



UNIVERSITAS INDONESIA

**PEMANFAATAN LIMBAH CO₂ DENGAN PENDEKATAN
PRODUKSI BERSIH**

**(Kajian Pemanfaatan oleh PT. Krakatau Steel dan PT. Resources
Jaya Management Indonesia Krakatau Karbonindo, Cilegon
Banten)**

**Tesis ini diajukan sebagai salah satu syarat
untuk memperoleh gelar**

**MAGISTER
ILMU LINGKUNGAN**

**Wahyu Kartika
NPM: 0906595926**

**PROGRAM STUDI ILMU LINGKUNGAN
PROGRAM PASCA SARJANA
KEKHUSUSAN PROTEKSI LINGKUNGAN
JAKARTA, JANUARI 2012**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Tesis ini adalah hasil karya sendiri dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk telah saya nyatakan dengan benar.

Nama : Wahyu Kartika

NPM : 0906595926

Tanda Tangan : 

Tanggal : 20 Januari 2012

HALAMAN PENGESAHAN KOMISI PENGUJI

Tesis ini diajukan oleh

Nama : Wahyu Kartika
NPM : 0906595926
Program Studi : Ilmu Lingkungan
Judul Tesis : PEMANFAATAN LIMBAH CO₂ DENGAN
PENDEKATAN PRODUKSI BERSIH
(Kajian Pemanfaatan oleh PT. Krakatau Steel dan
PT. Resources Jaya Management Indonesia
Krakatau Karbonindo, Cilegon Banten)

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Magister Sains pada Program Studi Kajian Ilmu Lingkungan, Program Pasca Sarjana, Universitas Indonesia.

DEWAN PENGUJI

Ketua Sidang: Prof. dr. Haryoto Kusnoputranto, SKM, Dr.PH

(



Sekretaris Sidang : Dr. Ir. Tri Edhi Budhi Soesilo, M.Si

(



Pembimbing I : Dr.Ir. Setyo S. Moersidik, DEA

()

Pembimbing II : Asep Saefumillah, S.Si., M.Si., Ph.D

()

Penguji : Dr. Ir.Moh. Hasroel Thayib, APU

()

Ditetapkan di : Jakarta

Tanggal : 20 Januari 2012

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR
UNTUK KEPENTINGAN AKADEMISI**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertandatangan di bawah ini:

Nama : Wahyu Kartika
NPM : 0906595926
Program Studi : Ilmu Lingkungan
Fakultas : Program Pasca Sarjana
Jenis Karya : Tesis

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul:

**PEMANFAATAN LIMBAH CO₂ DENGAN PENDEKATAN
PRODUKSI BERSIH**

**(Kajian Pemanfaatan oleh PT. Krakatau Steel dan PT. Resources
Jaya Management Indonesia Krakatau Karbonindo, Cilegon
Banten)**

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya tanpa meminta izin dari saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta. Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di: Jakarta

Pada tanggal: 20 Januari 2012

Yang menyatakan



(Wahyu Kartika)

BIODATA PENULIS

Nama : Wahyu Kartika
Tempat/Tanggal Lahir: Jakarta, 21 April 1966
Alamat : Jl. Biduri Anggur No.30 Galur.
Jakarta Pusat 10530
Status : Menikah
Agama : Islam
Email : ika_april_66@yahoo.com

Riwayat Pendidikan :

1985-1992	S1 Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Indonesia, Depok
1982-1985	SMAN 6 Bulungan, Jakarta Selatan
1979-1982	SMPN 68 Cilandak, Jakarta Selatan
1977-1979	SDN Cilandak 01, Jakarta Selatan
1973-1977	SD PSKD IV Kwitang, Jakarta Pusat

Pengalaman Kerja :

2010-sekarang	Wiraswasta
1994-2010	PT Runa Ikana, Jakarta
1992-1994	PT. Pusaka Buana Raya, Bekasi

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT., hanya karena rahmat, karunia, dan petunjuk-Nya, penulis dapat menyelesaikan tesis ini. Tesis ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar magister dalam ilmu lingkungan. Penulis mengharapkan tesis ini dapat memberikan sumbangan wawasan baru bagi perkembangan ilmu lingkungan. Setelah melalui proses yang panjang, sangatlah sulit bagi penulis untuk menyelesaikan tesis ini tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

- (1) Dr. Ir. Moh. Hasroel Thayib, APU selaku dosen penguji dan dosen favorit penulis yang selalu memberi motivasi untuk selalu maju.
- (2) Dr. Ir. Setyo S. Moersidik, DEA selaku dosen pembimbing I.
- (3) Asep Saefumillah, S.Si, M.Si, Ph.D selaku dosen pembimbing II tesis yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran, serta memberikan dorongan semangat kepada penulis dalam penyusunan dan pemahaman substansi tesis ini.
- (4) Dr. dr. Tri Edhi Budhi Soesilo, M.Si selaku dosen pembimbing akademik yang selalu memberikan semangat dan dorongan untuk menyelesaikan tesis ini.
- (5) Prof. dr. Haryoto Kusnopranto, SKM, Dr.PH, selaku Ketua Program Studi Ilmu Lingkungan UI, atas kesediaannya dalam proses pengujian tesis ini.
- (6) Suamiku Sulaksana Permana, anak-anakku Kamil Raihan Permana, Larasati Kartika Permana tercinta yang selalu memberikan semangat untuk terus maju dalam hidup penulis.
- (7) *Mba* Irna yang tidak pernah bosan mengingatkan penulis untuk cepat melaksanakan ujian tesis serta seluruh staf administrasi dan akademik Program Studi Ilmu Lingkungan, Program Pascasarjana, Universitas Indonesia yang telah membantu kelancaran penulis semasa studi (*mba* Erni, *mas* Udin, Nasrullah, dan Juju).
- (8) Semua dosen yang telah membimbing penulis dalam menempuh masa studinya di PSIL.

- (9) Ibu Rini dosen Teknik Metalurgi UI yang telah membantu kelancaran akses ke PT. Krakatau Steel.
- (10) Direksi dan staf PT. Krakatau Steel Jakarta dan Cilegon: Ibu Sita, Bapak. R. Hernanto, Bapak. Budi Warnoto, Bapak Wahyudi, *Mba* Nita dan staf unit HYL III DR Plant yang telah bersedia membantu dalam proses penelitian.
- (11) Direksi dan staf PT. Resources Jaya Management Indonesia Krakatau Karbonindo yang telah bersedia membantu dalam proses penelitian.
- (12) Teman-teman di lingkungan PSIL UI angkatan 28 A dan 28 B kelas khusus atas pertemanannya dalam melewati masa-masa kuliah, semoga ilmu yang kita dapatkan dapat kita amalkan dalam kehidupan.
- (13) Semua pihak lainnya yang tidak dapat disebutkan satu persatu oleh penulis.

Akhir kata, semoga tesis ini dapat memberikan manfaat khususnya bagi industri-industri lainnya di Indonesia dan pemerhati lingkungan pada umumnya untuk secara bersama-sama mengantisipasi perubahan iklim yang mengancam ekosistem.

Jakarta, 20 Januari 2012

Penulis

ABSTRAK

Nama : Wahyu Kartika
NPM : 0906595926
Program Studi : Ilmu Lingkungan
Judul Tesis :
PEMANFAATAN LIMBAH CO₂ DENGAN PENDEKATAN PRODUKSI BERSIH
(Kajian di PT. Krakatau Steel dan PT. Resources Jaya Management Indonesia Krakatau Karbonindo, Cilegon Banten)

Produk baja dibutuhkan untuk mendukung pembangunan industri manufaktur dan industri strategis lainnya di Indonesia. Industri baja menjadi salah satu penyumbang emisi gas CO₂ yang memberi kontribusi gas rumah kaca (GRK) sekitar 25 %. PT Krakatau Steel yang merupakan salah satu industri baja terbesar di Indonesia menghasilkan emisi CO₂ sisa proses reduksi pada gas buang sebesar rata-rata 25 ton/jam atau 600 ton/hari untuk memproduksi baja sebesar 1.350.000 ton/tahun. Minimisasi limbah yang dilakukan PT Krakatau Steel bekerjasama dengan PT Resources Jaya Management Indonesia Krakatau Karbonindo melalui pendekatan Produksi Bersih dengan mendaur ulang (*recycle*) gas CO₂ menjadi CO₂ cair dengan teknologi CO₂ *Purification* menghasilkan penurunan emisi CO₂ sebesar 10%. Penurunan ini dipengaruhi keterbatasan kapasitas produksi dan kapasitas *storage tank*. Hasil penelitian juga menunjukkan variabel-variabel yang menjadi pertimbangan pemanfaatan emisi CO₂ ini adalah: Kemurnian CO₂, *Raw* gas CO₂, Emisi CO₂ yang diserap, Keberlanjutan *raw* gas CO₂, Penjualan *raw* gas CO₂, Permintaan pasar untuk CO₂ cair.

Kata kunci: Emisi CO₂, gas buang, industri baja, *recycle*, teknologi CO₂ *Purification*

ABSTRACT

Name : Wahyu Kartika
Student : 0906595926
Programme of Study : Environmental Sciences
Thesis Title :
WASTE UTILIZATION OF CO₂ WITH THE CLEANER PRODUCTION
APPROACH
(Studies in PT. Krakatau Steel and PT. Resources Management Indonesia Krakatau
Karbonindo Jaya, Cilegon Banten)

Steel products needed to support the development of manufacturing industries and other strategic industries in Indonesia. The steel industry to be one contributor to CO₂ emissions that contribute to greenhouse gas (GHG) emissions by about 25%. PT Krakatau Steel, which is one of the largest steel industry in Indonesia produces residual CO₂ emissions reduction process in flue gas by an average of 25 tons / hour or 600 tons / day to produce steel at 1.35 million tons / year. Waste minimization is carried out in cooperation with PT Krakatau Steel PT Krakatau Resources Management Indonesia Jaya Karbonindo through the Cleaner Production approach by recycling (recycle) CO₂ gas into liquid CO₂ with CO₂ purification technologies resulting in a reduction in CO₂ emissions by 10%. The decline was influenced by the limited production capacity and capacity of storage tanks. The results also showed that the variables into consideration is the utilization of CO₂ emissions: CO₂ Purity, Raw gas CO₂, CO₂ emissions are absorbed, Sustainability raw CO₂ gas, the raw CO₂ gas sales, the market demand for liquid CO₂.

Keywords: Emissions of CO₂, the flue gas, steel industry, recycling, CO₂ purification technologies

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	iv
BIODATA	v
KATA PENGANTAR.....	vi
ABSTRAK	viii
DAFTAR ISI	x
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
DAFTAR SINGKATAN	xv
RINGKASAN	xvi
BAB 1. PENDAHULUAN.....	1
1.1.Latar Belakang.....	1
1.2.Perumusan Masalah	3
1.3.Pertanyaan Penelitian.....	4
1.4.Tujuan Penelitian	4
1.5.Manfaat Penelitian	4
BAB 2.TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1.Perindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup.....	6
2.2.Karbondioksida	9
2.2.1.Daur Karbon.....	9
2.2.2.Gas Rumah Kaca, Efek Rumah Kaca, Pemanasan Global & Perubahan Iklim	13
2.2.2.1.Gas Rumah Kaca.....	13
2.2.2.2.Efek Rumah Kaca	16
2.2.2.3 Pemanasan Golobal & Perubahan Iklim	19
2.3.Clean Development Mechanism (CDM)	22
2.4.Produksi Bersih	24
2.5.Produksi Baja di PT. Krakatau Steel.....	28
2.6.Pengolahan CO ₂ (g) Menjadi CO ₂ (l) dan Pemanfaatannya	37
2.7.Kerangka Teori	43
2.8.Kerangka Konsep	44
2.9.Hipotesis Pengarah	44
BAB 3. METODE PENELITIAN.....	45
3.1. Desain Penelitian	45
3.2. Lokasi Penelitian.....	46

3.3. Waktu Penelitian.....	46
3.4. Populasi dan Sampel Penelitian.....	46
3.5. Instrumen Penelitian.....	47
3.6. Teknik Pengumpulan Data.....	47
3.7. Pengolahan Data.....	48
3.8. Analisis Data.....	48
3.9. Variabel Penelitian.....	49
BAB 4. HASIL PENELITIAN & PEMBAHASAN.....	50
4.1. Gambaran Umum Perusahaan.....	50
4.1.1.PT. Krakatau Steel.....	50
4.1.2.PT. Resources Jaya Teknik Management Indonesia Krakatau Karbonindo	54
4.2. Pelaksanaan Penelitian.....	54
4.3. Hasil Wawancara.....	54
4.4. Variabel-Variabel yang Menjadi Pertimbangan Pemanfaatan Emisi CO ₂	56
4.4.1.Karakteristik CO ₂	56
4.4.2.Emisi CO ₂ yang Dihasilkan PT Krakatau Steel	58
4.4.3.Emisi CO ₂ yang Diserap	65
4.4.4.Keberlanjutan Raw Gas CO ₂ oleh PT. Krakatau Steel.....	68
4.4.5.Penjualan Raw Gas CO ₂	70
4.4.6.Permintaan Pasar untuk CO ₂ Cair.....	70
4.5. Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Jumlah Penyerapan Emisi CO ₂	72
4.5.1.Kapasitas Produksi.....	72
4.5.2.Kapasitas <i>Storage Tank</i>	72
4.6. Implikasi Pemanfaatan Emisi CO ₂ Pada Lingkungan.....	73
4.6.1.Penurunan Emisi CO ₂	73
4.6.2.Potensi CDM	74
BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN.....	76
5.1. Kesimpulan.....	76
5.1. Saran.....	76
DAFTAR PUSTAKA.....	77

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Baku Mutu Emisi untuk Industri Besi dan Baja.....	8
Tabel 2.2. Tingkat Emisi Bahan Bakar Fosil.....	12
Tabel 2.3. Jenis-jenis GRK Berdasarkan Sumber-Sumbernya.....	14
Tabel 2.4. Emisi GRK di Indonesia Berdasarkan Inventarisasi GRK.....	15
Tabel 2.5. Waktu Tinggal Gas-Gas Rumah Kaca di Atmosfer.....	16
Tabel 2.6. Sifat Fisika CO ₂	40
Tabel 3.1. Pendekatan dan Metode Penelitian Secara Umum.....	45
Tabel 3.2. Kriteria Informan.....	47
Tabel 3.3. Variabel Penelitian dan Definisi Operasional.....	49
Tabel 4.1. Jawaban Wawancara Manager dan Supervisor.....	54
Tabel 4.2. Jawaban Wawancara Direktur dan General Manager.....	56
Tabel 4.3. Pengukuran Kadar CO ₂ Sebelum Masuk Unit Purifikasi.....	57
Tabel 4.4. Produksi Besi Spons dan Emisi CO ₂ yang Dihasilkan.....	59
Tabel 4.5. Emisi CO ₂ yang Dihasilkan pada Gas Buang dan Emisi CO ₂ yang Diserap untuk Produksi CO ₂ Cair.....	66
Tabel 4.6 Produksi Besi Spons Tahun 2009-2011.....	69
Tabel 4.7.CO ₂ Cair yang Dihasilkan dan Penjualan PT RMIKK.....	71
Tabel 4.8. Potensi Reduksi CO ₂ untuk Proyek CDM.....	75

