kenaikan suhu dibawah 1.5°C pada masa pra-industrialisasi (Undang-Undang No 16 Tahun 2016 Tentang Pengesahan Paris Agreement, n.d.). Konsekwensi dari undang-undang ini terhadap penyelenggaraan pemerintahan yaitu bahwa seluruh jajaran pemerintah pusat hingga daerah harus menyeleraskan kegiatannya dengan tujuan pembangunan berkelanjutan (TPB) dengan diterbitnya Peraturan Presiden No 59 Tahun 2017 tentang Peta Jalan (*roadmap*) Nasional TPB yang berisikan *policy* strategis jenjang terstruktur dalam pencapaian TPB yang dimulai pada tahun 2017 sampai dengan tahun 2030, kemudian pada jajaran kementerian diterbitkan Peraturan Menteri Perindustrian Nomor 12 Tahun 2012 tentang jalan pedoman (*roadmap*) pengurangan emisi CO₂ pada industri semen di Indonesia. Pada peraturan tersebut industri semen penurunan secara sukarela emisi CO₂ sebanyak 2% untuk jangka waktu 2011-2015 dan penurunan wajib sebanyak 3% untuk jangka waktu 2016-2020, sehingga praktis setelah tahun 2020 -2050 tidak terdapat lagi target berkelanjutan emisi CO₂ bagi industri semen Indonesia baik secara *business as usual* (BAU) maupun target percepatan (ambisius).

Data emisi pabrik semen Indonesia masih berada pada level emisi diatas hasil emisi pabrik semen di negara berkembang, dimana negara berkembang lain seperti negara Amerika Selatan, Amerika Tengah , India yang telah dapat menurunkan emisi CO₂ dibawah 600 Kg CO₂eq/ton

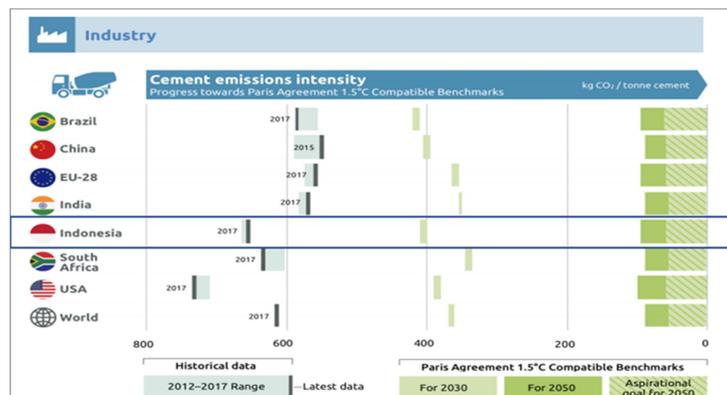
semen seperti ditunjukkan pada table berikut :

Tabel 1. 1. Data emisi CO₂ pabrik semen secara global (Global Cement Concrete Association, 2021)

Region	2012 (kg CO ₂ / t cement equivalent)	2013 (kg CO ₂ / t cement equivalent)	2014 (kg CO ₂ / t cement equivalent)	2015 (kg CO ₂ / t cement equivalent)	2016 (kg CO ₂ / t cement equivalent)	2017 (kg CO ₂ / t cement equivalent)	2018 (kg CO ₂ / t cement equivalent)	2019 (kg CO ₂ / t cement equivalent)
Africa	625	606	604	624	634	635	625	607
Asia (n.e.c.) + Oceania	665	655	654	665	657	657	643	637
Brazil	560	567	555	559	577	585	562	534
Central America	606	615	615	618	612	609	600	598
CIS	727	720	718	722	706	708	688	681
Europe	565	566	562	560	557	551	553	544
India	581	583	576	569	572	569	572	555
Middle East	699	711	722	711	706	707	701	702
North America	695	696	708	704	714	715	710	706
Northeast Asia	626	626	629	629	630	649	672	676
South America ex. Brazil	571	556	545	559	573	581	580	586

Untuk dapat mencapai skenario untuk menahan laju suhu bumi dibawah 2°C (2DS) pada tahun 2050 maka emisi CO₂ pabrik semen di Indonesia harus dapat diturunkan pada kisaran 90-100 Kg CO₂eq/ton semen (Climate Action Tracker, 2020b) seperti terlihat pada gambar 1.2.

Tidak terdapatnya acuan target penurunan secara spesifik bagi industri semen dari pemerintah terutama kementerian terkait untuk menurunkan emisi CO₂ pada tahun 2050 menyebabkan industri semen tidak fokus dalam upaya penurunan emisi, hanya perusahaan yang telah terdaftar di pasar modal yang menerapkan target berkelanjutan pada tahun 2050.



Gambar 1. 2 Intensitas emisi ideal industri semen Indonesia untuk mencapai Paris Agreement (Climate Action Tracker, 2020a)

Beberapa penelitian telah meneliti upaya potensi pengurangan emisi industri semen (Xu et al., 2014). Terlepas dari asumsi skenario yang berbeda, emisi dasar dan metode, semua studi menganalisis peran empat opsi utama untuk upaya pengurangan emisi, juga disorot dalam peta jalan teknologi IEA (International Energy Agency, 2019) yaitu :

1. Peningkatan efisiensi termal dan listrik. Dengan cara aplikasi teknologi termutakhir di pabrik semen atau melakukan efisiensi energi di pabrik semen yang menggunakan teknologi lama.
2. Substitusi klinker, yaitu substitusi karbon intensif klinker dengan bahan rendah karbon (misalnya fly-ash, plester, tanah liat).
3. Penggunaan bahan bakar pengganti bahan bakar fosil (alternatif). Bahan bakar fosil rendah karbon atau bahan bakar netral karbon, seperti bahan bakar biomassa atau bahan bakar yang berasal dari limbah.
4. Penggunaan teknologi baru dan inovatif yang berkontribusi pada dekarbonisasi seperti penerapan teknologi Penangkap Karbon (*Carbon Capture Storage (CCS)*) pada proses pembuatan semen.

Referensi upaya dari IEA ini perlu untuk diterapkan pada industri semen Indonesia untuk mendapatkan hasil yang jelas bagi target berkelanjutan emisi industri beserta dengan langkah-langkah yang praktis dan dan secara mudah untuk dilaksanakan.

Berlandaskan pada kondisi yang telah dijelaskan diatas, maka diperlukan studi untuk memberikan masukan ilmiah bagi penentuan target berkelanjutan penurunan tingkat emisi industri semen di Indonesia untuk mendukung tercapainya upaya menahan laju kenaikan suhu bumi dibawah 2°C pada tahun 2050.