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Emisi Karbon dari Berbagai Industri.....	7
Gambar 2.2. Daur Karbon.....	10
Gambar 2.3. Konsentrasi GRK di Atmosfer.....	14
Gambar 2.4. Tingkat Pertumbuhan Konsentrasi CO ₂ Sejak Tahun 1958 di Mauna Loa	18
Gambar 2.5. Efek Rumah Kaca.....	19
Gambar 2.6. Diagram Blok Penanganan Bijih Besi.....	29
Gambar 2.7. Diagram Blok Proses Seksi Reformasi dan Pembangkitan Kukus.....	30
Gambar 2.8. Diagram Blok Proses Pengkondisian Gas Reduktor.....	31
Gambar 2.9. Diagram Blok Proses pada Reaktor	32
Gambar 2.10. Diagram Blok Proses di Seksi Absorpsi CO ₂	34
Gambar 2.11. Diagram Blok Direct Reduction Plant.....	35
Gambar 2.12. Titik Kritis CO ₂	39
Gambar 2.13. Diagram Proses Produksi CO ₂ Cair.....	42
Gambar 2.14. Kerangka Teori.....	43
Gambar 2.15. Kerangka Konsep.....	44
Gambar 4.1. Grafik Emisi CO ₂ pada Gas Buang dan Produksi Tahun 2009.....	61
Gambar 4.2. Grafik Emisi CO ₂ pada Gas Buang dan Produksi Tahun 2010.....	61
Gambar 4.3. Grafik Emisi CO ₂ pada Gas Buang dan Produksi Tahun 2011.....	62
Gambar 4.4. Perhitungan Neraca Massa CO ₂ PT Krakatau Steel Tahun 2010.....	64
Gambar 4.5. Grafik Emisi CO ₂ pada Gas Buang dan Produksi Tahun 2009.....	67
Gambar 4.6. Grafik Emisi CO ₂ pada Gas Buang dan Produksi Tahun 2010.....	67
Gambar 4.7. Grafik Emisi CO ₂ pada Gas Buang dan Produksi Tahun 2011.....	68
Gambar 4.8. Grafik Produksi Besi Spons Tahun 2009-2011.....	69
Gambar 4.9. Penurunan Emisi CO ₂	74

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Perhitungan Produksi Besi Spons.....	81
Lampiran 2. Perhitungan Karakteristik CO ₂	83
Lampiran 3. Perhitungan Emisi CO ₂ dari Sisa Proses Reduksi.....	84
Lampiran 4. Perhitungan Emisi CO ₂ yang Diserap.....	87
Lampiran 5. Perhitungan Potensi CDM.....	89
Lampiran 6. Standar <i>Foodgrade</i> CO ₂ Cair.....	90
Lampiran 7. Hasil Analisis CO ₂ Berstandar <i>Foodgrade</i>	91
Lampiran 8. Pabrik Pemurnian CO ₂ RMIKK dan Unit CO ₂ <i>Removal System</i> PBS	92
Lampiran 9. Fasilitas Absorpsi CO ₂ di PT. Krakatau Steel.....	93
Lampiran 10. <i>Storage Tank</i> PT. RMIKK.....	94
Lampiran 11. Panduan Wawancara untuk Manager dan Supervisor.....	95
Lampiran 12. Panduan Wawancara untuk Direksi.....	97

DAFTAR SINGKATAN

MP3EI	: Masterplan Percepatan dan Perluasan Pembangunan Ekonomi Indonesia
CO ₂	: Karbon dioksida
PT. KS	: PT. Krakatau Steel
PT. RMIKK	: PT. Resources Jaya Teknik Manajemen Indonesia Krakatau Karbonindo
CDM	: <i>Clean Development Mechanism</i>
CER	: <i>Certified Emission Reduction</i>
CO	: Karbon Monoksida
NO _x	: Nitrogen Oksida
SO _x	: Sulfur dioksida
C	: Karbon
O ₃	: Ozon
ERK	: Efek Rumah Kaca
CFCs	: Klorofluorokarbon
IPCC	: <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
N ₂ O	: Dinitro Oksida
HFC	: Hidrofluorokarbon
PFC	: Perfluorokarbon
SF ₆	: Heksafluorida
CCS	: <i>Carbon Capture and Storage</i>
JI	: <i>Joint Implementation</i>
ET	: <i>Emission Trading</i>
CER	: <i>Certified Emissions Reduction</i>
UNFCCC	: <i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i>
BAPEDAL	: Badan Pengendalian Dampak Lingkungan
4R	: <i>Reduce, Reuse, Recycle, Recovery</i>

(RINGKASAN)

**Program Studi Ilmu Lingkungan
Program Pascasarjana Universitas Indonesia
Tesis, Januari 2012**

- A. Nama : Wahyu Kartika
- B. Judul tesis :
PEMANFAATAN LIMBAH CO₂ DENGAN PENDEKATAN PRODUKSI
BERSIH
(Kajian di PT. Krakatau Steel dan PT. Resources Jaya Management Indonesia
Krakatau Karbonindo, Cilegon Banten)
- C. Jumlah halaman : Halaman permulaan 20, halaman isi 76, Gambar 24,
Tabel 17, Lampiran 12

Indonesia sebagai negara yang terus melakukan pembangunan, baja merupakan produk yang diandalkan karena baja terkait erat dengan industri infrastruktur dan industri strategis lainnya. Tingkat permintaan baja semakin prospektif menyusul komitmen pemerintah untuk melaksanakan *Masterplan* Percepatan dan Perluasan Pembangunan Ekonomi Indonesia (MP3EI) melalui 6 Koridor Ekonomi (Koridor Sumatera, Koridor Jawa, Koridor Kalimantan, Koridor Sulawesi, Koridor Bali dan Koridor Papua-Maluku) dimana sektor infrastruktur merupakan salah satu sektor andalan dengan perhatian khusus. Selain itu konsumsi baja juga didorong oleh peningkatan produksi otomotif, dari sektor konstruksi dan manufaktur. Menurut Kementerian Perindustrian penjualan baja di Indonesia pada tahun 2011 dapat mencapai 9,5 juta ton atau naik 44% dibandingkan tahun 2010 sebesar 6,6 juta ton. Menurut Julian (2009), industri baja menjadi salah satu penyumbang emisi gas CO₂ yang memberi kontribusi terbesar gas rumah kaca (GRK) dari sektor industri yaitu sekitar 25%.

PT. Krakatau Steel (PT. KS) sebagai salah satu penghasil baja terbesar di Indonesia dalam proses produksinya mengemisikan CO₂ ke atmosfer. Menurut Laporan Survey, (2010) PT. KS menghasilkan emisi CO_{2eq} sebesar 301,776.44 ton/tahun untuk memproduksi besi spons sebesar 1,360,650 ton/tahun. Emisi terbesar berasal dari proses yaitu 63% dari emisi keseluruhan. Hasil dari uji udara emisi PT. KS juga menunjukkan konsentrasi dari semua parameter sangat jauh di bawah nilai baku mutu (Kepmen LH Nomor 13 Tahun 1995 tentang Baku Mutu Emisi untuk Industri Besi dan Baja). Hal ini menunjukkan kualitas udara emisi di PT. KS tergolong baik.

Meskipun kualitas udara emisi tergolong baik, akan tetapi gas CO₂ walaupun tidak berpengaruh pada polusi udara, gas tersebut merupakan salah satu gas rumah kaca (GRK) penyebab utama pemanasan global. PT. KS yang berupaya menjadi *Green Company* menerapkan produksi bersih untuk meminimalkan limbah CO₂ sisa proses reduksi dengan konsep 4R yaitu *reuse, reduce, recycle dan recovery*.

Pada tahun 2009 PT. KS bekerjasama dengan PT. RMIKK (PT. Resources Jaya Teknik Management Indonesia Krakatau Karbonindo) sebagai pabrik pemurnian CO₂, memanfaatkan kembali (*recycle*) emisi CO₂ sisa proses reduksi pada gas buang Unit HYL 3 PT. KS untuk produksi CO₂ cair. Gas CO₂ yang diserap untuk produksi CO₂ cair adalah sebesar 3 ton/jam dari 40 ton/jam emisi CO₂ yang dikeluarkan PT. KS untuk menghasilkan besi spons sebesar 5.000 ton/hari, sedangkan sisanya sebesar 37 ton CO₂ dilepas ke udara. Produk CO₂ cair berstandar *foodgrade* ini digunakan pada berbagai industri seperti industri minuman berkarbonasi, produksi etanol, *fire extinguisher*, pengawetan makanan, dan pengelasan dalam manufaktur.

Berdasarkan latar belakang di atas, maka perumusan masalah yang dinyatakan pada penelitian ini adalah masih sedikitnya emisi CO₂ sisa proses reduksi pada gas buang yang diserap untuk produksi CO₂ cair, padahal jumlah emisi CO₂ yang dilepas ke udara masih cukup besar untuk dapat dimanfaatkan kembali agar jumlah CO₂ di udara tetap dapat dijaga dalam kesetimbangan sehingga fungsi ekosistem tidak terganggu.

Tujuan umum penelitian ini adalah pemanfaatan emisi CO₂ pada gas buang industri baja melalui pendekatan produksi bersih dalam upaya penurunan emisi karbon (CO₂), sedangkan tujuan khususnya adalah (i) Mengidentifikasi dan menganalisis variabel-variabel yang menjadi pertimbangan sehingga emisi CO₂ sebagai *by product* dimanfaatkan; (ii) Menganalisis faktor yang mengakibatkan jumlah emisi CO₂ yang diserap untuk produk CO₂ cair dengan teknologi CO₂ *Purification* masih sedikit; (iii) Menganalisis implikasi pemanfaatan emisi CO₂ terhadap lingkungan.

Pendekatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah pendekatan kuantitatif dengan dilengkapi data kualitatif. Menurut taraf analisisnya, pendekatan yang dipakai adalah pendekatan deskriptif. Sifat penelitian ini adalah penelitian non eksperimental atau penelitian deskriptif-analitik dengan menggunakan metode *ex post facto*. Hipotesis pengarah pada penelitian ini adalah emisi CO₂ dapat dikurangi dengan pendekatan produksi bersih melalui CO₂ *Purification* sehingga dapat memberikan dampak positif pada lingkungan.

Berdasarkan analisis data didapatkan hasil penelitian yaitu (i) variabel-variabel yang menjadi pertimbangan pemanfaatan emisi CO₂ menjadi *by product* adalah: kemurnian CO₂, jumlah emisi CO₂ sisa proses reduksi, jumlah emisi CO₂ yang diserap untuk produksi CO₂ cair, keberlanjutan *raw gas* CO₂, penjualan *raw gas* CO₂, permintaan pasar untuk CO₂ cair; (ii) faktor yang mempengaruhi jumlah penyerapan emisi CO₂ sebesar 10% adalah kapasitas produksi dan kapasitas *storage tank* yang terbatas; (iii) Pengurangan emisi CO₂ melalui pemanfaatan ini berimplikasi positif pada lingkungan karena dapat mengurangi peningkatan suhu akibat meningkatnya gas CO₂ di udara yang mempengaruhi terjadinya perubahan iklim, di sisi lain pengurangan ini berpotensi mendapat *carbon credit* melalui

proyek CDM, semakin besar pengurangan emisi CO₂ yang dilakukan semakin besar *carbon credit* yang diperoleh.

Daftar Kepustakaan: 44 (dari tahun 1990-2011)

(SUMMARY)

**Programme of Study in Environmental Sciences
Postgraduate Programme University of Indonesia
Thesis, Januari 2012**

- A. Name : Wahyu Kartika
B. Thesis Title :
WASTE UTILIZATION OF CO₂ WITH THE CLEANER PRODUCTION
APPROACH
(Studies in PT. Krakatau Steel and PT. Resources Jaya Management Indonesia
Krakatau Karbonindo, Cilegon Banten)
C. Number of pages : Initial pages 20, contents 76, figures 24, tables 17, appendix
12

Indonesia as a country that continues to perform the construction, steel is a dependable product for the steel industry is closely related to infrastructure and other strategic industries. The prospective level of demand for steel following the government's commitment to implement the Masterplan Economic Development Acceleration and Expansion of Indonesia (MP3EI) through 6 Economic Corridor (Corridor of Sumatra, Java Corridor, Corridor Kalimantan, Sulawesi Corridor, Corridor Corridor Bali and Papua, Maluku) in which the infrastructure sector is one of the leading sectors with special attention. Besides the consumption of steel is also driven by increased production of automotive, construction and manufacturing sector. According to the Ministry of Industry, steel sales in Indonesia in 2011 may reach 9.5 million tons, up 44% compared to the year 2010 amounted to 6.6 million tonnes. According to Julian (2009), the steel industry to be one contributor to CO₂ emissions that contribute the largest greenhouse gas (GHG) emissions from industrial sectors which are about 25%.

PT. Krakatau Steel (PT KS) as one of Indonesia's largest steel producer in the production process emits CO₂ into the atmosphere. According to the Survey Report, (2010) PT. KS CO₂eq emissions by 301,776.44 tons / year for producing sponge iron by 1,360,650 tons / year. The biggest emissions come from the process that is 63% of overall emissions. The results of the test air emissions of PT. KS also shows the concentration of all parameters so far below the quality standard (LH Decree Number 13 Year 1995 on Emission Quality Standard for Iron and Steel Industry). This shows the quality of air emissions at PT. KS quite good.

Despite the relatively good air quality emissions, but CO₂ gas, although no effect on air pollution, the gas is one of the greenhouse gas (GHG) emissions the main cause of global warming. PT. KS, which strives to be a Green Company applying cleaner production to minimize waste CO₂ reduction process with the rest of the 4R concept of reuse, reduce, recycle and recovery.

In 2009 PT. KS in cooperation with PT. RMIKK (PT Jaya Teknik Resources Management Indonesia Krakatau Karbonindo) as CO₂ purification plant, reuse

(recycle) residual CO₂ emissions reduction process in flue gas HYL Unit 3 PT. KS for the production of liquid CO₂. CO₂ is absorbed for the production of liquid CO₂ is 3 tons / hour of 40 tons / hour of CO₂ emissions released PT. KS to produce sponge iron of 5,000 tons / day, while the remainder by 37 tons of CO₂ released into the air. Product foodgrade standard liquid CO₂ is used in various industries such as carbonated drinks industry, ethanol production, fire extinguisher, food preservation, and welding in manufacturing.

Based on the above background, then the formulation of the problem expressed in this research is still at least the rest of the process of reduction of CO₂ emissions in the flue gas for the production of CO₂ absorbed the liquid, whereas the amount of CO₂ emissions released into the air is still large enough to be able to be recovered to the amount of CO₂ in the air can still be maintained in equilibrium so that the functioning of ecosystems is not compromised.

The general objective of this study is the utilization of CO₂ emissions in the steel industry through the exhaust gas cleaner production approaches in an effort to decrease emissions of carbon dioxide (CO₂), while the particular purpose are (i) Identify and analyze the variables into consideration so that emissions of CO₂ as a by-product used; (ii) Analyze the factors that resulted in the amount of CO₂ emissions are absorbed to the product liquid CO₂ Purification with CO₂ technology is still small, (iii) Analyze the implications of the utilization of CO₂ emissions on the environment.

The approach used in this study is a quantitative approach with qualitative data furnished. According to the analysis stage, the approach used is descriptive approach. The nature of this research is to study non-experimental or descriptive-analytic study using the ex post facto. The hypothesis of this study is referring to the CO₂ emissions can be reduced by the approach of cleaner production through purification so that CO₂ can have a positive impact on the environment.

Based on data analysis of research results obtained: (i) the variables into consideration the utilization of a by-product CO₂ emissions are: CO₂ purity levels, the remaining amount of CO₂ emissions reduction process, the amount of absorbed CO₂ emissions for the production of liquid CO₂, the sustainability of raw gas CO₂, the sale of raw CO₂ gas, market demand for liquid CO₂, (ii) factors that affect the amount of absorption of CO₂ emissions by 10% the production capacity and the limited capacity of storage tanks, (iii) Reduction of CO₂ emissions through the utilization of these positive implications on the environment because can reduce the temperature increase due to increased CO₂ in the air that affect terjadinta climate change, on the other side of this reduction has the potential to get carbon credits through CDM projects, the greater the reduction in CO₂ emissions is done the greater the carbon credits obtained.