Model sistem dinamik akan dipergunakan dalam simulasi target penurunan emisi CO₂ industri semen ini, penggunaan sistem dinamik pada penelitian ini dikarenakan emisi CO₂ yang dikeluarkan oleh proses pembuatan semen merupakan sistem kompleks karena dipengaruhi oleh berbagai faktor yang saling mempengaruhi sehingga membentuk suatu sistem proses yang

dinamis. Faktor-faktor tersebut sangat sulit dianalisa oleh sistem linear atau polynomial, kemudian untuk dapat melihat perilaku sistem dapat diuji dengan berbagai macam skenario formulasi bentuk kebijakan dan dapat disimulasikan oleh model sistem dinamis, sehingga metode ini adalah salah satu cara untuk mendukung pengambilan keputusan praktis dan dapat melihat perubahan perilaku kebijakan yang lebih kompleks karena adanya arus skema umpan balik (Andhika, 2019).

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas permasalahan yang akan diteliti dijabarkan sebagai berikut:

1. Bagaimana proyeksi dibawah upaya apapun atau *business as usual* (BAU) penurunan emisi CO₂ industri semen Indonesia pada tahun 2050.
2. Bagaimana pendekatan simulasi kebijakan sistem dinamik terhadap target penurunan emisi CO₂ industri semen Indonesia pada tahun 2050.
3. Bagaimana strategi dan rekomendasi untuk dapat mencapai target penurunan emisi CO₂ berkelanjutan pada industri semen di Indonesia.

1.3. Tujuan Penelitian

Dari perumusan latar belakang tersebut di atas, tujuan yang hendak dicapai dalam penelitian ini adalah :

1. Mengidentifikasi dan menganalisis hubungan sebab akibat (causal loop) terhadap faktor-faktor pembuat emisi CO₂ yang berpengaruh pada emisi CO₂ di industri semen Indonesia berdasarkan data trend dan kondisi isu internal dan eksternal di Indonesia.
2. Membuat simulasi kebijakan secara sistem dinamik terhadap skenario upaya penurunan emisi CO₂ di industri semen Indonesia dari tahun 2020 sampai dengan 2050

3. Memberikan rekomendasi strategi untuk dapat mencapai target penurunan emisi CO₂ berkelanjutan pada industri semen di Indonesia.

1.4. Kegunaan Penelitian

Penelitian ini dimaksudkan untuk menyediakan saran praktik dan kebijakan yang dapat digunakan untuk menentukan target berkelanjutan penurunan emisi CO₂ pada industri semen bagi pihak yang berkepentingan (pemerintah, investor, pelanggan dan masyarakat) dan sebagai panduan bagi industri semen dalam menurunkan emisi CO₂.

BAB II

KAJIAN PUSTAKA DAN KERANGKA PEMIKIRAN

2.1. Industri Hijau (Green Industri)

Industri hijau merupakan salah satu pilihan untuk mengatasi masalah pencemaran dan kerusakan lingkungan yang saat ini terjadi, meskipun tidak secara sempurna tetapi dapat memperlambat kerusakan lingkungan. Industri hijau banyak dicoba diterapkan dalam perkembangan di banyak negara di dunia, khususnya sektor industri negara maju. Namun secara nasional, konsep “hijau” secara umum sudah mulai muncul dalam beberapa tahun terakhir namun belum sepenuhnya diterapkan. Konsep hijau berasal dari prinsip keberlanjutan (*sustainability*), kapabilitas dari ragam jenis sumber daya di planet ini untuk berinteraksi dengan sistem ekonomi dan sistem budaya manusia serta kemampuan beradaptasi mereka untuk mengatasi lingkungan dengan kondisi yang selalu berubah. Pembangunan berkelanjutan tidak mengesampingkan pentingnya kembang tumbuhnya ekonomi. Namun kemajuan ekonomi perlu dikembangkan untuk menjamin terpenuhinya kebutuhan dasar manusia saat ini dan di masa yang akan datang, yang disebut model pertumbuhan “hijau” dalam pembangunan pertumbuhan. Pertumbuhan hijau dianggap sebagai model revolusioner. Kerangka ini mengkritisi kerangka pemikiran pembangunan yang lama secara umum, yang harus menyentuh semua aspek, termasuk industri dan rumah tangga. (Saepudin et al., 2020)

United Nations Industrial Development Organization (UNIDO) mendefinisikan visinya untuk industri hijau sebagai berikut: Pemisahan utilitas dan industri, pertumbuhan ekonomi, pencegahan konsumsi sumber daya yang berlebihan dan pencemaran lingkungan. Ini mewakili dunia di mana industri dapat meminimalkan dan mendaur ulang semua jenis limbah. Sumber daya seperti bahan mentah dan bahan bakar, pekerja, masyarakat, iklim, dan pemerhati lingkungan. Industri hijau menawarkan peluang kreatif dan inovatif untuk meningkatkan kinerja ekonomi, ekologi dan sosial. Industri hijau adalah sebuah konsep yang bertujuan untuk mempromosikan pola konsumsi dan produksi yang berkelanjutan di industri manufaktur. Ini termasuk penciptaan industri hijau, termasuk produk yang ada,

dan industri hijau yang menyediakan produk dan layanan ramah lingkungan. Dalam industri hijau, produsen harus bertanggung jawab atas dampak lingkungan mereka selama siklus hidup produk atau layanan mereka. Tujuan dari industri hijau adalah:

1. Meningkatkan efisiensi industri tradisional dan rantai pasokan
2. Pengembangan produk baru seperti energi terbarukan, teknologi daur ulang, produksi makanan organik, dll.
3. Menciptakan jasa analisis dan konsultasi lingkungan sebagai perusahaan jasa energi, termasuk analisis dan perhitungan jejak ekologis
4. Menciptakan jasa baru yang bersih dan ramah lingkungan seperti ekowisata (UNIDO, 2011)

Sektor industri berperan penting dalam mendukung pertumbuhan ekonomi hijau. Oleh karena itu model pengembangan industri juga perlu bergerak menuju model industri hijau yang juga dikenal sebagai industri hijau. Industri hijau sebagaimana disampaikan Yeonok Choi dalam artikelnya membahas dasar prinsipal yang terkandung dalam “*Low Carbon Green Growth Law*” tahun 2010 (Yeonok Choi, 2010) menjelaskan bahwa industri hijau adalah kegiatan yang:

1. meningkatkan efisiensi energi dan sumber daya di lingkungan. ekonomi secara keseluruhan dan
2. mengurangi emisi gas rumah kaca dan polusi dan mencapai pertumbuhan hijau rendah karbon melalui produk dan layanan yang memperbaiki lingkungan.

Dalam UU RI No. 3 tahun 2014 (UU_Perindustrian_No_3_2014, 2014) tentang perindustrian menyatakan bahwa Industri hijau adalah industri yang berkelanjutan. Produksinya mendukung penggunaan sumber daya yang efisien dan efektif secara berkelanjutan untuk menyelaraskan pembangunan industri dan melestarikan fungsi lingkungan dan dapat memberi manfaat bagi masyarakat. Untuk pembangunan industri berkelanjutan pemerintah Indonesia telah memulai pada masa era presiden Susilo Bambang Yudhono dengan sejak tahun 2008 ketika pemerintah Indonesia mengeluarkan Peraturan Presiden No. 28 Tahun 2008 yang mengarahkan kebijakan industri nasional yang selaras dengan tujuan

pembangunan industri jangka panjang.

Untuk memperkuat pelaksanaan pengembangan industri hijau tersebut, pemerintahan republik Indonesia telah memasukkan aspek industri hijau menjadi 11 prioritas Rencana Pembangunan Jangka Menengah Nasional tahun 2010. Indonesia juga memasukkan konsep industri hijau. menjadi UU Perindustrian No. 3 Tahun 2014. Penerapan industri hijau yang merupakan komitmen Indonesia tetap berlandaskan pengaruh oleh beberapa mekanisme internasional antara lain: Protokol Kyoto 1997 yang mengamandemen Konvensi Kerangka Kerja PBB tentang Perubahan Iklim (UNFCCC) terkait dengan kesepakatan internasional tentang upaya mengatasi pemanasan global; Standar Inggris BSI: 7750 saat ini digunakan sebagai ISO 14001 dan Skema Pengelolaan dan Audit Lingkungan (Kementrian Perindustrian, 2012)

Pada periode 2010-2019 dengan 11 kegiatan atau target dari prioritas dalam pelaksanaan di bidang industri hijau memberikan hasil yang positif. Beberapa indikator menjadi tanda yaitu:

Penghargaan PROPER dan SIH terhadap pengelolaan lingkungan perusahaan meningkat dari 66% pada tahun 2010 menjadi 69% pada tahun 2011-2012.

Pada saat yang sama upaya pengelolaan lingkungan terutama upaya pengurangan gas rumah kaca (GRK) dan pengurangan beban pencemar untuk mencapai pembangunan berkelanjutan juga telah dimulai.

Berdasarkan data dari KLHK telah menunjukkan bahwa laju deforestasi menurun dari 8.300.00 ha pada kurun tahun 2006 hingga 2009 menjadi 50.000 Ha per tahun 2009-2011.

Kegiatan Program Pemeringkatan (PROPER) dimaksudkan untuk mendorong perusahaan mengurangi polusi dan emisi. sementara itu Upaya pemadaman kebakaran lahan hutan juga berhasil mengurangi angka *hotspot* di pulau Sumatera Kalimantan dan Sulawesi (PROPER, 2021)

Kebijakan lain Presiden Joko Widodo adalah Peraturan Menteri Perindustrian Republik Indonesia (Permenperin) Nomor 39 Tahun 2018 tentang Tata Cara Sertifikasi Industri Hijau. Peraturan ini memberikan kerangka bagi sertifikasi industri hijau khususnya pengakuan lembaga sertifikasi industri hijau untuk

menyatakan bahwa perusahaan industri telah memenuhi SIH. Lembaga Sertifikasi Industri Hijau yang selanjutnya disebut LSIH adalah badan yang berwenang menyelenggarakan kegiatan sertifikasi Industri Hijau. Perusahaan industri yang telah disertifikasi sebagai industri hijau dapat menggunakan logo industri hijau. Logo Industri Hijau dapat dipakai pada: label kemasan produk, kop surat perusahaan, kartu nama perusahaan dan brosur perusahaan.

Panduan Proses Sertifikasi Industri Hijau untuk yang dilakukan oleh LSIH untuk berdasarkan Standar atau Spesifikasi Industri Hijau dan SNI ISO 17065 yang pada terkait penilaian kepatuhan terhadap persyaratan lembaga sertifikasi produk dan jasa.

Salah satu industri yang menjadi perhatian adalah industri semen yang termasuk dalam kelompok industri kimia farmasi dan tekstil (IKFT), seperti diketahui bahwa industri semen adalah pemakai energi terbesar dan penghasil pencemar CO₂ terbesar dalam kelompok IKFT, sehingga seluruh industri semen diwajibkan untuk dilakukan sertifikasi wajib industri hijau (SIH), Kementerian perindustrian adalah regulator dan penanggung jawab untuk pelaksanaan sertifikasi industri hijau yang mana telah dijelaskan diatas sertifikasi di laksanakan oleh Lembaga Standar Industri Hijau yang dikelola oleh Badan pusat industri hijau pada kementerian perindustrian. Standar industri hijau bagi industri semen berpedoman pada standar SIH 23941.1:2015 (Kemenperin, 2015) dan diperbaharui dengan terbitnya standar baru pada peraturan Kemenperin no 26 tahun 2018 tentang SIH (Permenperin_No_26_Tahun_2018_SIH Semen, 2018). Pada standar ini juga diatur parameter-parameter yang sebagian besar berhubungan dengan batasan penggunaan energi dan cemaran CO₂ yang berhubungan dengan penelitian ini diantaranya adalah :

- Penggunaan bahan bakar alternatif biomasa atau non biomassa yang diekspresikan dalam rasio penggantian sumber energi panas (*thermal substitution rate*) sebesar minimal 1% (satu persen)
- Rasio klinker terhadap semen untuk tipe PPC (portland pozzolan cement) dan PCC (portland composite cement) maksimal 82%,
- Emisi gas rumah kaca pada proses pembuatan semen sebesar maksimal

750 Kg/CO₂eq/ton semen

- Penggunaan energi listrik spesifik sebesar 100 -120 Kwh/ton cement tergantung pada kapasitas dan tahun pembuatan pabrik
- Penggunaan energi panas spesifik sebesar 860 – 1050 Kkal/Kg klinker tergantung pada kapasitas dan tahun pembuatan pabrik

Sejak diberlakukannya standar industri hijau ini, sebagian besar pabrik semen telah dapat memenuhi standar ini, tercatat pabrik semen dibawah grup semen Indonesia yang menguasai pangsa pasar penjualan semen Indonesia telah semua tersertifikasi SIH, sehingga standar ini dianggap terlalu longgar karena pihak industri semen telah banyak melakukan berbagai upaya yang melampaui standar ini.