Number of reference: 44 (issued from 1990 to 2011)

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Baja adalah salah satu komoditas yang penting bagi Indonesia. Sebagai negara yang terus melakukan pembangunan, baja adalah produk yang diandalkan karena baja terkait erat dengan industri infrastruktur dan industri strategis lainnya. Tingkat permintaan baja semakin prospektif menyusul komitmen pemerintah untuk melaksanakan *Masterplan* Percepatan dan Perluasan Pembangunan Ekonomi Indonesia (MP3EI) melalui 6 Koridor Ekonomi (Koridor Sumaterra, Koridor Jawa, Koridor Kalimantan, Koridor Sulawesi, Koridor Bali, dan Koridor Papua-Maluku) dimana sektor infrastruktur adalah salah satu sektor andalan dengan perhatian khusus. Selain itu konsumsi baja juga didorong oleh peningkatan produksi otomotif. Tahun 2011 peningkatan produksi mobil dan motor masing-masing diproyeksikan mencapai 800 ribu unit dan 7,2 juta unit. Dari sektor konstruksi dan manufaktur tahun ini diperkirakan naik tajam sejalan dengan pertumbuhan ekonomi yang diperkirakan dapat mencapai 6,4%. Sektor konstruksi tahun ini diperkirakan tumbuh menjadi 7,3%, sedangkan tahun sebelumnya 6,8%, sementara sektor manufaktur ditargetkan tumbuh 6,2%, sementara realisasi tahun 2010 hanya mencapai 5%. Menurut Kementerian Perindustrian penjualan baja di Indonesia pada tahun 2011 dapat mencapai 9,5 juta ton atau naik 44% dibandingkan tahun 2010 sebesar 6,6 juta ton (<http://www.besibaja.kemenpen.go.id>)

Meningkatnya kebutuhan baja tentu saja tidak akan terlepas dari masalah lingkungan. Lingkungan sebagai salah satu pilar dari tiga pilar pembangunan berkelanjutan mempunyai peranan penting dalam keberlangsungan industri. Pembangunan industri berkelanjutan mencakup tiga aspek yaitu lingkungan, ekonomi dan sosial. Dalam kegiatan internal industri, peluang untuk memadukan aspek lingkungan dan ekonomi sangat besar, bergantung pada bagaimana cara mengelola lingkungan dengan bijak

dan menguntungkan. Menurut Julian (2009), industri baja menjadi salah satu penyumbang emisi gas karbon dioksida (CO₂) yang memberi kontribusi terbesar gas rumah kaca (GRK) dari sektor industri yaitu sekitar 25%. Emisi CO₂ dari produksi baja dihasilkan melalui proses reduksi besi dari oksida besi dengan kokas pada tungku sembur, menghasilkan *pig iron* dan karbon dioksida. Sumber CO₂ lainnya berasal dari proses pembakaran sejumlah bahan bakar untuk mengoperasikan *furnace*. Gas CO₂ dalam jumlah besar dapat ditemukan pada gas buang yang dihasilkan dari peralatan *furnace*, dan *blast furnace*. Emisi tersebut dikeluarkan melalui cerobong dan akan terdispersi ke udara ambien serta berinteraksi di atmosfer dengan emisi yang berasal dari sumber lain misalnya dari transportasi. Setiap tahunnya emisi tersebut menambah jumlah karbon dioksida yang telah ada di atmosfer sekitar 7 milyar ton, yang umumnya akan tetap tinggal di atmosfer selama ratusan tahun atau lebih (Houghton, 2004).

CO₂ adalah salah satu GRK yang mempengaruhi iklim dengan cara mengubah radiasi sinar matahari yang masuk dan radiasi sinar infra merah yang keluar sehingga keseimbangan energi bumi berubah. Semakin besar jumlah GRK di dalam atmosfer bumi maka bumi pun akan semakin panas yang akibatnya suhu permukaan bumi meningkat secara global. Terjadinya peningkatan suhu bumi yang terus menerus akan mengakibatkan perubahan iklim bumi yang berdampak pada kehidupan manusia (Sutamihardja, 2009). Di sisi lain untuk mengatasi hal tersebut, berbagai upaya dan kerja sama telah dilakukan oleh negara-negara di dunia termasuk Indonesia. Indonesia telah meratifikasi Konvensi Perubahan Iklim pada bulan Agustus 1994 melalui Undang-undang Nomor 6 Tahun 1994 dan Protokol Kyoto melalui Undang-undang Nomor 17 Tahun 2004. Pemerintah Indonesia juga berkomitmen untuk menurunkan emisi GRK sebesar 26% pada tahun 2020 dibandingkan dengan kondisi saat ini (*Business As Usual*) dan sebesar 41% dengan bantuan Internasional.

Salah satu industri baja terbesar di Indonesia yaitu PT. Krakatau Steel menghasilkan emisi CO_{2eq} sebesar 301.776,44 ton per tahun untuk memproduksi baja sebesar

1.360.650 ton/tahun (Laporan Survey,2010). Emisi terbesar berasal dari proses yaitu sebesar 63% dari emisi keseluruhan. PT. KS yang sedang menuju *Green Company* menerapkan produksi bersih untuk meminimisasi limbah CO₂ sisa proses reduksi dengan konsep 4R yaitu *reuse, reduce, recycle dan recovery*.

Pada tahun 2009 PT. KS bekerjasama dengan PT. Resources Jaya Teknik Management Indonesia Krakatau Karbonindo (PT. RMIKK) sebagai pabrik purifikasi CO₂, memanfaatkan kembali (*recycle*) emisi CO₂ sisa proses reduksi bijih besi pada gas buang Unit HYL 3 PT. KS. Gas CO₂ yang diserap PT. RMIKK untuk diolah menjadi produk CO₂ cair dengan teknologi CO₂ *Purification* adalah sebesar 3 ton/jam dari 40 ton/jam yang dikeluarkan gas buang PT. KS untuk memproduksi besi spons sebesar 5.000 ton/hari, sedangkan sisanya sebesar 37 ton CO₂ dilepas ke udara. Produk CO₂ cair ini kemudian digunakan pada berbagai industri seperti industri minuman berkarbonasi, proses pembuatan urea, produksi etanol, *fire extinguisher, dry ice* sebagai pengawet makanan dan minuman, pemutihan kertas, dan pengelasan dalam manufaktur.

Dengan uraian tersebut di atas, peneliti perlu mengkaji pemanfaatan emisi CO₂ yang dihasilkan PT. Krakatau Steel sebagai upaya mengurangi limbah dengan pendekatan produksi bersih.

1.2. Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, maka perumusan masalah yang dinyatakan pada penelitian ini adalah masih sedikitnya emisi CO₂ sisa proses reduksi pada gas buang yang diserap untuk produksi CO₂ cair, padahal jumlah emisi CO₂ yang dilepas ke udara masih cukup besar untuk dapat dimanfaatkan kembali agar jumlah CO₂ di udara tetap dapat dijaga dalam kesetimbangan sehingga fungsi ekosistem tidak terganggu.

1.3. Pertanyaan Penelitian

Berdasarkan perumusan masalah di atas, maka diajukan pertanyaan penelitian sebagai berikut:

- a. Variabel-variabel apa saja yang menjadi pertimbangan sehingga emisi CO₂ sebagai *by product* industri baja dimanfaatkan?
- b. Mengapa jumlah emisi CO₂ yang diserap untuk produk CO₂ cair dengan teknologi CO₂ *Purification* masih sedikit?
- c. Bagaimana implikasi pemanfaatan emisi CO₂ terhadap lingkungan?

1.4. Tujuan Penelitian

1.4.1. Tujuan umum

Tujuan umum dalam penelitian ini adalah mengkaji pemanfaatan emisi CO₂ pada gas buang industri baja melalui pendekatan produksi bersih dalam upaya penurunan emisi karbon (CO₂).

1.4.2. Tujuan khusus

Penelitian ini bertujuan untuk:

- a. Mengidentifikasi dan menganalisis variabel-variabel yang menjadi pertimbangan sehingga emisi CO₂ sebagai *by product* dimanfaatkan.
- b. Menganalisis faktor yang mengakibatkan jumlah emisi CO₂ yang diserap untuk produk CO₂ cair dengan teknologi CO₂ *Purification* masih sedikit.
- c. Menganalisis implikasi pemanfaatan emisi CO₂ terhadap lingkungan.

1.5. Manfaat Penelitian

- a. Dari segi praktis, penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat praktis berupa informasi kepada kalangan industri tentang peluang pemanfaatan emisi CO₂ pada gas buang menjadi CO₂ cair.

- b. Dari segi teoretis, hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan sumbangan teoretis terhadap ilmu lingkungan khususnya upaya pemanfaatan limbah menjadi produk lain yang bermanfaat untuk industri lain melalui produksi bersih dalam upaya minimisasi limbah yang juga dapat memberikan kontribusi terhadap permasalahan perubahan iklim.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup

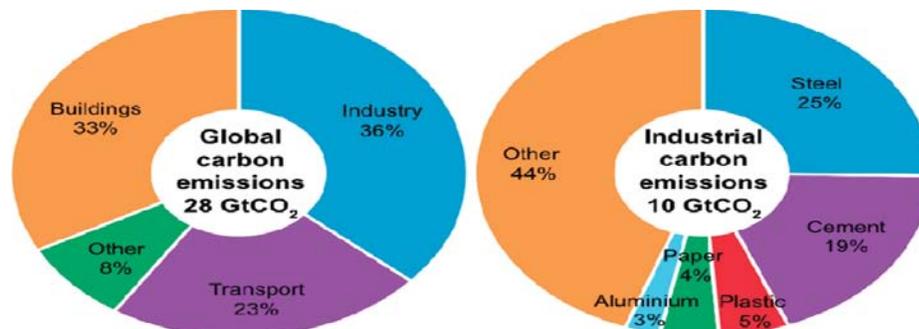
Undang-undang Nomor 32 Tahun 2009 (UU No. 32 Tahun 2009) tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup menyatakan bahwa perlindungan dan pengelolaan lingkungan hidup merupakan upaya sistematis dan terpadu yang dilakukan untuk melestarikan fungsi lingkungan hidup dan mencegah terjadinya pencemaran dan/atau kerusakan lingkungan hidup yang meliputi perencanaan, pemanfaatan, pengendalian, pemeliharaan, pengawasan, dan penegakan hukum untuk mewujudkan pembangunan yang berkelanjutan, upaya sadar dan terencana yang memadukan aspek lingkungan hidup, sosial, dan ekonomi ke dalam strategi pembangunan untuk menjamin keutuhan lingkungan hidup serta keselamatan, kemampuan, kesejahteraan, dan mutu hidup generasi masa kini dan generasi masa depan.

Secara umum, lingkungan hidup memuat 3 (tiga) komponen utama yaitu lingkungan alam, lingkungan buatan, dan lingkungan sosial yang saling berinteraksi dan saling ketergantungan secara harmonis agar tercipta keberlanjutan fungsi ekosistem yang baik. Manusia sebagai lingkungan sosial membutuhkan pembangunan untuk menopang kehidupannya, maka untuk mendukung berjalannya pembangunan tersebut dibutuhkan baja sebagai salah satu komponen penunjang. Baja akan diproduksi oleh pabrik baja dengan teknologi tertentu yang pada setiap proses produksinya menghasilkan emisi karbon dioksida (CO₂). Semakin besar kebutuhan manusia akan pembangunan, semakin banyak baja yang dibutuhkan, sehingga terjadi peningkatan produksi baja di pabrik baja dan otomatis akan menghasilkan emisi CO₂ yang besar pula. Karbon dioksida sebagai salah satu gas rumah kaca (GRK), konsentrasinya dipengaruhi oleh kegiatan manusia (*anthropogenic*) seperti membakar bahan bakar fosil, membuka lahan dan kegiatan industri yang menyebabkan

peningkatan konsentrasi gas rumah kaca di atmosfer. Gas inilah yang selanjutnya menentukan peningkatan suhu di udara, karena sifatnya yang seperti kaca yaitu dapat meneruskan radiasi gelombang panjang yang bersifat panas, akibatnya atmosfer bumi makin panas dengan laju yang setara dengan laju perubahan konsentrasi GRK.

Menurut Sumarwoto (2001), suhu atmosfer bumi merupakan faktor penting pengatur iklim bumi. Suhu atmosfer ditentukan oleh kadar GRK. Semakin besar GRK di atmosfer semakin banyak panas yang terperangkap oleh GRK di atmosfer, mengakibatkan suhu bumi bertambah panas. Peningkatan suhu yang terus menerus akan menimbulkan perubahan iklim yang drastis, sehingga terjadi perubahan lingkungan global yang terkait dengan pencairan es di kutub, distribusi vegetasi alami dan keanekaragaman hayati, produktivitas tanaman, distribusi hama, penyakit tanaman dan manusia yang pada akhirnya berdampak pada cadangan makanan, sumber air, kesehatan manusia, spesies vegetasi dan ekosistem.

Salah satu gas rumah kaca yang menimbulkan efek rumah kaca terbesar adalah gas CO₂. Peningkatan gas CO₂ diakibatkan semakin bertambahnya aktivitas manusia dalam penggunaan bahan bakar fosil. Menurut Julian (2010), industri baja menjadi salah satu penyumbang emisi gas CO₂ yang memberi kontribusi terbesar gas rumah kaca (GRK) dari sektor industri yaitu sekitar 25%. Hal ini harus diantisipasi dengan baik agar tidak menimbulkan ancaman ekosistem yang semakin parah.



Gambar 2.1. Emisi Karbon dari Berbagai Industri
Sumber: Julian, (2010)

Indonesia sebagai negara yang sedang membangun harus memperhatikan aspek lingkungan, sosial, dan ekonomi agar terwujud pembangunan yang berkelanjutan sesuai UU Nomor 32 Tahun 2009. Selain itu pemerintah melalui Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 13 Tahun 1995 tentang Baku Mutu Emisi Sumber Tidak Bergerak menetapkan batas maksimum emisi yang diperbolehkan dimasukkan ke dalam lingkungan dari sumber tidak bergerak (Tabel 2.1.) sebagai upaya perlindungan dan pelestarian lingkungan.

Tabel 2.1. Baku Mutu Emisi untuk Industri Besi dan Baja

No.	Sumber	Parameter	Batas Maksimum (mg/m ³)
1.	Penanganan Bahan Baku (<i>Raw Material Handling</i>)	Total Partikel	150
2.	Tanur Oksigen Basa (<i>Basic Oxygen Furnace</i>)	Total Partikel	150
3.	Tanus Busur Listrik (<i>Electric Arc Furnace</i>)	Total Partikel	150
4.	Dapur Pemanas	Total Partikel	150
5.	Dapur Proses Pelunakan Baja (<i>Annealing Furnace</i>)	Total Partikel	150
6.	Proses Celup Lapis Metal (<i>Acid Pickling & Regeneration</i>)	Total Partikel HCl	150 15
7.	Tenaga Ketel Uap (<i>Power Boiler</i>)	Total Partikel SO ₂ NO ₂	230 800 1000
8.	Semua Sumber	Opasitas	20%

Sumber: Kepmen LH, 1995

Upaya pemerintah dalam mengantisipasi pengurangan emisi karbon salah satunya juga tercermin dengan diratifikasinya Undang-undang Nomor 6 tahun 1994 tentang Konvensi Perubahan Iklim dan Nomor 17 Tahun 2004 tentang Protokol Kyoto (PK). PK mengatur emisi GRK akibat kegiatan manusia agar konsentrasi GRK di atmosfer stabil dan tidak membahayakan sistem iklim bumi melalui pengembangan industri dengan tingkat emisi rendah. Implementasi Protokol tersebut adalah dengan menetapkan mekanisme mitigasi perubahan iklim mencapai target pengurangan emisi CO₂ yang disyaratkan oleh konvensi perubahan iklim salah satunya *Clean Development Mechanism (CDM)*. CDM mengatur negara-negara maju yang

berkomitmen untuk membatasi atau menurunkan emisi bekerjasama dengan negara berkembang. Negara-negara maju yang wajib membatasi atau menurunkan emisinya harus mendapatkan sertifikasi penurunan emisi, yang dikenal juga sebagai kredit karbon atau *carbon credits*.