2.2.Paris Agreement dan Sustainable Development Goals (SDG's)

Perubahan iklim memiliki dampak besar pada semua negara dan wilayah. Problem ini akan mempengaruhi kondisi ekonomi secara nasional dan berpengaruh juga terhadap kondisi social juga berdampak pada manusia, komunitas dan negara saat ini, dan mungkin lebih banyak lagi pada masa mendatang. Dampak perubahan iklim terlihat pada pola cuaca yang tidak menentu, kenaikan permukaan laut, cuaca tidak normal, mencairnya sebagian besar es di kutub juga mempengaruhi kondisi *biodiversity* (keanekaragaman hayati) dan lain sebagainya. Untuk mengatasi perubahan iklim ini salah satu upaya ialah Perjanjian Paris atau *Paris Agreement* adalah perjanjian di bawah *United Nations Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC) tentang pengurangan emisi gas rumah kaca, adaptasi dan pembiayaan. Kesepakatan tersebut diharapkan mulai berlaku pada tahun 2020, kesepakatan ini dirundingkan oleh perwakilan dari 195 negara pada Konferensi Perubahan Iklim Perserikatan Bangsa-Bangsa ke-21 di Paris, Prancis (COP-21). Setelah proses negosiasi, kesepakatan ditandatangani di New York, AS pada hari Bumi, 22 April 2016. Per Maret 2017 ada 194 negara telah menandatangani perjanjian tersebut, 141 di antaranya telah meratifikasinya dan pada tanggal 22 April 2016 Indonesia menandatangani perjanjian ini. Persentase gas rumah kaca yang diratifikasi Indonesia adalah 1,49% artinya Indonesia juga berkontribusi terhadap emisi

rumah kaca global dan kenaikan suhu bumi (Alisjahbana et al., n.d.)

Tujuan dibuatnya Paris Agreement diatur dalam Pasal 2 yaitu :

1. Menahan kenaikan suhu global di bawah tingkat pra-industri di bawah 2°Celsius (2DS) dan membatasi perubahan suhu setidaknya 1,5 ° Celcius bahwa pembatasan ini secara signifikan mengurangi risiko dan dampak perubahan cuaca.
2. Meningkatkan kemampuan beradaptasi terhadap hasil perubahan iklim, meningkatkan ketahanan iklim, dan menerapkan pengembangan pembangunan yang rendah emisi gas rumah kaca tanpa membahayakan produksi pangan.
3. Membuat aliran dana finansial yang konsisten untuk mencapai pembangunan yang tahan terhadap gas rumah kaca dan perubahan iklim.

Keterkaitan *Paris agreement* dengan SDG's adalah sangat erat karena diakomodirnya perubahan iklim (*Climate Change*) pada salah sasaran dari SDG's meskipun sasaran tercapainya 2DS pada *Paris Agreement* pada tahun 2050 tetapi SDGs adalah visi dari keadaan dunia secara keseluruhan pada. 2030 seperti yang terlihat pada gambar dibawah ini



Gambar 2. 1 Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (BAPPENAS, 2017)

SDGs berisi 17 tujuan dengan total 169 indikator. Mengingat tujuan pencapaian yang telah ditetapkan, lahirnya SDGs tidak terlepas dari kritik tajam. Hasilnya

lebih kompleks dan ada banyak MDGs yang hanya mempunyai 8 gol, ada beberapa yang tersisa MDG. Oleh karena itu, tidak heran jika SDGs dipandang sebagai visi global yang terlalu ambisius. Cara lain untuk melihatnya adalah, sebaliknya, ambisi ini diperlukan untuk bisa “memaksa” semua pihak berkontribusi untuk memecahkan masalah pembangunan utama di dunia, Ketimpangan dan kerusakan lingkungan. Selain itu, terdapat perbedaan prinsip persiapan antara SDGs dan MDGs. Memberi harapan bahwa dunia akan berubah menjadi tempat untuk hidup lebih baik di dalamnya. Pada dasarnya, MDGs masalah pembangunan di negara berkembang dan berkembang, Dimana negara maju berperan lebih besar sebagai donor. Di sisi lain, prinsip utama SDGs adalah tujuan pembangunan yang dapat diterapkan secara universal dan dapat diterapkan untuk semua orang, tidak hanya untuk semua negara industri tetapi juga negara berkembang.

Pembangunan berkelanjutan adalah pembangunan yang menyelaraskan tujuan baik secara ekonomi, sosial, ekologi dan kenegaraan atau kelembagaan. Misalnya, pertumbuhan ekonomi yang tinggi perlu dikaitkan secara erat melalui penciptaan lahan ekonomi, melalui pemerataan pendapatan bekerja dengan upah layak. Hal ini dikarenakan adanya perbedaan pendapatan sehingga dapat menimbulkan konflik sosial baik secara vertikal maupun horizontal. Selain itu, pertumbuhan ekonomi harus ramah lingkungan yang tidak mencemari atau berlebihan dalam penggunaan sumber daya alam.

Pilar pertama SDGs didasarkan pada pedoman ini 5P: *people, planet, prosperity, peace, dan partnership*. Pilar 5P dapat diartikan sebagai berikut.:

- *People*: SDGs memastikan bahwa semua orang bebas dari kemiskinan, kelaparan, kesetaraan, dan mendapatkan hak untuk hidup dengan bermartabat.
- *Planet*: SDGs melindungi bumi dari efek negatif dari aktivitas manusia dan konsumsi sumber daya yang tidak bertanggung jawab
- *Prosperity*: SDGs adalah untuk memastikan bahwa setiap orang memiliki hidup yang baik berkecukupan secara layak,, mandiri dan menjalani kehidupan yang kompeten selaras dengan alam.

- *Peace* : Tidak ada Pembangunan berkelanjutan tanpa perdamaian dan jaminan social dan sebaliknya
- *Partnership*: Pembangunan Keberlanjutan hanya dapat dicapai melalui kerja sama global yang erat Ikuti prinsip solidaritas yang tinggi.

Seperti dibahas di atas, SDGs adalah visi global bersama mewakili kepentingan semua pihak. Selain itu, negara yang berpartisipasi dalam KTT Keberlanjutan PBB SDGs adalah jalan umum menuju 2030, dengan slogan “ *No Left behind*” yang merupakan pilar kedua dari SDG’s.

Pemerintah Indonesia juga telah memberlakukan Undang-Undang Nomor 16 Tahun 2016 untuk meratifikasi Paris Agreement dan dituangkan dalam Nawa Cita, Pemerintah Indonesia yang memiliki sembilan prioritas pembangunan nasional memiliki iklim rendah karbon dengan mengadaptasi dan memitigasi perubahan iklim sebagai prioritas lintas sektoral yang terintegrasi dalam agenda pembangunan nasional dan arah pembangunan yang tahan terhadap perubahan.

Komitmen ini tertuang dalam Nawa Cita dan menjadi landasan bagi penyusunan dokumen *Nationally Determined Contribution* (NDC) pertama Indonesia yang diserahkan ke *United Nations Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC) pada November 2016. NDC pertama di Indonesia menguraikan emisi rendah masa depan Indonesia dan transisi menuju ketahanan perubahan iklim. NDC berencana untuk mengurangi emisi sebesar 29% menjadi 41% pada tahun 2030 dengan dukungan internasional dan akan digunakan sebagai dasar untuk mengimplementasikan inisiatif perubahan iklim. Persentase emisi dari masing-masing sektor yaitu sektor kehutanan (17,2%), energi (11%), pertanian (0,32%), industri (0,10%), dan limbah (0,38%). Dari perspektif adaptasi, upaya Indonesia termasuk meningkatkan ketahanan ekonomi, jaminan sosial, mata pencaharian dan ketahanan ekosistem dan lanskap untuk melindungi sumber daya pangan, air dan energi.(Agung Sugardiman et al., 2018)

Dengan terbitnya Undang-Undang Nomor 16 Tahun 2016 ini berimplikasi terhadap penyelenggaraan pemerintahan adalah seluruh jajaran pemerintah pusat hingga daerah harus menyeleraskan kegiatannya dengan tujuan pembangunan

berkelanjutan (TPB) dengan diterbitnya Peraturan Presiden No 59 Tahun 2017 tentang Peta Jalan (roadmap) Nasional TPB berisi kebijakan strategis langkah-langkah untuk pencapaian TPB dari tahun 2017 sampai dengan 2030 yang selaras dengan sasaran pembangunan nasional (Setneg RI, 2017). Peraturan ini memandatkan beberapa hal, di antaranya,

- (1) arahan kepada Bappenas untuk menyiapkan peta jalan Indonesia hingga tahun 2030 dan
- (2) perencanaan nasional dalam pembentukan Rencana Aksi Nasional (RAN) SDGs

Sehingga Bappenas sebagai pengarah TPB di Indonesia menyiapkan indikator-indikator pencapaian sesuai dengan konsep SDG's global, diantaranya adalah dengan terbitnya buku metada pilar pembangunan yang terdiri dari pilar sosial yang berkaitan dengan SDG no 1- 5, pilar ekonomi (SDG's no 7-10 dan 17), pilar lingkungan (6, 11-15) dan pilar hokum (SDG's no 16) . Perubahan iklim termasuk dalam tujuan ke-13 SDGs dan termasuk pilar lingkungan dalam buku metadata Bappenas (Bappenas, 2020). Berkaitan erat dengan perubahan iklim yaitu ditetapkan indikator 13.2 tentang mengintegrasikan tindakan antisipasi perubahan iklim ke dalam kebijakan, strategi dan perencanaan nasional dengan sub indicator sebagai berikut :

- INDIKATOR 13.2.1:

Terwujudnya penyelenggaraan inventarisasi gas rumah kaca (GRK), serta monitoring, pelaporan dan verifikasi emisi GRK yang dilaporkan dalam dokumen *Biennial Update Report* (BUR) dan National Communications

- INDIKATOR 13.2.2 : Jumlah emisi gas rumah kaca per tahun
- INDIKATOR 13.2.2.(a) Potensi penurunan emisi gas rumah kaca
- INDIKATOR 13.2.2.(b) Potensi penurunan intensitas emisi gas rumah kaca

Inventerisasi gas rumah kaca dilakukan oleh KLHK pada ditjen PPI (Pengendalian Perubahan Iklim), laporan disampaikan setiap tahun untuk 6 sektor penghasil emisi gas rumah kaca dalam laporan inventerisasi GRK dan monitoring, pelaporan dan verifikasi nasional yang mempresentasikan profil emisi GRK, hasil capaian pengurangan emisi GRK dari aksi migitasi yang dilakukan setiap sektor

dan rencana perbaikannya seperti yang telah dijelaskan diatas.

2.3. Semen

Semen merupakan produk industri dari reaksi antara *raw material* berupa batu kapur sebagai bahan baku utama dan *silica clay* (tanah liat) dengan hasil akhir berupa semen yang dapat mengeras atau membatu bila dicampurkan dengan air karena terjadi reaksi hidrasi. Senyawa kalsium oksida (CaO) dan kalsium karbonat (CaCO₃) adalah senyawa yang terdapat pada batu kapur sedangkan silikaoksida, aluminium oksida, besi oksida dan magnesium oksida adalah senyawa mayoritas yang terdapat padatanah liat (*silica clay*). Untuk menghasilkan semen, bahan baku tersebut dibakar sampai membentuk klinker yang kemudian mengalami proses *grinding* (penghalusan) dan dicampur dengan tambahan bahan seperti *gypsum* (Ca₂SO₄) dalam jumlah yang sesuai (S P Deolalkar, 2009).

Semen digunakan untuk berbagai macam keperluan seperti pembangunan rumah, gedung, jalan, bendungan dan lainnya. Jenis semen dapat beranekaragam sesuai dengan penggunaannya. *Ordinary portland cement* (OPC) dan *Portland composite cement* (PCC) adalah tipe jenis semen yang sering digunakan dalam berbagai macam keperluan. OPC memiliki standar di Indonesia dalam SNI 15-2049-2015 dan dalam standar eropa EN 197-1:2011 (SNI-2049-2015 Semen Portland, 2015). PCC memiliki standar di Indonesia dalam SNI 15-7064-2014 dan dalam standar Eropa dalam EN 197-1:2011 (Standar Nasional Indonesia Semen Portland Komposit, 2014). OPC terbagi menjadi 5 jenis semen yaitu OPC tipe 1 hingga tipe 5 (Permenperind_No.18_2012_SNI Wajib, 2012). OPC tipe 1 memiliki kemiripan fungsi dengan PCC yang banyak digunakan oleh masyarakat. Standarisasi jenis semen penting dilakukan agar dapat menjaga kualitas semen yang digunakan. Secara umum penggunaan OPC dan PCC memiliki kecenderungan peningkatan setiap tahunnya. Penggunaan PCC setiap tahunnya mengalami peningkatan signifikan dibandingkan dengan OPC. Oleh dikarenakan PCC banyak dikonsumsi oleh rumah tangga yang merupakan mayoritas pengguna semen di Indonesia. Selain itu PCC lebih ramah lingkungan dibandingkan dengan OPC khususnya OPC tipe 1 karena kandungan klinker dalam PCC lebih rendah dibandingkan OPC yang telah digantikan oleh material alternatif (Indocement et

al., 2017). Standarisasi SNI pada jenis semen tergantung penggunaan klinker dalam semen dimana semen tipe PPC dan PCC adalah semen yang memperoleh porsi terbesar penggunaan klinker dengan kualitas yang telah ditetapkan. Industri semen berusaha memanfaatkan standar ini untuk mengurangi emisi CO₂ dengan menambahkan bahan alternatif (mengurangi faktor klinker) dimana semakin banyak penggunaan bahan alternatif akan semakin sedikit membutuhkan klinker yang menghasilkan emisi CO₂ dari pembakaran klinker (penggunaan energi) dan pelepasan CO₂ dari proses kalsinasi.