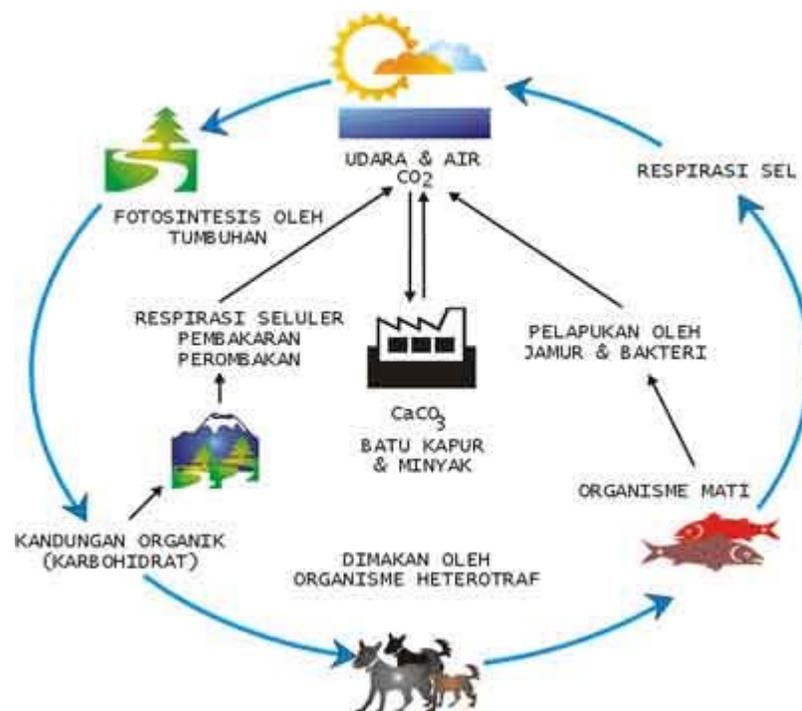
2.2. Karbon Dioksida

2.2.1. Daur Karbon

Karbon adalah salah satu unsur terbesar di alam semesta. Karbon terdapat di udara, air, tanah, hutan dan juga manusia. Karbon terdapat di semua makhluk di bumi. Semua kehidupan di bumi memerlukan karbon untuk tumbuh dan bertahan hidup. Karbon juga terdapat pada benda mati seperti batu, gas dan bahan bakar fosil. Karbon dioksida berasal dari perubahan zat karbon menjadi gas. Sebagai contoh saat pohon dibakar, karbon di dalam pohon bergabung dengan oksigen di udara saat terbakar dan menjadi gas karbon dioksida atau saat bensin dibakar juga menghasilkan gas karbon dioksida. Karbon dioksida sangat dibutuhkan dalam proses alami fotosintesis yang menyediakan karbon untuk pertumbuhan tanaman dan oksigen bagi udara.

Karbon mengalami siklus alami yang disebut daur karbon. Daur karbon merupakan proses alami karbon yang bergerak atau mengalir di berbagai tempat yang berbeda dan tersimpan dalam penampungan (Gambar 2.2.). Menurut Houghton, (2005). karbon terus menerus diserap dari karbon dioksida di udara dan disimpan dalam pohon dan makhluk hidup lainnya kemudian digunakan dan dilepaskan kembali sebagai karbon dioksida ke atmosfer sebagai bagian dari efek rumah kaca. Tumbuhan menggunakan energi surya dari matahari, air, zat hara dan karbon untuk tumbuh. Tumbuhan menyimpan karbon dan mengembalikan CO₂ dan oksigen ke udara melalui respirasi. Pada saat tumbuhan dan hewan mati, karbon yang disimpan dalam tubuhnya dikembalikan ke tanah dan udara, sehingga karbon terus menerus mengalir di dalam daur karbon dengan berbagai cara.

Sebagian besar kegiatan manusia seperti pada bidang industri, penggunaan kendaraan serta penggundulan dan kebakaran hutan melepaskan CO_2 dalam jumlah besar ke udara sehingga mengganggu keseimbangan proses alami dan siklus bumi yang mengontrol iklim bumi seperti efek rumah kaca dan daur karbon. Adanya emisi CO_2 dari kegiatan manusia mengakibatkan pemanasan global dan perubahan iklim.



Gambar 2.2. Daur Karbon
Sumber : Houghton, R. A., 2005

Karbon dioksida adalah senyawa kimia yang terdiri dari dua atom oksigen terikat kovalen dengan atom karbon. Karbon dioksida mempunyai berat molekul 44 gr/mol. Berbentuk gas pada temperatur kamar (25°C) dan tekanan standar (1 atm) dan berada di atmosfer, tidak berwarna, tidak berbau dan berbasa lemah serta larut dalam air pada temperatur 15°C dengan perbandingan volume $\text{CO}_2 : \text{H}_2\text{O} = 1 : 1$. CO_2 tidak bersifat racun, akan tetapi dapat menimbulkan efek sesak dan mengganggu keseimbangan tubuh. Karbon dioksida juga lebih dikenal sebagai gas asam arang karena gas karbon

dioksida terbentuk dari atom karbon yang juga dikenal dengan nama arang (Lagowski,1997).

Karbon dioksida berbentuk padat pada temperatur $-56,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan tekanan 5.2 atm. Dalam bentuk padat, karbon dioksida disebut es kering (*Phase Change data for Carbondioxide*, 2009). Fenomena ini pertama kali dipantau oleh seorang kimiawan Perancis, Charles Thilorier pada tahun 1825. Es kering biasanya digunakan sebagai zat pendingin yang relatif murah. Sifat-sifat yang menyebabkannya sangat praktis adalah karbon dioksida langsung menyublim menjadi gas dan tidak meninggalkan cairan

Sumber karbon dioksida dapat ditemukan melalui berbagai cara yang pada akhirnya akan kembali ke atmosfer melalui daur karbon sebagai berikut (Janzen,2004):

- a. Melalui pembakaran dari semua bahan bakar yang mengandung karbon, seperti metana (gas alam), distilat minyak bumi (bensin, diesel, minyak tanah, propana), dan batubara yang merupakan bahan bakar fosil akan menghasilkan karbondioksida. Sebagai contoh reaksi antara metana dan oksigen:



Jika ketiga jenis bahan bakar fosil ini dibandingkan maka gas alam menghasilkan emisi CO_2 paling sedikit. Pembakaran sempurna pada proses pembakaran bahan bakar gas lebih mudah tercapai. Produk utama dari pembakaran gas alam adalah karbon dioksida dan uap air. Kandungan CO_2 per satuan energi dari gas alam lebih rendah dibandingkan dengan bahan bakar lain karena rasio karbon/hidrogennya lebih rendah.

Menurut *Energy Information Administration* (1998), minyak dan batubara tersusun dari molekul yang jauh lebih kompleks, rasio karbonnya lebih tinggi dan mengandung nitrogen dan belerang yang lebih tinggi. Jika minyak dan batubara dibakar maka akan melepaskan karbon dioksida (CO_2), karbon monoksida (CO),

nitrogen oksida (NO_x) dan sulfur dioksida (SO_x) dalam rasio yang lebih tinggi dibandingkan dengan gas alam seperti ditunjukkan pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2. Tingkat Emisi Bahan Bakar Fosil

Pounds per Billion of Energy Input

Polutan	Gas Alam	Minyak	Batubara
Karbon Dioksida	117.000	164.000	208.000
Karbon Monoksida	40	33	208
Nitrogen Oksida	92	448	457
Sulfur Dioksida	1	1.122	2.591
Partikulat	7	84	2.744
Merkuri	0,000	0,007	0,016

Sumber : *Energy Information Administration, 1998*

Dari Tabel 2.2. dapat dilihat bahwa gas alam menjadi sangat penting sebagai sumber energi dalam upaya mengurangi emisi CO₂ dan memelihara lingkungan yang lebih bersih dan sehat.

- b. Melalui berbagai jenis reaksi kimia juga dapat menghasilkan karbon dioksida, seperti pada industri baja, besi direduksi dari oksida besi dengan kokas pada tungku sembur, menghasilkan *pig iron* dan karbon dioksida:



- c. Melalui pernafasan (respirasi) oleh tumbuhan dan binatang. Hal ini merupakan reaksi eksotermik dan termasuk juga di dalamnya penguraian glukosa (atau molekul organik lainnya) menjadi karbon dioksida dan air.
- d. Melalui pembusukan binatang dan tumbuhan. Fungi atau jamur dan bakteri mengurai senyawa karbon pada binatang dan tumbuhan yang mati dan mengubah karbon menjadi karbon dioksida jika tersedia oksigen, atau menjadi metana jika tidak tersedia oksigen.

- e. Di permukaan laut dimana air menjadi lebih hangat, karbon dioksida terlarut dilepas kembali ke atmosfer.
- f. Erupsi vulkanik atau ledakan gunung berapi akan melepaskan gas ke atmosfer. Gas-gas tersebut termasuk uap air, karbon dioksida, dan belerang. Jumlah karbon dioksida yang dilepas ke atmosfer secara kasar hampir sama dengan jumlah karbon dioksida yang hilang dari atmosfer akibat pelapukan silikat.

Dalam skala industri karbon dioksida secara garis besar dihasilkan dari enam proses (Houghton, 2005):

- a. Sebagai hasil samping dari pengilangan ammonia dan hidrogen, di mana metana dikonversikan menjadi CO₂.
- b. Dari pembakaran kayu dan bahan bakar fosil.
- c. Sebagai hasil samping dari fermentasi gula pada proses peragian bir, wiski dan minuman beralkohol lainnya.
- d. Dari proses penguraian termal batu kapur, CaCO₃.
- e. Sebagai produk samping dari pembuatan Natrium Fosfat.
- f. Dari reaksi reduksi bijih besi pada pembuatan baja besi direduksi dari oksida besi dengan kokas pada tungku sembur, menghasilkan *pig iron* dan karbon dioksida:

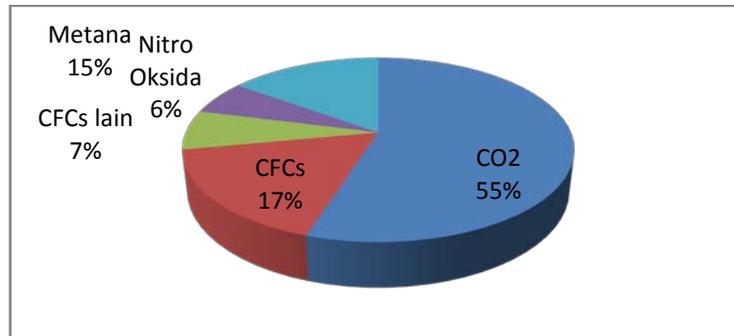


2.2.2. GRK, ERK, dan Pemanasan Global & Perubahan Iklim

2.2.2.1. Gas Rumah Kaca

Gas-gas rumah kaca (GRK) adalah gas-gas di atmosfer yang memiliki efek penyelimutan karena gas-gas tersebut menyerap panas yang dilepaskan oleh permukaan bumi. Tanpa adanya gas rumah kaca, seperti karbon dioksida (CO₂), metana (CH₄), atau dinitro oksida (N₂O), suhu permukaan bumi akan 33 derajat celcius lebih dingin. Gas rumah kaca yang paling penting adalah uap air, namun

perubahan jumlahnya di atmosfer tidak berkaitan langsung dengan kegiatan manusia. Menurut Trismidianto, (2008) konsentrasi GRK terbesar di atmosfer adalah CO₂ yaitu sebesar 55% (Gambar 2.3.). Meskipun CO₂ mempunyai potensi pemanasan/efektifitas penyerapan panas yang paling kecil, tetapi karena konsentrasinya di atmosfer paling besar dibanding GRK yang lain maka CO₂ adalah GRK penyebab utama pemanasan global.



Gambar 2.3. Konsentrasi GRK di Atmosfer

Sumber: Trismidianto, (2008)

Gas-gas rumah kaca seperti CO₂, CH₄, dan N₂O pada dasarnya terbentuk dari proses pembakaran energi yang mempunyai kandungan karbon, kebocoran gas alam, oksidasi batubara, penambangan dan pengolahan lahan.

Tabel 2.3. Jenis-Jenis GRK Berdasarkan Sumber-Sumbernya

Gas Rumah Kaca	Sumber
Karbon dioksida (CO ₂)	Pembakaran bahan bakar fosil, transportasi, deforestasi, pertanian
Metana(CH ₄)	Pertanian, perubahan tata guna lahan, pembakaran biomassa, tempat pembuangan akhir sampah, industry
Nitrous oksida (N ₂ O)	Pembakaran bahan bakar fosil, industri, pertanian
Hidrofluorokarbon (HFCs)	Industri manufaktur, industri pendingin (freon), penggunaan aerosol
Perfluorokarbon (PFCs)	Industri manufaktur, industri pendingin (freon), penggunaan aerosol
Sulfur heksafluorida (SF ₆)	Transmisi listrik, manufaktur, industri pendingin (freon), penggunaan aerosol

Sumber: KLH, 2004

Diantara gas-gas rumah kaca, karbon dioksida merupakan gas yang sebagian besar ditimbulkan oleh kegiatan manusia. Karbon dioksida terbentuk sebagai akibat dari pembakaran bahan bakar fosil dan biomassa, proses dekomposisi kayu dan limbah pertanian (Tabel 2.3). Besarnya karbon dioksida yang diemisikan tergantung dari kandungan karbon (C) dalam bahan bakar. Kondisi pembakaran energi juga menghasilkan CO₂ sebagai hasil dari reaksi kimia antara karbon dan oksigen, sedangkan kegiatan-kegiatan di Indonesia yang mempengaruhi terjadinya perubahan iklim berasal dari sektor energi, industri, kehutanan, pertanian dan peternakan, serta sampah dijelaskan pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4. Emisi GRK di Indonesia Berdasarkan Inventarisasi GRK

Sumber	CO ₂ (kT)	CH ₄ (kT)	N ₂ O (kT)	CO ₂ eq (kT)	%
Total energi	170,02	2,40	5,72	220,2	24,84
Proses industri	19,12	-	0,51	19,15	2,16
Pertanian	-	3,24	52,86	71,35	8,05
Perubahan tata guna lahan dan kehutanan	559,47	367	2,52	567,33	64
Sampah	-	402	-	8,44	0,95
Total	748,61	774,64	61,61	886,47	100

Sumber: KLH ,1994

Menurut Sumarwoto (*dalam* Sulistyarningsih, 2004), GRK mempunyai waktu tinggal berbeda-beda di lapisan atmosfer bumi. Sifat waktu tinggal GRK akan menyebabkan terakumulasinya GRK di atmosfer bumi, dan apabila GRK terus menerus dilepas oleh kegiatan manusia maka GRK akan semakin terakumulasi sehingga makin banyak sinar panas yang diserap dan suhu bumi bertambah panas. GRK yang mempunyai waktu tinggal paling rendah adalah gas ozon (O₃) sedangkan yang terlama adalah karbon dioksida seperti dijelaskan pada Tabel 2.5.

Tabel 2.5. Waktu Tinggal Gas-Gas Rumah Kaca di Atmosfer

Gas Rumah Kaca	Waktu Tinggal di Atmosfer (tahun)
Karbon dioksida (CO ₂)	50 - 200
Metana (CH ₄)	10
Ozon (O ₃)	0,1
Dinitrogen oksida (N ₂ O)	150
CFC R-11 (CCl ₃ F)	65
CFC R-12 (CCl ₂ F ₂)	130

Sumber : IPCC, 2007

2.2.2.2. Efek Rumah Kaca

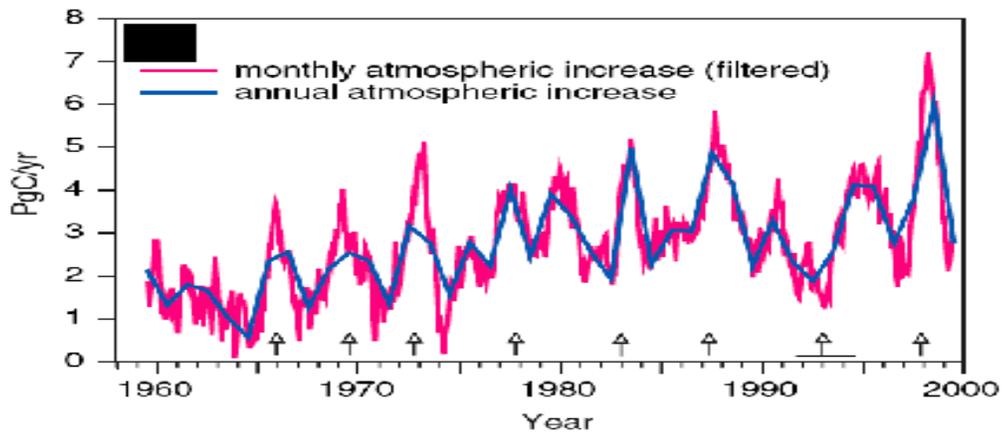
Menurut Tri (*dalam* Yuanita, 2010) efek rumah kaca (ERK) dapat divisualisasikan sebagai sebuah proses. Pada kenyataannya, di lapisan atmosfer terdapat selimut gas. Rumah kaca adalah analogi atas bumi yang dikelilingi gelas kaca. Panas matahari masuk ke bumi dengan menembus gelas kaca tersebut berupa radiasi gelombang pendek. Sebagian diserap oleh bumi dan sisanya dipantulkan kembali ke angkasa sebagai radiasi gelombang panjang. Namun, panas yang seharusnya dapat dipantulkan kembali ke angkasa menyentuh permukaan gelas kaca dan terperangkap di dalam bumi. Layaknya proses dalam rumah kaca di pertanian dan perkebunan, gelas kaca berfungsi menahan panas untuk menghangatkan rumah kaca. Masalah timbul ketika aktivitas manusia menyebabkan peningkatan konsentrasi selimut gas di atmosfer (gas rumah kaca) sehingga melebihi konsentrasi yang seharusnya, sehingga panas matahari yang tidak dapat dipantulkan ke angkasa akan meningkat pula. Semua proses tersebut disebut efek rumah kaca.

Gas-gas Nitrogen dan Oksigen yang dikandung oleh atmosfer tidak menyerap maupun melepaskan radiasi panas. Adapun yang menyerap radiasi panas yang dilepaskan oleh permukaan bumi adalah uap air, karbon dioksida, dan beberapa gas dalam jumlah kecil lainnya yang terdapat di atmosfer. Penyerapan ini menyebabkan penyelimutan sebagian yang menimbulkan perbedaan suhu sekitar 21°C dari suhu rata-rata bumi

sebenarnya. Peristiwa penyelimutan ini dikenal dengan efek gas rumah kaca alami serta gas-gas yang berperan di dalamnya disebut dengan gas-gas rumah kaca. Efek ini disebut 'alami' karena seluruh gas yang ada di atmosfer (kecuali klorofluorokarbon-CFCs) terdapat di atmosfer secara alami, jauh sebelum adanya manusia di bumi (IPCC, 2007).

Jenis GRK yang memberikan sumbangan paling besar bagi emisi gas rumah kaca adalah karbon dioksida, metana, dan dinitro oksida. Sebagian besar dihasilkan dari pembakaran bahan bakar fosil (minyak bumi dan batu bara) di sektor energi dan transport, penggundulan hutan, dan pertanian. Sementara, untuk gas rumah kaca lainnya (HFC, PFC, SF₆ hanya menyumbang kurang dari 1%. Sumber-sumber emisi karbon dioksida secara global dihasilkan dari pembakaran bahan bakar fosil (minyak bumi dan batu bara): 36% dari industri energi (pembangkit listrik/kilang minyak, dan lain-lain), 27% dari sektor transportasi, 21% dari sektor industri, 15% dari sektor rumah tangga & jasa, dan 1% dari sektor lain-lain.

Efek rumah kaca alami ditimbulkan oleh uap air dan gas karbon dioksida di atmosfer dalam jumlahnya yang alami. Jumlah uap air di atmosfer sangat bergantung dengan suhu permukaan air laut dan tidak dipengaruhi secara langsung oleh kegiatan manusia. Lain halnya dengan karbon dioksida, dimana jumlah gas ini telah berubah secara substansial, yaitu sekitar 30 persen sejak revolusi industri, akibat kegiatan industri dan penggundulan hutan. Sejak awal jaman industrialisasi, awal akhir abad ke-17, konsentrasi gas rumah kaca meningkat drastis. Menurut Forster (2007), tingkat kenaikan CO₂ bervariasi dari tahun ke tahun. Tingkat kenaikan rata-rata CO₂ sejak tahun 1980 adalah 0,4% per tahun. Tingkat kenaikan tertinggi ditunjukkan pada saat tahun terjadinya El Nino (Gambar 2.4.).

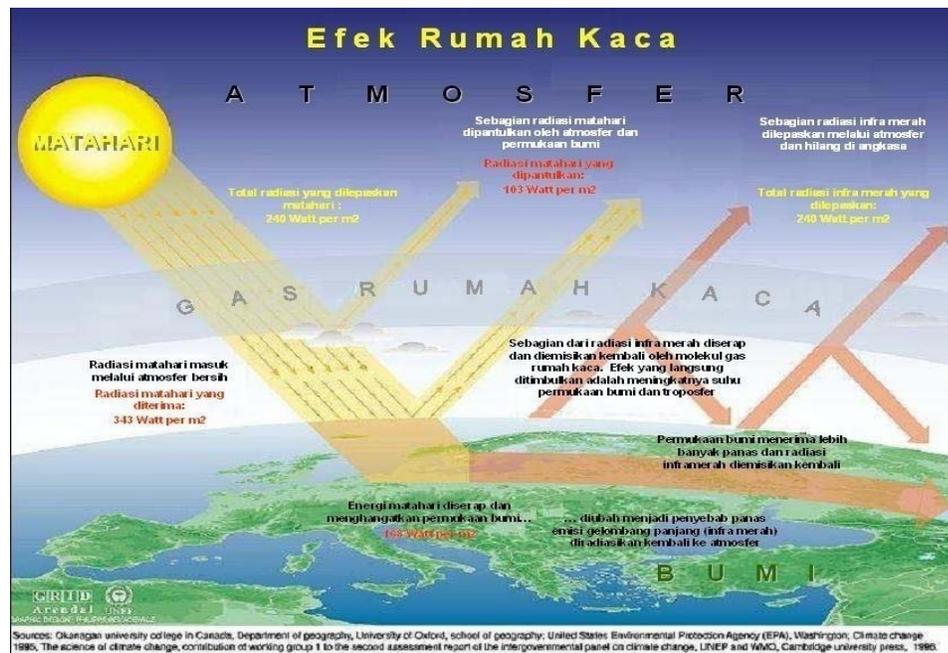


Gambar 2.4. Tingkat pertumbuhan konsentrasi CO₂ sejak tahun 1958 di Mauna Loa

Sumber: Forster, (2007)

Menurut Trismidianto (2008), konsentrasi CO₂ dari tahun 1900 sampai 2100 cenderung meningkat dari tahun ke tahun. Tahun 1970 konsentrasi CO₂ berkisar 354,17 ppm, tahun 1990 sekitar 378,59 ppm, tahun 2000 sebesar 391,42 ppm, tahun 2008 sebesar 402 ppm dan tahun 2050 sebesar 462,41 ppm serta tahun 2100 sebesar 546,27 ppm.

Menurut Beniof (*dalam* Adi, 1998) semakin meningkatnya konsentrasi gas-gas ini di atmosfer, semakin banyak panas yang terperangkap di bawahnya. Semua kehidupan di bumi tergantung pada efek rumah kaca, karena tanpa efek rumah kaca planet ini akan sangat dingin sehingga es akan menutupi seluruh permukaan bumi. Akan tetapi bila gas-gas ini semakin banyak di atmosfer, maka suhu bumi terus meningkat. Peningkatan jumlah karbon dioksida memicu terjadinya pemanasan global permukaan bumi dengan meningkatnya efek rumah kaca.



Gambar 2.5. Efek Rumah Kaca

Sumber : <http://www.biochar.org/joomla/images/stories/steiner-greenhouse-effect.jpg>

Gambar 2.5. memberikan gambaran terjadinya efek rumah kaca. Energi radiasi matahari yang sampai ke bumi sebagian besar berupa radiasi gelombang pendek, termasuk cahaya tampak. Ketika energi ini sampai ke permukaan bumi, energi ini berubah dari cahaya menjadi panas dan menghangatkan bumi. Permukaan bumi akan memantulkan kembali sebagian dari panas ini sebagai radiasi infra merah gelombang panjang ke angkasa, sebagiannya tetap terperangkap di atmosfer bumi. Gas-gas tertentu di atmosfer termasuk uap air, CO_2 , CH_4 menjadi perangkap radiasi ini. Gas-gas ini menyerap dan memantulkan kembali radiasi yang dipancarkan bumi dan akibatnya panas tersebut akan tersimpan di permukaan bumi (Rohde, 2010). Gas-gas tersebut berfungsi sebagai kaca dalam rumah kaca, mampu ditembus radiasi gelombang pendek tetapi tidak mampu ditembus radiasi gelombang panjang, sehingga gas-gas ini dikenal sebagai gas rumah kaca.

2.2.2.3. Pemanasan Global dan Perubahan Iklim

Menurut laporan *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2007) menyatakan bahwa pemanasan sistem iklim dipastikan telah terjadi yang dibuktikan

melalui pengamatan-pengamatan terhadap meningkatnya suhu udara dan suhu laut rata-rata global, meluasnya pelelehan salju dan es, serta meningkatnya ketinggian permukaan laut rata-rata global.

Meningkatnya suhu bumi ini telah terjadi sejak 157 tahun yang lalu, dimana pemanasan pada abad-abad terakhir terjadi dalam dua tahap, yaitu dari tahun 1910-an hingga 1940-an dengan kenaikan suhu sebesar $0,35^{\circ}\text{C}$, dan pemanasan yang lebih kuat mulai dari tahun 1970-an hingga akhir tahun 2006 dengan kenaikan suhu sebesar $0,55^{\circ}\text{C}$. Pemanasan sebesar itu telah menimbulkan perubahan pada iklim bumi yang ditandai dengan meningkatnya jumlah presipitasi (baik berupa hujan maupun salju), perubahan pola angin serta aspek-aspek cuaca ekstrim seperti kemarau, presipitasi berat, gelombang panas dan intensitas topan tropis.

Pemanasan global yang memicu berubahnya iklim bumi juga dipengaruhi oleh kegiatan manusia. Pembakaran bahan bakar fosil dan alih guna lahan merupakan kegiatan yang mengemisikan gas rumah kaca terbesar ke atmosfer, diikuti oleh kegiatan-kegiatan lain seperti pertanian, peternakan dan persampahan. Gas-gas ini menimbulkan efek rumah kaca pada bumi, yang meningkatkan suhu bumi dan menimbulkan perubahan iklim.

Keberadaan karbon dioksida di atmosfer bumi adalah sebesar kurang lebih 385 ppm atau dalam kepekatan sekitar 0,003%, tetapi jumlah ini bervariasi tergantung lokasi dan waktu. Walaupun gas tersebut ada pada kepekatan yang rendah ia memainkan peranan penting dalam iklim bumi dan berkontribusi pada efek rumah kaca (Staff, 2009). Karbon dioksida adalah gas rumah kaca yang penting karena mampu menyerap gelombang infra merah.

Iklim bumi akan bereaksi jika ada perubahan-perubahan pada kesetimbangan radiasi bumi yang salah satunya dipengaruhi oleh berubahnya radiasi sinar matahari yang masuk atau perubahan jumlah radiasi gelombang panjang dari bumi yang kembali ke

ruang angkasa misalnya dengan perubahan konsentrasi gas rumah kaca. Iklim bumi memperoleh energi dari matahari. Matahari memberikan energinya melalui radiasi energi pada panjang gelombang yang sangat pendek terutama pada spektrum panjang gelombang tampak atau ultra violet. Ketika pancaran/radiasi dari matahari yang berupa sinar tampak atau gelombang pendek memasuki atmosfer, yang merupakan lapisan dari berbagai macam gas yang menyelimuti bumi, dan merupakan mesin dari sistem iklim secara fisik, beberapa bagian dari sinar tersebut direfleksikan atau dipantulkan kembali oleh awan-awan dan debu-debu yang terdapat di angkasa, sebagian lainnya diteruskan ke arah permukaan daratan dan sebagian kecil diserap oleh atmosfer. Radiasi yang langsung menuju ke permukaan daratan sebagian diserap oleh bumi, tetapi bagian lainnya “dipantulkan” kembali ke angkasa oleh es, salju, air, dan permukaan-permukaan reflektif bumi lainnya sebagai proses mencapai keseimbangan energi.

Bumi meradiasikan panjang gelombang pada spektrum yang jauh lebih panjang, terutama pada spektrum infra merah karena bumi jauh lebih dingin dibandingkan dengan matahari. Radiasi panas yang dilepaskan oleh daratan dan lautan sebagian besar diserap oleh atmosfer termasuk awan dan diradiasikan kembali ke bumi. Proses pancaran sinar matahari dari angkasa menembus atmosfer sampai menuju permukaan bumi hingga dapat kita rasakan suhu bumi menjadi hangat disebut efek rumah kaca (ERK) Tanpa ada efek rumah kaca di sistem iklim bumi, maka bumi menjadi tidak layak dihuni karena suhu bumi terlalu rendah (*Global Environment Division, 2009*).

Perubahan iklim dapat mencairkan es di kutub, terjadi perubahan arah dan kecepatan angin, meningkatkan badai atmosfer, seperti angin puting beliung, gelombang pasang, meningkatkan intensitas petir, perubahan pola tekanan udara, perubahan pola curah hujan (banjir dan longsor serta kekeringan), dan siklus hidrologi terutama terhadap proses penguapan, transpirasi, *run off*, kelembaban tanah dan curah hujan, serta perubahan ekosistem, hingga bertambahnya jenis organisme penyebab penyakit. Pada tahun-tahun terakhir akibat dari kegiatan manusia telah meningkatkan efek global.

Pada sektor kehutanan peningkatan suhu yang terjadi dalam masa yang cukup lama mengakibatkan mudah terbakarnya ranting-ranting atau daun-daun akibat gesekan yang ditimbulkan. Hal ini menyebabkan kebakaran hutan dapat terjadi dalam waktu singkat.

Iklm yang lebih panas juga akan meningkatkan suhu rata-rata air laut. Dengan dua pertiga wilayah Indonesia terdiri dari lautan, maka sektor perikanan dan keanekaragaman hayati laut akan terkena dampak negatif. Pemanasan laut mengakibatkan terjadinya *coral bleaching* karena alga sebagai sumber makanan terumbu karang tidak mampu beradaptasi dengan peningkatan suhu air laut sehingga mati dan mengakibatkan ketersediaan makanan terumbu karang menipis. Perubahan iklim juga menyebabkan perubahan ekosistem yang dapat merubah pola hubungan interaksi antara lingkungan dan manusia yang berdampak pada tingkat kesehatan masyarakat. Komponen iklim seperti suhu, kelembaban, kemarau panjang dan curah hujan mempengaruhi pertumbuhan dan persebaran berbagai spesies mikroba dan parasit (Sutamihardja,2009).

2.3. Clean Development Mechanism (CDM)

Dalam rangka mengurangi tingkat emisi GRK telah berhasil dicapai suatu konsensus bersama untuk mengadopsi sebuah protokol yang diberlakukan untuk negara-negara industri maju yang disebut Protokol Kyoto. Protokol Kyoto disusun untuk menentukan target dan cara-cara penurunan konsentrasi GRK. Di dalam Protokol Kyoto telah disepakati bahwa sebagai langkah awal stabilisasi konsentrasi GRK negara-negara maju berkomitmen akan menurunkan emisi GRK sedikitnya 5% dari tingkat emisi yang dihitung pada tahun 1990.