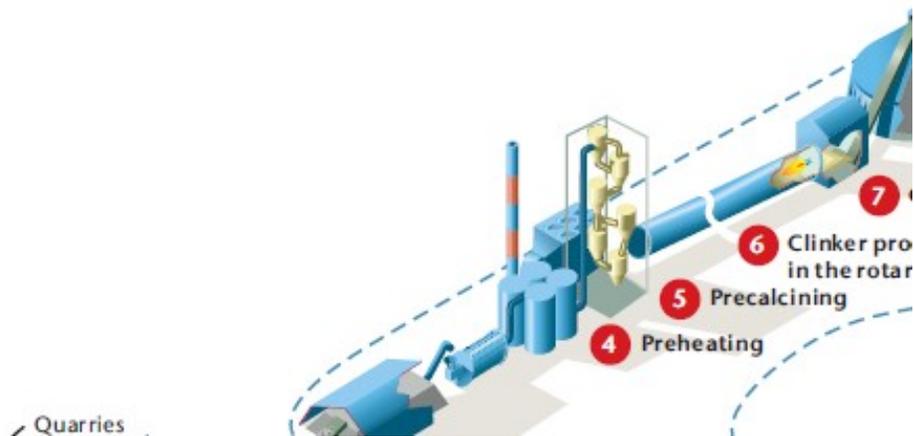
Pada standar SNI 15-0302:2014 (PPC) menyebutkan bahwa penggunaan material aditif seperti pozzolan berkisar 6% - 40% dan gypsum sebanyak 3% atau total 43% material pozzolan dapat mengurangi klinker dalam semen (BSN, n.d.) dan standar SNI 7064:2014 memperbolehkan campuran material aditif seperti limestone, GBFS (*ground blast furnace*), silika atau pozzolan berkisar 6% – 35% dan gypsum 3% atau total 38% pengganti klinker. (Standar Nasional Indonesia Semen Portland Komposit, 2014).

2.4. Proses Pembuatan Semen

Pembuatan semen adalah proses tiga tahap: persiapan bahan baku, produksi klinker dan penggilingan klinker dengan komponen lain untuk menghasilkan semen seperti terlihat pada gambar 6. Bahan baku yang berbeda dicampur dan digiling menjadi bubuk homogen, klinker diproduksi di kiln suhu tinggi di mana: emisi langsung CO₂ terjadi. Biasanya, 30-40% dari emisi CO₂ langsung berasal dari pembakaran bahan bakar; sisanya 60-70% berasal dari reaksi kimia yang terlibat dalam mengubah batu kapur kalsium oksida, prekursor untuk pembentukan kalsium silikat, yang memberikan kekuatan semen. Klinker kemudian digiling dengan gypsum untuk menghasilkan semen. Komponen lainnya, termasuk abu terbang (*fly ash*), *ground granulated blast furnace slag* (GGBFS) dan batu gamping halus, dapat ditumbuk atau dicampur tergantung pada properti teknis yang diperlukan dari semen yang sudah jadi.

Semen dapat diproduksi pada pabrik lengkap yang mempunyai tanur (*kiln*) hingga penggilingan semen atau pada pabrik penggilingan/pencampuran terpisah. Semen campuran atau "kombinasi" juga bisa diproduksi di pabrik beton. Ada dua tipe

dasar produksi klinker: yaitu “basah” atau “kering” tergantung pada kelembaban bahan baku, dan perbedaan desain kiln. Proses basah mengkonsumsi lebih banyak energi daripada proses kering, karena kebutuhan kelembaban tersebut diperlukan proses penguapan. Proses pembuatan semen cukup rumit dan membutuhkan kontrol formulasi kimia dan melibatkan beberapa langkah yang membutuhkan peralatan khusus.



Gambar 2. 2. Proses Pembuatan Semen (International Energy Agency, 2019)

Proses pembuatan semen sesuai dengan nomor yang tertera pada gambar 6 dijelaskan sebagai berikut :

1. Penggalian bahan baku

Endapan berkapur yang terjadi secara alami, seperti batu kapur, napal atau kapur, berupa kalsium karbonat, yang merupakan bahan utama untuk semen. Kemudian diekstraksi dengan alat berat dari tambang, sejumlah kecil bahan lain, seperti bijih besi, bauksit, tanah liat atau pasir, juga dapat digali dari endapan untuk menyediakan oksida besi, alumina, dan silika yang dibutuhkan dalam komposisi campuran kimia untuk memenuhi proses dan produk persyaratan pembuatan semen.

2. Penghancuran bahan baku

Bahan yang digali kemudian dihancurkan dengan alat *crusher*, biasanya berukuran kurang dari 10 sentimeter, dan diangkut ke pabrik semen.

3. Penyiapan bahan baku (*Raw Meal*)

Bahan baku dicampur untuk mencapai komposisi kimia yang dibutuhkan dalam proses yang disebut “pra-homogenisasi”. Bahan yang dihancurkan kemudian digiling untuk menghasilkan bubuk halus yang disebut “*raw meal*”. Kimia bahan baku dan *raw meal* dipantau dan dikendalikan, untuk memastikan kualitas semen yang tinggi dan hasil yang konsisten.

4. Pemanasan awal dan pemrosesan bersama

Pre-heater adalah serangkaian siklon vertikal di mana *raw meal* dilewatkan. Selama proses ini, *raw meal* bersentuhan dengan gas buang kiln panas yang berputar-putar yang bergerak ke arah yang berlawanan. Energi panas diperoleh kembali dari gas buang panas di siklon ini, dan *raw meal* dipanaskan terlebih dahulu sebelum memasuki kiln. Oleh karena itu, reaksi kimia terjadi dengan cepat dan efisien. Tergantung pada kadar air bahan baku, pada kiln yang modern memiliki hingga enam tahap siklon dengan peningkatan pemulihan panas pada setiap tahap. Suhu *raw meal* dinaikkan hingga lebih dari 900 ° C.

5. Produksi semen dapat memproses bersama limbah dan produk sampingan yang dihasilkan dari limbah industri dan limbah kota lainnya, sebagai bahan untuk *raw meal* atau sebagai bahan bakar untuk pemrosesan panas. Limbah dan produk sampingan sangat bervariasi dalam sifat dan komposisi kelembaban. Mereka mungkin perlu disortir, dipotong-potong dan dikeringkan sebelum dimasukkan ke dalam semen kiln.

4. Prakalsinasi

Kalsinasi adalah penguraian batu gamping menjadi kapur. Ini terjadi di “*precalciner*” di sebagian besar proses. Ini adalah ruang bakar di bagian bawah preheater di atas kiln, dan sebagian berada di kiln. Di sini terjadi dekomposisi kimia dari batu kapur menjadi kapur dan CO₂ biasanya menghasilkan 60-70% dari total emisi CO₂. Pembakaran bahan bakar menghasilkan sisa emisi karbon. Sekitar 65% dari semua bahan bakar dibakar

dalam langkah proses ini.

5. Memproduksi klinker di *rotary kiln*

Bahan hasil prakalsinasi kemudian memasuki kiln. Bahan bakar ditembakkan langsung ke kiln untuk mencapai suhu hingga 1450 °C. Saat kiln berputar (sekitar tiga sampai lima kali per menit), material meluncur dan jatuh melalui zona yang semakin panas menuju nyala api. Panas yang hebat menyebabkan reaksi kimia dan fisik yang sebagian melelehkan *raw meal* menjadi klinker. Reaksi di kiln meliputi penyelesaian kalsinasi batu gamping yang belum terjadi di *precalciner* dan emisi CO₂ dari mineral gabungan CO₂ lainnya. CO₂ yang dilepaskan dari bahan baku selama produksi disebut sebagai “emisi CO₂ proses”.

6. Pendinginan dan penyimpanan

Klinker panas dari kiln didinginkan dari lebih dari 1000 ° C hingga 100 ° C dengan cepat pada *grate cooler*, yang meniupkan udara pembakaran yang masuk ke klinker. Blower udara menggunakan listrik dan sirkulasi udara panas yang ditiup untuk meningkatkan efisiensi termal. Pabrik semen akan memiliki penyimpanan klinker antara produksi klinker dan proses penggilingan semen. Klinker dapat dimuat ke transportasi, dan kemudian dapat diperdagangkan atau diproses lebih lanjut menjadi semen.

7. Pencampuran

Klinker dicampur dengan komponen mineral lainnya untuk membuat semen. Semua jenis semen mengandung sekitar 3-5% gipsum untuk mengontrol waktu pengikatan semen. Klinker, fly ash, batu kapur atau bahan lainnya dapat ditumbuk atau dicampur untuk menggantikan bagian dari klinker. Ini menghasilkan semen campuran

8. Penggilingan

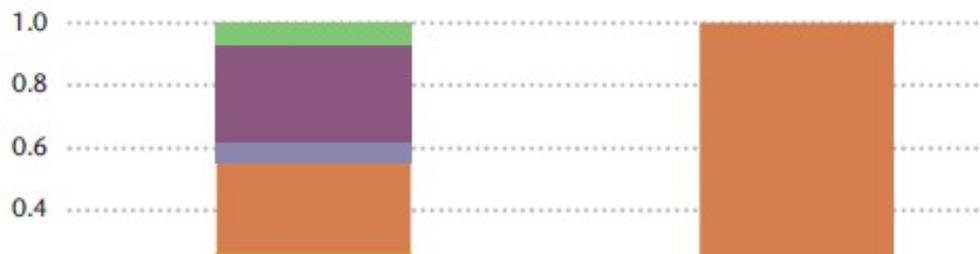
Campuran klinker dan gipsum yang didinginkan digiling menjadi bubuk abu-abu, yang dikenal sebagai semen Portland (OPC), atau digiling dengan komponen mineral lain untuk membuat semen campuran (PCC). *Ball mill* secara tradisional telah digunakan untuk menggiling, meskipun *roller press* dan mill vertikal sering digunakan di pabrik modern karena efisiensi

energinya yang lebih baik dari pada mesin *Ball Mill*.

9. Penyimpanan semen dalam silo

Untuk memuat dan mengemas produk akhir berupa semen disimpan dalam silo semen yang dihomogenisasi untuk pengiriman. Semen dikemas dalam kantong semen atau dimuat dalam jumlah besar berbentuk curah untuk transportasi ke pelanggan.

6. Setiap tahap proses pembuatan semen membutuhkan energi. Listrik digunakan untuk menjalankan penggilingan peralatan pemuatan, dan bahan bakar digunakan untuk menyediakan energi panas yang dibutuhkan dalam kiln dan *precalciner* untuk reaksi kimia yang diperlukan untuk menghasilkan klinker (Gambar 2.3). Dengan demikian, produksi klinker menghasilkan emisi CO₂ langsung karena untuk pembakaran bahan bakar dan karbon yang dilepaskan dari bahan baku.



Gambar 2. 3. Komposisi penggunaan energi listrik dan panas pembuatan semen (International Energy Agency, 2019)

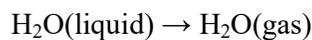
2.5. Reaksi Kimia Pembuatan Semen

Pada proses pembuatan semen secara reaksi menghasilkan emisi CO₂ terbesar pada reaksi kalsinasi dimana terjadi perubahan CaCO₃ yang dipanaskan dan melepaskan CO₂ ke udara, disamping itu pula proses dehidrasi sampai dengan klinkerisasi membutuhkan energi sangat besar. Sehingga perhitungan emisi CO₂ industri semen salah satunya dihitung berdasarkan reaksi ini disamping juga penyumbang emisi CO₂ lainnya seperti penggunaan energi (listrik dan bahan bakar), sehingga metode perhitungan emisi CO₂ dilakukan sebagai emisi CO₂ equivalent sesuai dengan *guideline IPCC (Intergovernmental Panel on Climate*

Change) bukan berdasarkan pengukuran emisi CO₂ secara langsung (IPCC, 2006). Berikut adalah tahapan reaksi pembuatan semen :

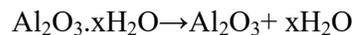
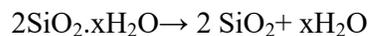
2.5.1. Penghilangan air (Dehidrasi)

Reaksi penghilangan air (*dehidrasi*) terjadi pada fase padat dan mempunyai sifat reaksi searah (*irreversible*). Reaksi ini berlangsung dalam pemanas suspensi yang diperasikan pada suhu 100° hingga 700 ° C dan tekanan 7,72- 5,86 bar. Reaksi ini melibatkan penguapan air bebas dan penguapan air terikat yang terkandung dalam bahan baku. Reaksinya adalah sebagai berikut:



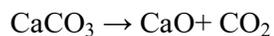
Penguapan air hidrat : Air terikat menguap pada suhu 400 - 700°C yang terjadi pada kristal hidrat dari silika (tanah liat).