Implementasi Protokol tersebut adalah dengan menetapkan mekanisme mitigasi perubahan iklim mencapai target pengurangan emisi CO₂ yang disyaratkan oleh konvensi perubahan iklim yaitu : *Joint Implementation (JI)*, *Clean Development Mechanism (CDM)* dan *Emission Trading (ET)*. Negara-negara maju yang

berkomitmen untuk membatasi atau menurunkan emisi diperbolehkan oleh Protokol Kyoto untuk bekerjasama dengan negara lain, termasuk dengan negara berkembang. Antar negara-negara maju, mekanisme kerjasama ini terjadi melalui *Emissions Trading* (ET) atau *Joint Implementation* (JI). Antara negara maju dan negara berkembang, melalui *Clean Development Mechanism* (CDM). Negara-negara maju yang harus membatasi atau menurunkan emisinya harus mendapatkan sertifikasi penurunan emisi, dikenal juga secara generik sebagai kredit karbon atau *carbon credits*. Untuk CDM, kredit karbon ini disebut *Certified Emissions Reduction* (CER). Transfer sertifikasi penurunan emisi ini biasanya melalui perdagangan, dengan harga yang ditentukan oleh pasar sesuai dengan tingkat permintaan dan pasokan dari sertifikasi itu. Mekanisme kerjasama ini melahirkan sebuah pasar yang biasa disebut sebagai “pasar karbon” (*carbon market*).

Sebagai salah satu negara berkembang yang ikut meratifikasi Protokol Kyoto, Indonesia dapat terlibat dalam proyek kerja CDM, terutama semenjak dibentuknya *Indonesia National Strategy Study on CDM* pada Februari 2000. Pemerintah Indonesia menilai CDM sebagai sebuah peluang sumber pemasukan negara dalam membiayai beragam upaya program pembangunan berkelanjutan nasional.

CDM diatur dalam pasal 12 Protokol Kyoto, merupakan kerangka multilateral yang memungkinkan negara maju melakukan investasi di negara berkembang untuk mencapai target penurunan emisinya. Melalui CDM negara berkembang akan mendapatkan tambahan pendanaan dan alih teknologi dari negara maju untuk mencapai tujuan pembangunan berkelanjutan, sementara negara maju akan mendapatkan *Certified Emission Reduction* (CER) dari proyek CDM yang dilaksanakan di negara berkembang. CER adalah pengurangan emisi yang disertifikasi dari proyek yang dapat menekan emisi (Sutamihardja,2009). Mekanisme CDM inilah yang berikutnya menjadi kerangka acuan atas bergulirnya beragam proyek pembangunan berkelanjutan yang disertifikasi guna mengurangi kadar CO₂ di udara.

Dua pendirian tersebut ditujukan bagi upaya menciptakan keseimbangan kembali kadar konsentrasi GRK pada lapisan atmosfer. Karena dengan adanya keseimbangan proporsi GRK, maka diharapkan bahwa tata ekologi Bumi akan dapat pulih seperti sedia kala. Kecenderungan pemanasan global, perubahan iklim, dan bencana alam lainnya dapat segera dihindarkan. Upaya untuk menciptakan keseimbangan kadar konsentrasi GRK pada lapisan atmosfer melalui inovasi pembangunan berkelanjutan dan segala macam implementasinya dikenal dengan upaya *carbon neutral*.

Industri yang melakukan sertifikasi akan mendapatkan keuntungan berupa kompensasi sebesar US\$ 5-10 dari pengurangan CO₂ setiap tonnya. Sesuai Protokol Kyoto bahwa setiap upaya negara berkembang untuk mereduksi GRK akan mendapat kompensasi dana dari negara maju yang membeli sertifikat CER. Sertifikasi dilakukan atas dasar 3 syarat utama sesuai dengan ketentuan :

- a. Partisipasi negara berkembang dilakukan atas dasar sukarela dan pihak-pihak yang terlibat telah menyetujuinya.
- b. Hasil penurunan emisi harus nyata, dapat diukur dan memberi dampak jangka panjang dalam hal perlindungan iklim.
- c. Kegiatan CDM harus menghasilkan keuntungan atau perolehan (*additionally*) dalam hal pengurangan emisi dibanding jika tidak ada kegiatan.

2.4. Produksi Bersih (*Cleaner Production*)

Menjaga kelestarian lingkungan sesuai Undang-undang Lingkungan Hidup Nomor 32 Tahun 2009 dapat diterapkan dalam bentuk meminimalkan limbah yang dihasilkan oleh industri atau perusahaan. Salah satu cara atau metode yang dapat digunakan untuk minimalisasi limbah adalah metode Produksi Bersih. Menurut Panggabean (*dalam* Fitriawan, 2007) pendekatan produksi bersih dalam pelaksanaannya tidak bisa terlepas dari satu hal penting yaitu teknik minimisasi limbah (*waste minimization techniques*). Sebuah pendekatan dengan mengurangi volume, konsentrasi, toksisitas,

dan tingkat bahaya limbah yang berasal dari suatu kegiatan, dengan jalan reduksi pada sumbernya dan/atau pemanfaatan limbah.

Di Indonesia, produksi bersih diperkenalkan oleh BAPEDAL (Badan Pengendalian Dampak Lingkungan) pada tahun 1993. Hal tersebut juga diperkuat dengan Kep Men LH, No 75 tahun 2004 yang menyatakan bahwa perusahaan dan industri di Indonesia diharapkan untuk dapat menjaga kelestarian lingkungan dalam pelaksanaan produksinya. Produksi bersih terus dikembangkan dan disebarluaskan ke seluruh sektor-sektor terkait di Indonesia. Pada tahun 1995, Pemerintah Indonesia mencanangkan Komitmen Nasional Produksi Bersih.

Kep.Men LH Nomor 75 Tahun 2004 menetapkan bahwa produksi bersih merupakan suatu strategi pengelolaan lingkungan yang bersifat preventif dan terpadu yang perlu diterapkan secara terus menerus pada proses produksi dan daur hidup produk dengan tujuan untuk mengurangi resiko terhadap manusia dan lingkungan.. Tujuan utama dari penerapan Produksi Bersih ini adalah dengan melakukan implementasi perubahan dalam desain produk, proses manufaktur, dan teknik-teknik manajemen untuk meningkatkan efisiensi, mencegah polusi dan mengurangi limbah. Produksi Bersih dipertimbangkan pada tahap sedini mungkin dalam pengembangan proyek-proyek baru atau pada saat mengkaji proses atau aktivitas yang sedang berlangsung, bersifat proaktif, harus diprakarsai oleh industri dan kepentingan-kepentingan yang terkait, bersifat fleksibel, dapat mengakomodasi berbagai perubahan, perkembangan di bidang politik, ekonomi, sosial-budaya, ilmu pengetahuan dan teknologi dan kepentingan berbagai kelompok masyarakat serta perbaikan berlanjut.

Melalui penerapan Produksi Bersih dapat dicapai manfaat sebagai berikut :

- a. Mencegah terjadinya pencemaran dan perusakan lingkungan melalui upaya minimisasi limbah, daur ulang, pengolahan, dan pembuangan limbah yang aman.
- b. Mendukung prinsip pemeliharaan lingkungan dalam rangka pelaksanaan Pembangunan Berkelanjutan.

- c. Dalam jangka panjang dapat meningkatkan pertumbuhan ekonomi melalui penerapan proses produksi, penggunaan bahan baku dan energi yang efisien.
- d. Mencegah atau memperlambat degradasi lingkungan dan mengurangi eksploitasi sumberdaya alam melalui penerapan daur ulang limbah dan dalam proses yang akhirnya menuju pada upaya konservasi sumberdaya alam untuk mencapai tujuan Pembangunan Berkelanjutan.
- e. Memberi peluang keuntungan ekonomi, sebab di dalam produksi bersih terdapat strategi pencegahan pencemaran pada sumbernya (*source reduction and in process recycling*), yaitu mencegah terbentuknya limbah secara dini, dengan demikian dapat mengurangi biaya investasi yang harus dikeluarkan untuk pengolahan dan pembuangan limbah atau upaya perbaikan lingkungan.
- f. Memperkuat daya saing produk di pasar global.
- g. Meningkatkan citra produsen dan meningkatkan kepercayaan konsumen terhadap produk yang dihasilkan.
- h. Mengurangi tingkat bahaya kesehatan dan keselamatan kerja.

Elemen utama produksi bersih adalah Analisis Daur Hidup (*Product Life Cycle Assessment*) dan minimisasi limbah. Minimisasi limbah adalah upaya untuk mencegah dan atau mengurangi timbulnya limbah, dimulai sejak pemilihan bahan, teknologi proses, penggunaan materi dan energi dan pemanfaatan produk sampingan pada suatu sistem produksi. Menurut Kaarstad (*dalam Yuanita* , 2010) kegiatan minimisasi limbah meliputi :

- a. Pencegahan pencemaran yang dikenal dengan nama *in-process recycling and reuse* atau *on-site closed-loop*. Bahan kimiawi bergerak hanya di dalam produksi khusus dan tidak akan muncul sebagai limbah. Upaya yang dilakukan pada tahap ini adalah *reduce, reuse* dan *recycling*.
- b. Penanggulangan pencemaran yang dikenal dengan nama *out-of-process recycling and reuse* atau *out-of-loop*. Kegiatan penanggulangan dilakukan setelah kegiatan pencegahan sudah tidak dimungkinkan lagi.

Minimisasi limbah dapat dilakukan dengan cara *reduce, reuse, recycle, recovery* (4R),(Freeman, 1990). *Reduce*: Upaya untuk mengurangi pemakaian/penggunaan bahan baku seefisien mungkin di dalam suatu proses produksi dan juga memperhatikan agar limbah yang terbuang menjadi sedikit. *Reuse*: Upaya penggunaan limbah untuk digunakan kembali tanpa mengalami proses pengolahan atau perubahan bentuk. Reuse dapat dilakukan di dalam atau di luar daerah proses produksi yang bersangkutan. *Recycle*: Upaya pemanfaatan limbah dengan cara proses daur ulang melalui pengolahan fisik atau kimia, baik untuk menghasilkan produk yang sama maupun produk yang berlainan. Daur ulang dapat dilakukan di dalam atau di luar daerah proses produksi yang bersangkutan. *Recovery*: Upaya pemanfaatan limbah dengan jalan memproses untuk memperoleh kembali materi/energi yang terkandung di dalamnya.

Metode 4 R (*reduce, reuse, recycle, recovery*) pada dasarnya ditujukan untuk efisiensi penggunaan materi dan energi, pemisahan ketidakmurnian dari limbah sehingga dapat digunakan kembali dan pemanfaatan kembali limbah untuk menghasilkan bahan baku sekunder atau memanfaatkan limbah yang semula dianggap tidak berharga menjadi produk lain yang bermanfaat (*by product*).

Berbagai teknologi yang digunakan dalam 4 R (Gradel, 1995) antara lain:

- a. *Absorpsi* (penyerapan).
- b. *Filtrasi* (penyaringan).
- c. *Clarification* (klarifikasi), suatu kombinasi proses yang tujuan utamanya untuk mengurangi konsentrasi bahan padat tersuspensi dalam cairan.
- d. *Segregation*, upaya memisahkan suatu limbah (cairan limbah) dari limbah yang lain untuk tujuan pengolahan tertentu. Cara ini dapat mengurangi beban dan biaya pengolahan limbah.
- e. *Reverse Osmose* (osmose terbalik) adalah proses pemisahan yang dikendalikan tekanan membran. Proses RO menggunakan membran *semipermeable* yang dapat melewatkan air yang dimurnikan dan menahan garam-garam terlarut.

- f. *Recovery Nutrient* dan Energi
- g. Bioteknologi.

Dengan makin meningkatnya tuntutan untuk melaksanakan produksi bersih dan tidak mencemari lingkungan, maka usaha pencegahan timbulnya buangan yang berbahaya dan beracun sampai ke tingkat minimal merupakan prioritas pertama. Pertimbangan selanjutnya baru kemungkinan proses daur ulang bahan buangan. Pertimbangan akhir adalah bagaimana mengolah buangan yang tidak dapat dihindari pembentukannya. Dalam hal ini, nilai usaha pencegahan lebih diutamakan dari penanggulangan akibat negatif dari limbah yang terbentuk. Limbah yang tidak dapat dimanfaatkan lagi diolah melalui berbagai teknik pengolahan limbah, seperti teknik pengolahan secara mekanis, kimia, biologi.

2.5. Produksi Baja di PT. Krakatau Steel

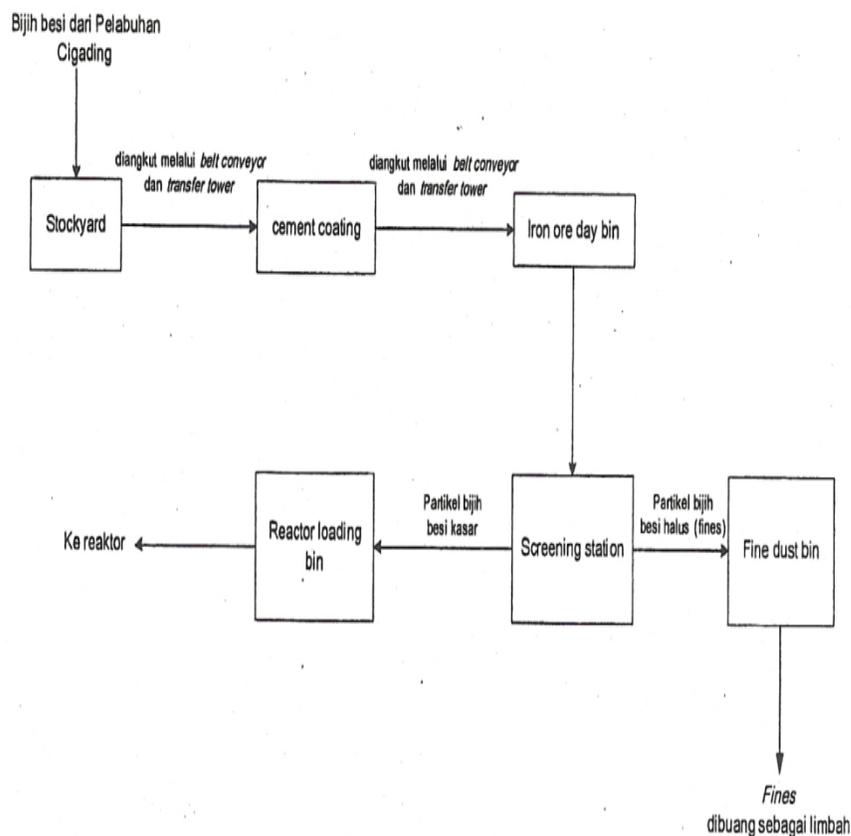
Pabrik Besi Spons Hyl III PT. Krakatau Steel merupakan pabrik besi spons dengan bahan baku utama berupa pellet dan scrap serta bahan baku tambahan berupa kapur, *alloy* dan gas alam. Proses di Hyl III dibagi menjadi beberapa bagian yaitu seksi penanganan bijih besi, seksi reformasi dan pembangkitan kukus/uap air, seksi pengkondisian gas reduktor, reaktor, seksi absorpsi CO₂ dan seksi penanganan besi spons sebagai berikut:

- a. Seksi penanganan bijih besi

Bijih besi yang dikirim dari supplier diterima oleh pihak PT. Krakatau Steel di pelabuhan Cigading. Pada lokasi pabrik, bijih besi kemudian disimpan di lapangan terbuka yang dinamakan *stockyard*.

Cement coating merupakan proses pembalutan bijih besi dengan sedikit bubuk semen pada kondisi basah. Hal ini dilakukan untuk mencegah aglomerasi partikel bijih besi pada panas yang tinggi di reaktor, karena aglomerasi tersebut dapat menyebabkan penyumbatan pada reaktor.

Iron ore day bin berfungsi sebagai penampungan bijih besi, untuk diumpungkan kepada *screening station*. Di *screening station* partikel bijih besi yang kasar dan halus dipisahkan. Partikel yang halus kemudian ditampung di *fine dust bin* untuk kemudian dibuang sebagai limbah. Partikel bijih yang halus harus dipisahkan karena dapat teraglomerasi dan menyumbat reaktor. Partikel bijih yang kasar kemudian dibawa ke reaktor *loading bin* untuk diumpungkan ke reaktor (Gambar 2.6.).