Reaksinya adalah sebagai berikut:



2.5.2. Kalsinasi

Reaksi kalsinasi juga terjadi pada fase solid dan gas yang bersifat reaksi satu arah (*irreversible*). Reaksi dilakukan pada pemanas suspensi (*suspension preheater*) dan *preheater*. Kondisi operasi adalah 700° hingga 900 ° C. Reaksinya adalah sebagai berikut:



2.5.3. Klinkerisasi

Reaksi klinkerisasi berlangsung dari fasa *liquid* dan bersifat eksotermis. Reaksi ini terjadi pada tanur yang berputar (*Rotary Kiln*) dengan kondisi operasi 850° - 1450°C dan pada tekanan 4,1 – 7,4 bar. Reaksinya meliputi pembentukan C2S (*dicalcium silicate*), C3S (*tricalcium silicate*), C3A (*tricalcium aluminat*), dan C4AF (*tetracalsium aluminoferric*). Reaksinya adalah sebagai berikut:

- Senyawa semen C2S terbentuk dari reaksi sebagai berikut :



- Senyawa semen C3A dan C4AF terbentuk dari reaksi sebagai berikut



$4\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow 4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ atau C4AF terjadi pada suhu 900° sampai dengan 1250°C.

- Reaksi pembentukan senyawa semen C3S

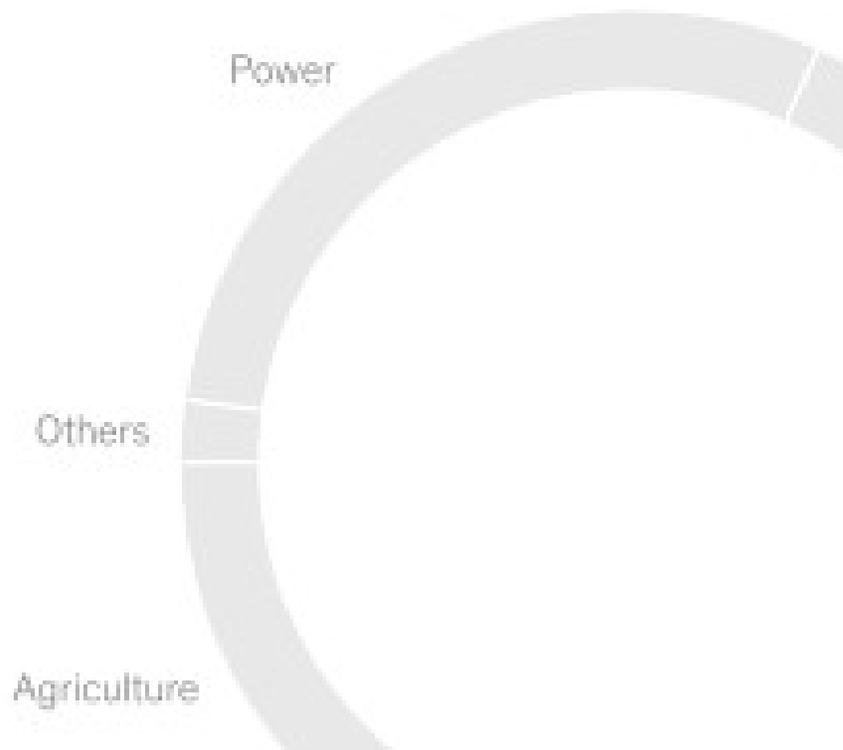
$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 + \text{CaO} \rightarrow 3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ atau C3S berlangsung pada suhu 1250° – 1450°C

2.6. Pencemaran Produksi Semen

Proses pembuatan semen di industri semen menghasilkan berbagai jenis pencemaran yang berdampak negatif terhadap lingkungan. Industri semen berdampak negatif terhadap lingkungan seperti pemanasan bumi, hujan asam, eutrofikasi, ozon fotokimia, penipisan ozon, degradasi abiotik, beracun (*toxicification*) bagi manusia, beracun bagi air dan laut, beracun bagi tanah. Industri semen juga memiliki dampak lingkungan terhadap tanah dan air. Di darat dapat menurunkan kesuburan tanah terjadi karena pada saat penambangan lapisan tanah atas di ekstraksi sebagai bahan baku tanah liat. Kemudian terjadi perubahan tata guna tanah akibat pembangunan dari pekerjaan dan penambangan di pabrik semen sehingga mengurangi daya tampung air tanah dan mempengaruhi volume air di daerah sekitar pabrik semen. Industri semen juga berdampak pada penurunan mutu air permukaan akibat limbah cair yang dikeluarkan oleh pabrik berupa air limbah dari operasi penambangan (Song et al., 2016). Selain itu, debu merupakan salah satu polutan utama dalam industri semen, debu yang dihasilkan oleh kegiatan industri semen meliputi debu yang dihasilkan selama penyediaan bahan baku, debu yang dihasilkan selama pembakaran, debu diakibatkan oleh transportasi selama pengangkutan bahan baku ke pabrik dan cemaran debu dari proses manufaktur dan debu dari transportasi produk semen untuk dikirim pada pelanggan. Debu dapat menjadi pencemar yang dapat mempengaruhi lingkungan dan manusia, mempengaruhi terjadinya penyakit atau gangguan pernafasan (Adha RN et al., 2012). Saat ini, pada sektor industri terutama industri semen semakin diperhatikan oleh para pemerhati lingkungan karena berbagai dampak tersebut di atas. Isu emisi ini berkaitan erat dengan pembangunan berkelanjutan, khususnya industri semen di masa depan. Berdasarkan literatur industri semen mempunyai dampak terutama adalah konsumsi energi yang tinggi dan emisi gas

rumah kaca yang berkontribusi terhadap perubahan cuaca (Güereca et al., 2015) . Karbon dioksida merupakan emisi gas rumah kaca utama dalam industri semen (Kajaste & Hurme, 2016). Karena emisi yang dihasilkan dari proses produksi semen sangat besar, lebih tepatnya lebih dari 600 Kg CO₂eq per ton klinker yang dihasilkan (KLHK & Dirjen PPI, 2021), bahkan industri semen berkontribusi 5%-7% dari total jumlah emisi global (Hasanbeigi et al., n.d.) (Reza et al., 2013) (Mantlana & Maoela, 2020). Sedangkan menurut Mckinsey Company (Mckinsey Company, 2017) dan CEMBERAU (CEMBERAU, 2017) industri semen menyumbang sebesar 7% -8% total emisi CO₂ global seperti terlihat pada gambar dibawah ini

Share of global CO₂ emissions, % in 2017



Gambar 2. 4. Emisi total CO₂ global (Mckinsey Company, 2017)

Meningkatkan efisiensi pembakaran dalam produksi semen dapat mengurangi