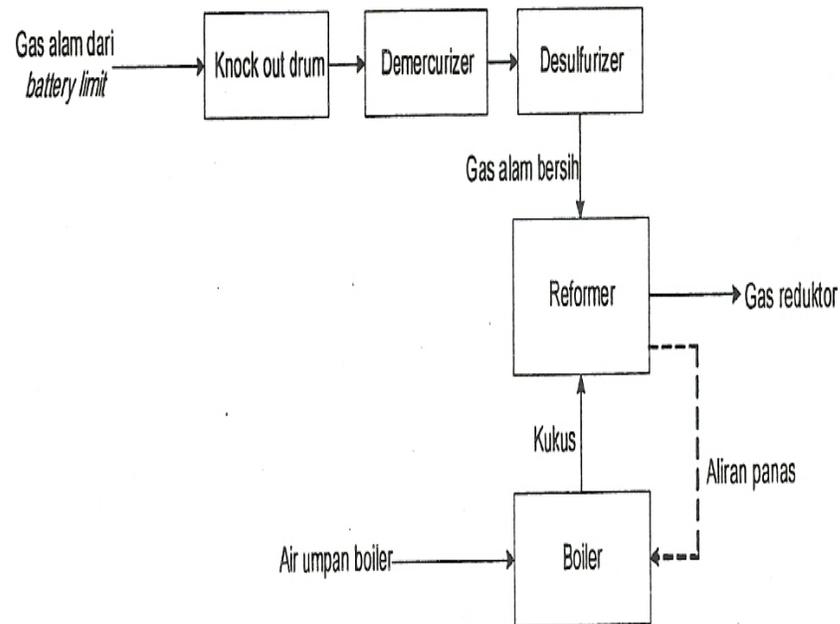
Gambar 2.6. Diagram Blok Penanganan Bijih Besi

Sumber: Laporan PT. KS, 2010

b. Seksi reformasi dan pembangkitan kukus/uap air

Reduksi bijih besi menjadi besi spons di dalam proses HYL membutuhkan gas reduktor sebagai reduktor. Gas reduktor tersebut dihasilkan di seksi ini. Gas reduktor

merupakan campuran gas CO dan H₂ yang merupakan hasil dari reaksi steam reforming antara kukus dan gas alam. Reaksi ini dilangsungkan di unit bernama reformer.



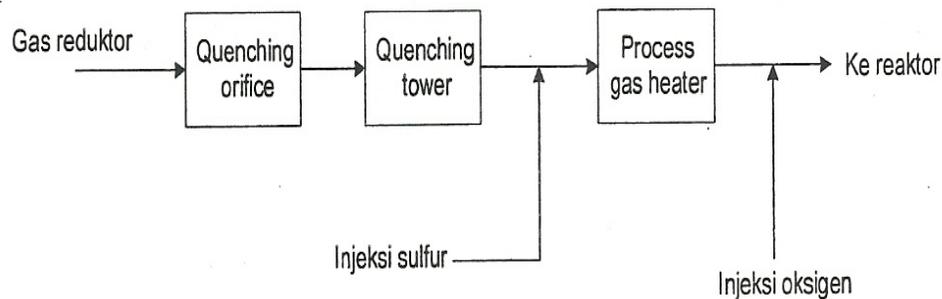
Gambar 2.7 Diagram blok proses seksi reformasi dan pembangkitan kukus

Sumber: Laporan Survey PT. KS, 2010

Gas alam untuk reformasi disuplai dari daerah dalam yang dinamakan *battery limit*. *Battery limit* ini terhubung dengan pipa gas Pertamina dari daerah Cilamaya, Jawa Barat. Sebelum memasuki reformer, gas alam ini dibersihkan dari partikel-partikel cairan hidrokarbon berat, raksa dan belerang di dalam unit-unit *knock out drum*, *demercurizer* dan *desulfurizer*. Partikel-partikel cairan dapat mengganggu jalannya reaksi reformasi, sedangkan raksa dan belerang dapat meracuni katalis yang digunakan dalam reaksi reformasi tersebut.

Gas alam yang telah bersih kemudian bercampur dan bereaksi di reformer, dan terbentuklah gas reduktor. Pemanasan dilakukan di unit ini dengan menggunakan panas dari pembakaran bahan bakar berupa gas alam. Pembakaran ini merupakan reaksi yang menghasilkan gas panas. Panas dari gas ini kemudian dimanfaatkan unit boiler untuk membangkitkan kukus. Selain itu, boiler juga mendapatkan panas dari gas reduktor yang suhunya masih tinggi. Gas reduktor ini perlu diturunkan suhunya untuk memasuki tahapan proses selanjutnya (Gambar 2.7).

c. Seksi pengkondisian gas reduktor



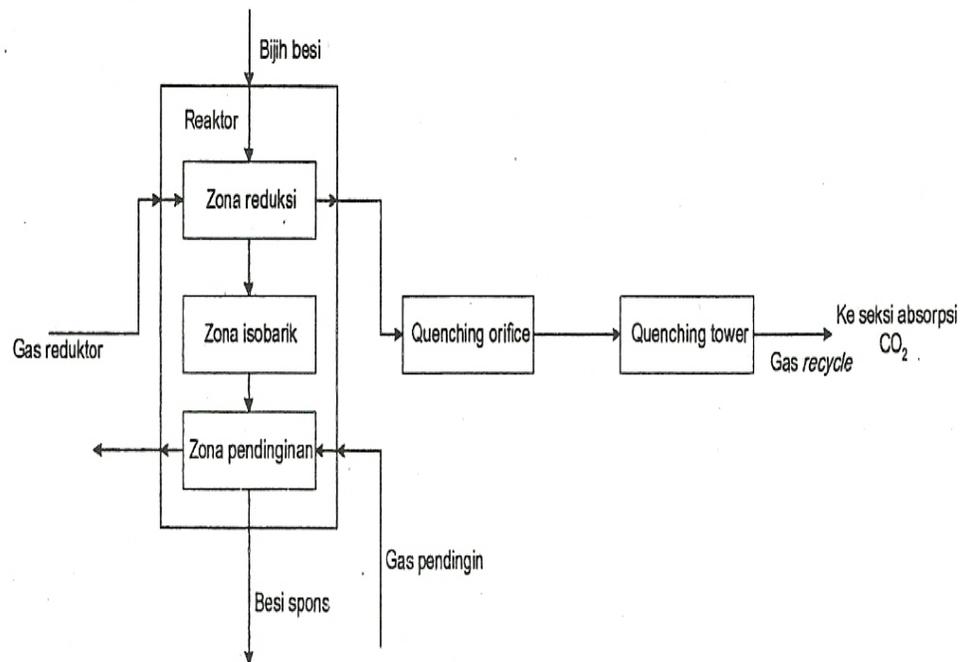
Gambar 2.8. Diagram Blok Proses Pengkondisian Gas Reduktor

Sumber: Laporan Survey PT. KS, 2010

Gas reduktor masih banyak mengandung kukus. Kukus ini harus dipisahkan karena akan mengganggu proses reduksi. Kukus dapat dipisahkan dengan cara melarutkannya di dalam air. Proses tersebut diimplementasikan di unit *quenching orifice* dan *quenching tower*. Di dalam kedua unit ini, air dingin dalam bentuk *spray* dikontakkan dengan gas reduktor dan kukus di dalam gas dilarutkan oleh air tersebut. Gas reduktor memiliki kecenderungan yang besar untuk menyebabkan korosi pada pipa. Sulfur yang diinjeksikan ke dalam saluran gas reduktor berfungsi sebagai *dynamic seal*. Sulfur ini berfungsi untuk melindungi pipa dari korosi oleh gas reduktor tersebut.

Reaksi reduksi memerlukan temperatur yang tinggi sekitar 933°C . Agar kondisi reaksi tersebut tercapai pada reaktor, gas perlu dipanaskan terlebih dahulu. Pemanasan gas ini dilakukan di unit *process gas heater*. Untuk menambahkan panas ke dalam gas reduktor, diinjeksikan oksigen murni pada keluaran *heater* tersebut agar terjadi reaksi *partial combustion*. Reaksi *partial combustion* ini merupakan reaksi eksotermis yang menambahkan cukup banyak panas ke dalam aliran gas reduktor tersebut (Gambar 2.8.).

d. Reaktor



Gambar 2.9. Diagram Blok Proses pada Reaktor
Sumber: Laporan Survey PT. KS, 2010

Gas reduktor yang panas dari gas heater memasuki reaktor dan terjadi kontak dengan bijih besi yang turun ke bawah pada daerah yang dinamakan zona reduksi. Reaksi

reduksi bijih besi menjadi besi spons terjadi disini pada tekanan sekitar 5.2 kg/cm^3 . Reaksinya adalah sebagai berikut :

Reaksi dengan H_2



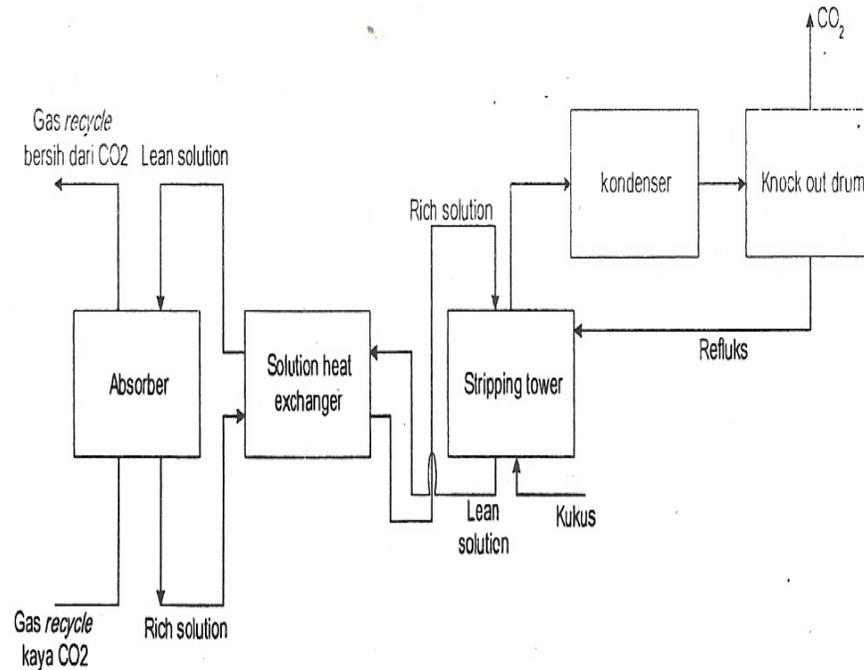
Reaksi dengan CO



Gas hasil reduksi masih banyak mengandung CO dan H_2 , sehingga masih memiliki kemampuan untuk kembali mereduksi bijih besi. Tetapi kandungan CO_2 dari gas hasil reduksi ini masih tinggi, karena itu gas tersebut perlu dialirkan dulu ke seksi absorpsi CO_2 , agar CO_2 yang terkandung dalam gas dapat dikurangi kadarnya. CO_2 perlu dipisahkan dari gas reduktor, karena merupakan oksidator yang cukup baik. Sebelum memasuki seksi absorpsi CO_2 , gas dibersihkan dan didinginkan dulu di *quenching orifice* dan *quenching tower*. Di dua unit ini gas dikontakkan langsung dengan air pendingin yang disemprotkan dalam bentuk *spray*.

Besi spons yang terbentuk di zona reduksi kemudian turun ke zona isobarik. Pada zona ini tidak terjadi sesuatu yang signifikan, karena pada dasarnya zona ini hanya merupakan perbatasan antara zona reduksi dan zona pendinginan. Keberadaan zona ini dimaksudkan agar tidak ada penetrasi gas reduktor ke zona pendinginan atau sebaliknya.

Di zona pendinginan, besi spons didinginkan hingga temperatur sekitar 50^0C . Besi spons didinginkan oleh gas pendingin yang diproduksi oleh gas alam. Setelah mendinginkan besi spons, gas pendingin ini kemudian memasuki sirkuitnya untuk diproses agar dapat dimanfaatkan kembali (Gambar 2.9.).

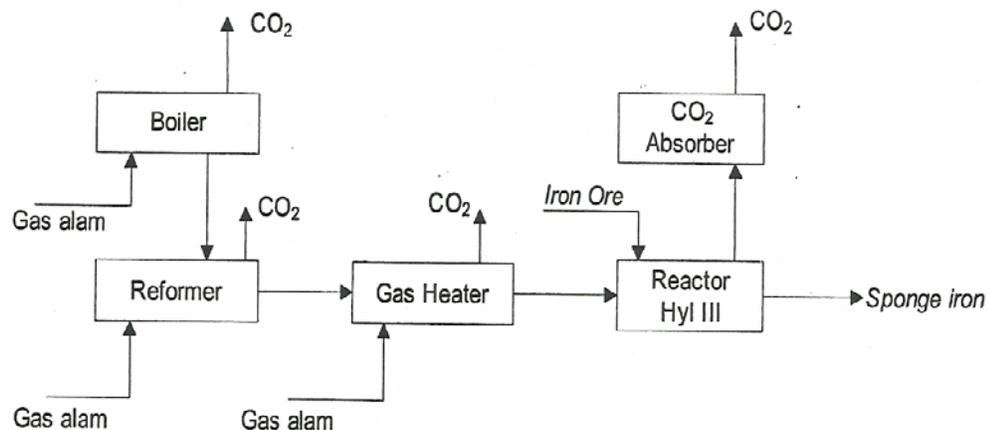
e. Seksi absorpsi CO₂Gambar 2.10. Diagram Blok Proses di Seksi Absorpsi CO₂

Sumber: Laporan Survey PT. KS, 2010

Gas *recycle* dari reaktor yang kaya oleh CO₂ dibersihkan dari CO₂ oleh unit *absorber*. Di unit ini CO₂ diserap oleh larutan UCARSOL, suatu senyawa organik. Larutan UCARSOL ini melakukan kontak dengan gas dalam unggun *packing*. Setelah larutan ini menyerap CO₂, ia menjadi kaya dengan CO₂ (*rich solution*). Larutan UCARSOL merupakan bahan pembantu yang cukup mahal dan tidak ekonomis jika dibuang begitu saja dan akan menjadi limbah. Penggunaan larutan ini dapat dilaksanakan dalam suatu siklus, dimana larutan tersebut dapat digunakan untuk menyerap CO₂ berulang kali. Agar hal tersebut terlaksana, larutan yang telah jenuh CO₂ harus diregenerasi dengan cara membersihkan larutan tersebut dari CO₂ yang dikandungnya dengan menggunakan kukus di dalam proses *stripping*.

Di dalam proses *stripping* diperlukan temperatur yang tinggi. Oleh karena itu, *rich solution* keluaran reaktor dipanaskan terlebih dahulu di *solution heat exchanger*, dimana ia menerima panas dari larutan yang telah dibersihkan dan miskin akan CO₂ (*lean solution*) keluaran *stripping tower*. Temperatur *rich solution* naik dari 65⁰C menjadi 103⁰C. *Rich solution* kemudian dikontakkan dengan kukus di dalam *stripping tower*. Kukus melucuti CO₂ dari larutan UCARSOL, sehingga *rich solution* berubah menjadi *lean solution*. Kukus keluar dari atas menara dengan membawa serta CO₂. Kukus yang mengandung CO₂ kemudian didinginkan di kondensator, dimana terbentuk 2 fasa yaitu cair dan gas. Campuran 2 fasa ini kemudian dipisahkan di *knock out drum*, dimana CO₂ yang berada pada fasa gas keluar dari atas drum, sementara kondensat dikembalikan sebagai refluks ke *stripping tower*. Gas yang sarat CO₂ tersebut kemudian dialirkan ke proses gas heater untuk dibakar (Gambar 2.10.).

Ringkasan proses yang terjadi di pabrik Hyl 3 adalah sebagai berikut:



Gambar 2.11. Diagram Blok *Direct Reduction Plant*

Sumber: Laporan Survey PT. KS, 2010

Proses yang terjadi pada reformer adalah reformasi yaitu reaksi yang terjadi antara gas alam (CH₄) dengan air/steam (H₂O) menghasilkan CO dan H₂. Gas proses ini dialirkan menuju reaktor dengan temperatur tinggi dan pembakaran oksigen (O₂) untuk mereduksi bijih besi/pellet (Fe₂O₃) sehingga menghasilkan besi spons murni

(Fe). Proses ini menghasilkan H₂O dan CO₂ dan dialirkan menuju unit *CO₂ Removal System* yang bertujuan untuk menyerap gas CO₂ dengan menggunakan larutan penyerap. H₂O hasil pengolahan ini digunakan kembali pada proses reduksi bijih besi di reaktor, sedangkan gas CO₂ langsung dibuang ke udara (Gambar 2.11.).

Reaksi yang terjadi pada proses pembuatan baja sebagai berikut:

1. Reaksi Reformasi



Reaksi ini menghasilkan gas CO dan H₂ yang merupakan hasil dari reaksi steam reforming antara kukus (uap air) dan gas alam. Gas tersebut diperlukan dalam proses reduksi bijih besi menjadi besi spons.

2. Reaksi Reduksi

Reaksi dengan H₂



Reaksi dengan CO



Untuk mengetahui suatu proses berjalan baik atau tidak, kesetimbangan massa sistem perlu diperhatikan. Melalui kesetimbangan massa akan diperoleh gambaran *input* dan *output* material yang terlibat di dalam proses tersebut. Kesetimbangan massa dipelajari dalam cabang ilmu neraca massa (Reklaitis, 1983). Neraca massa berhubungan dengan Hukum Kekekalan Massa yang menyebutkan bahwa di alam ini jumlah total massa adalah kekal, tidak dapat dimusnahkan ataupun diciptakan.

Massa yang masuk ke dalam suatu sistem harus keluar meninggalkan sistem tersebut atau terakumulasi di dalam sistem. Hukum kekekalan massa ini memberikan persamaan dasar neraca massa :

$$[\text{massa masuk}] = [\text{massa keluar}] + [\text{akumulasi massa}]$$

dengan [massa masuk] merupakan massa yang masuk ke dalam sistem, [massa keluar] merupakan massa yang keluar dari sistem, dan [akumulasi massa] merupakan akumulasi massa dalam sistem.

Menurut Yuanita (2010), kesetimbangan massa menunjukkan perubahan input secara fisik menjadi *output*, di mana dari perubahan tersebut akan terlihat perubahan *input* menjadi *produk*, *by product* atau *non product output*. *Input* fisik terdiri dari bijih besi yang menjadi *output* berupa produk besi spons. *Input* gas alam melalui proses produksi menjadi *non product output* yaitu gas CO₂. *Input* berupa gas O₂ akan menjadi *non product output* berupa CO₂ dan *by product output* H₂O. H₂O adalah hasil sampingan dari proses reduksi *pellet* dengan gas proses. *Input* berupa gas N₂ menjadi *product output* N₂. Karena pada proses produksi, N₂ tidak berubah menjadi apapun (*inert*). Sedangkan *input* air pada *Reformer* menjadi *product output* CO dan H₂ yang akan digunakan pada proses reduksi.

2.6. Pengolahan CO₂(g) menjadi CO₂(l) dan Pemanfaatannya

Karbon dioksida sebagai salah satu gas rumah kaca yang paling dominan menyebabkan terjadinya pemanasan global, juga dapat memberikan manfaat bagi perkembangan teknologi. Berbagai macam proses pemisahan gas CO₂ secara luas juga telah dikembangkan untuk mereduksi CO₂ dari aliran gas sebagai upaya minimisasi limbah. Rao dan Rubin (2002), menyatakan ada beberapa teknologi untuk memisahkan dan menangkap CO₂ seperti metode pelarutan dan difusi dengan teknologi membran, kriogenik (pendinginan), adsorpsi, dan absorpsi secara kimiawi. Pada teknologi membran, fungsi dari membran adalah sebagai filter yang sangat spesifik. Hanya molekul dengan ukuran tertentu saja yang bias melewati membran. Teknologi ini membutuhkan aliran gas yang sangat murni dan terbebas dari partikel pengotor. Sementara teknologi kriogenik hanya dapat digunakan pada aliran gas dengan kandungan CO₂ yang sangat besar, jika digunakan pada kandungan gas CO₂

yang sangat rendah metode ini tidak efektif dari segi ekonomi. Sedangkan metode adsorpsi mempunyai kapasitas dan selektivitas yang rendah sehingga tidak berfungsi untuk pengambilan CO₂ dari aliran gas dengan baik. Untuk metode absorpsi dengan memisahkan CO₂ dari aliran gas, menggunakan larutan kimia atau fisika merupakan metode yang paling ekonomis dan banyak digunakan (Altway,2008).

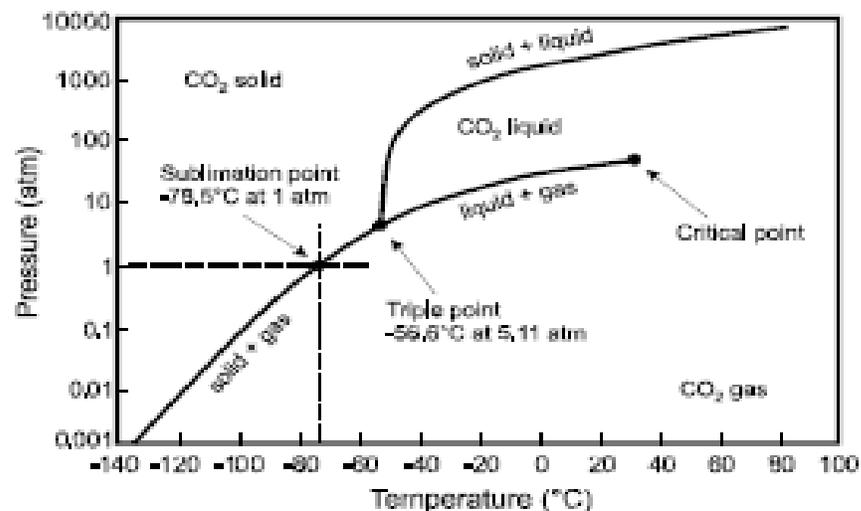
Kriogenik adalah salah satu metode pemurnian yang melibatkan campuran gas dengan kondensasi dan destilasi pada temperatur rendah. Dalam proses kriogenik *crude* biogas ditekan hingga 80 bar (Patricia,2011). Proses kompresi berjalan secara *multistage* dengan intercooler, biogas bertekanan kemudian dikeringkan untuk menghindari terjadinya pembekuan selama proses pendinginan berlangsung, kemudian didinginkan hingga -45⁰C, CO₂ yang terkondensasi dihilangkan dalam separator. Kemudian CO₂ diproses lebih lanjut untuk *recovery* metana yang terlarut, lalu *recycle* menuju inlet gas. Melalui proses ini gas metana yang dihasilkan mencapai kemurnian 97%.

Penelitian untuk memisahkan CO₂ telah banyak dilakukan. Dang dan Rochelle (2001), melakukan penelitian mengenai kelarutan dan laju absorpsi CO₂ dalam monoethanolamine/piperazine/air dengan hasil piperazine pada 24% mol dari total amine mengurangi kesetimbangan CO₂ 50% dan meningkatkan laju absorpsi CO₂ 50% hingga 100%. Hilliard (2005) melakukan penelitian proses penghilangan CO₂ dengan pelarut K₂CO₃ dan piperazine (PZ) dengan mengukur kelarutan CO₂ pada 40-110⁰C dengan rentang komposisi larutan dalam PZ/K₂CO₃ dengan hasil terdapat ketidak konsistenan antara kemampuan prediksi untuk tekanan uap PZ karena kurangnya data literatur. Winarno *et al* (2008) melakukan penelitian mengenai proses absorpsi disertai reaksi kimia gas CO₂ menggunakan larutan K₂CO₃ dan bahan activator diethanolamin dengan hasil penelitian bahwa kenaikan konsentrasi CO₂ dalam gas umpan pada temperatur konstan akan menyebabkan kenaikan CO₂ *loading*, penurunan kadar K₂CO₃, kenaikan kelarutan CO₂. Agustina (2010) dalam penelitiannya melakukan proses pemisahan gas CO₂ dari gas buang industri besi baja

melalui optimalisasi rancangan kontaktor membran dan diperoleh hasil bahwa dengan area membran 27,8120 ft², jumlah pemisahan gas CO₂ dari gas buang sebesar 99,96%.

Dalam proses industri baja, emisi CO₂ terbesar dihasilkan dari sisa proses reduksi bijih besi yaitu 63% dari emisi keseluruhan. Salah satu cara meminimalisasi limbah adalah melalui pendekatan produksi bersih dengan daur ulang (*recycle*) limbah menjadi *by product* yang bermanfaat.

Pengolahan gas CO₂ menjadi CO₂ cair tidak terlepas dari prinsip pengaturan suhu dan tekanan. Menurut Shakhshiri, (2008), CO₂ berada dalam bentuk cair pada temperatur 20°C dan tekanan 30 atm. Tekanan terendah CO₂ dimana CO₂ berada pada titik tripel yaitu pada tekanan 5.11 atm pada suhu -56.6°C. Rendahnya titik kritis CO₂ memberikan banyak keuntungan dalam proses pemanfaatannya. Pada kondisi di atas titik kritis, CO₂ berada pada kondisi superkritis sehingga lebih dikenal dengan superkritis karbon dioksida (James, 2002) . Kondisi operasional yang sering kali dipakai dalam dunia industri adalah pada range temperatur di bawah 200°C dan range tekanan di bawah 400 bar. (Gambar 2.12.).



Gambar 2.12. Titik Kritis CO₂
Sumber : Shakhshiri (2008)

Karbon dioksida tidak mempunyai bentuk cair pada tekanan di bawah 5,1 atm namun langsung menjadi padat pada temperatur di bawah $-78\text{ }^{\circ}\text{C}$. Gas CO_2 memiliki suhu kritis yang cukup tinggi yakni sekitar 31°C . Memiliki titik kritis 73 atm. CO_2 cair akan membeku pada suhu $-56,6^{\circ}\text{C}$ (5,2 atm). Tekanan uap padatnya adalah 1 atm pada $-78,5^{\circ}\text{C}$ sehingga sangat memungkinkan untuk menguap pada udara terbuka tanpa mencair terlebih dahulu. Bila CO_2 cair dibiarkan menguap, maka akan terbentuk massa kristalin seperti salju yang dapat dipakai sebagai perendah suhu. Sifat fisika CO_2 dapat dilihat pada Tabel 2.6. di bawah ini :

Tabel 2.6. Sifat Fisika CO_2

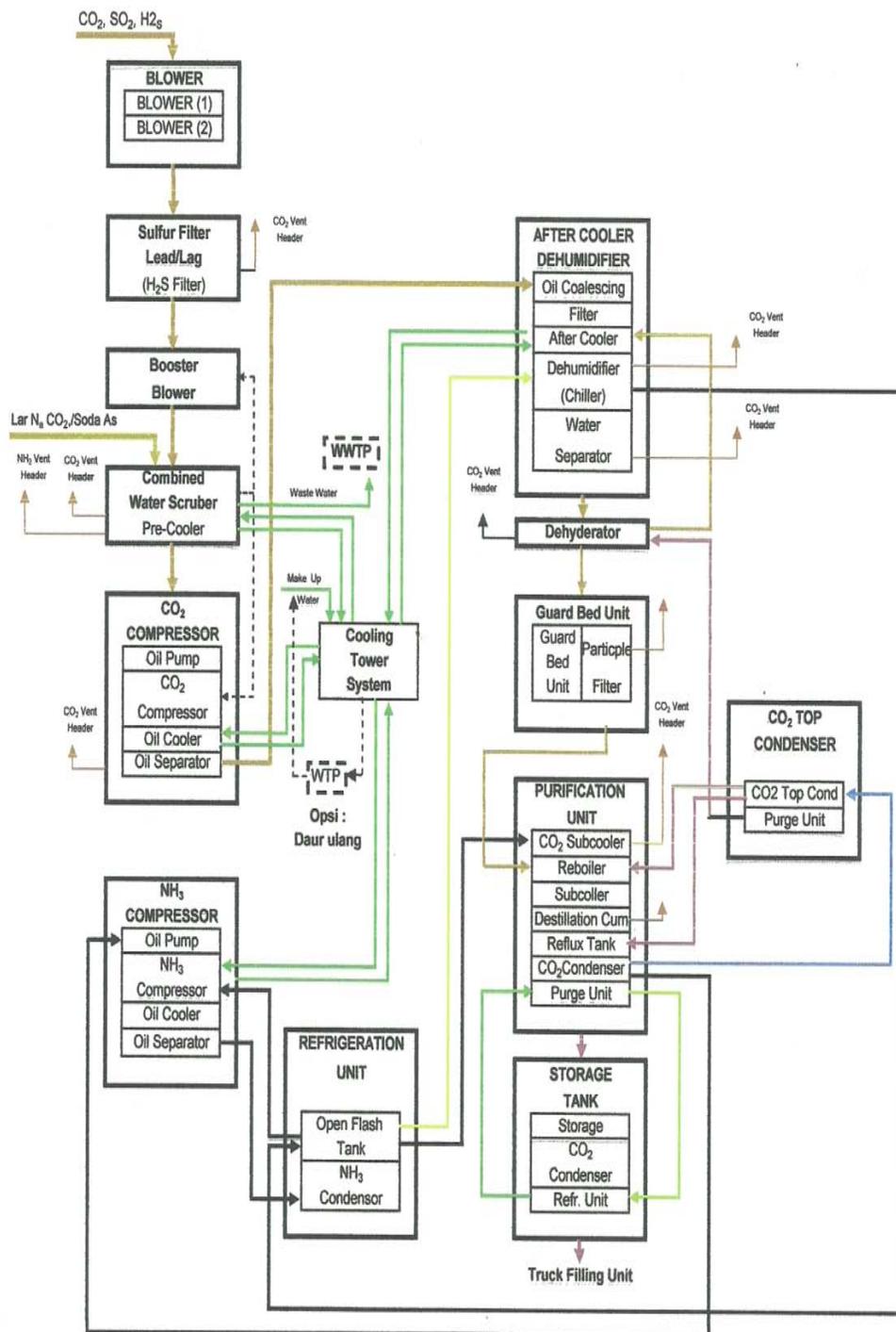
Sifat Fisik	Nilai
Titik leleh	-56.57°C , 216.58 K (pada 5.1 atm, 5.18 kPa)
Suhu sublimasi	-78.92°C , 194.23K
Suhu kritis	31.04°C , 304.2K
Tekanan kritis	72.9 atm, 7.383 MPa
Densitas gas	$1,977\text{ gL}^{-1}$
Densitas padat	1.56 kgL^{-1}
Kelarutan dalam air	0.385 g/100 mL (0°C), 0.058 g/100 mL (60°C)

Sumber : Encyclopedia of Chemistry, 1997

Produk karbon dioksida cair banyak dimanfaatkan pada berbagai industri antara lain sebagai bahan pendingin terutama dalam industri makanan, dimana ia digunakan saat pengangkutan dan penyimpanan es krim dan makanan beku lainnya. Karbon dioksida juga digunakan untuk membuat minuman ringan berkarbonasi dan air soda, untuk memadamkan api, dan dipakai untuk pengelasan dalam manufaktur (Hu Chang-qing, 2006). Manfaat CO_2 juga dapat dijumpai pada proses pembuatan roti yang berfungsi sebagai pengembang roti dengan bantuan ragi. Karbondioksida juga diperlukan tumbuhan untuk melakukan fotosintesis yang kemudian diubah menjadi zat amilum dan O_2 .

Menurut PT. RMIKK (2010), proses pembuatan karbon dioksida cair memakai teknologi *CO₂ Purification* adalah melalui proses penyerapan, pengeringan dan pengembunan (Gambar 2.13). Karakteristik emisi CO_2 yang digunakan dalam pembuatan CO_2 cair kemurniannya sekitar 93%. Dengan tingkat kemurnian yang

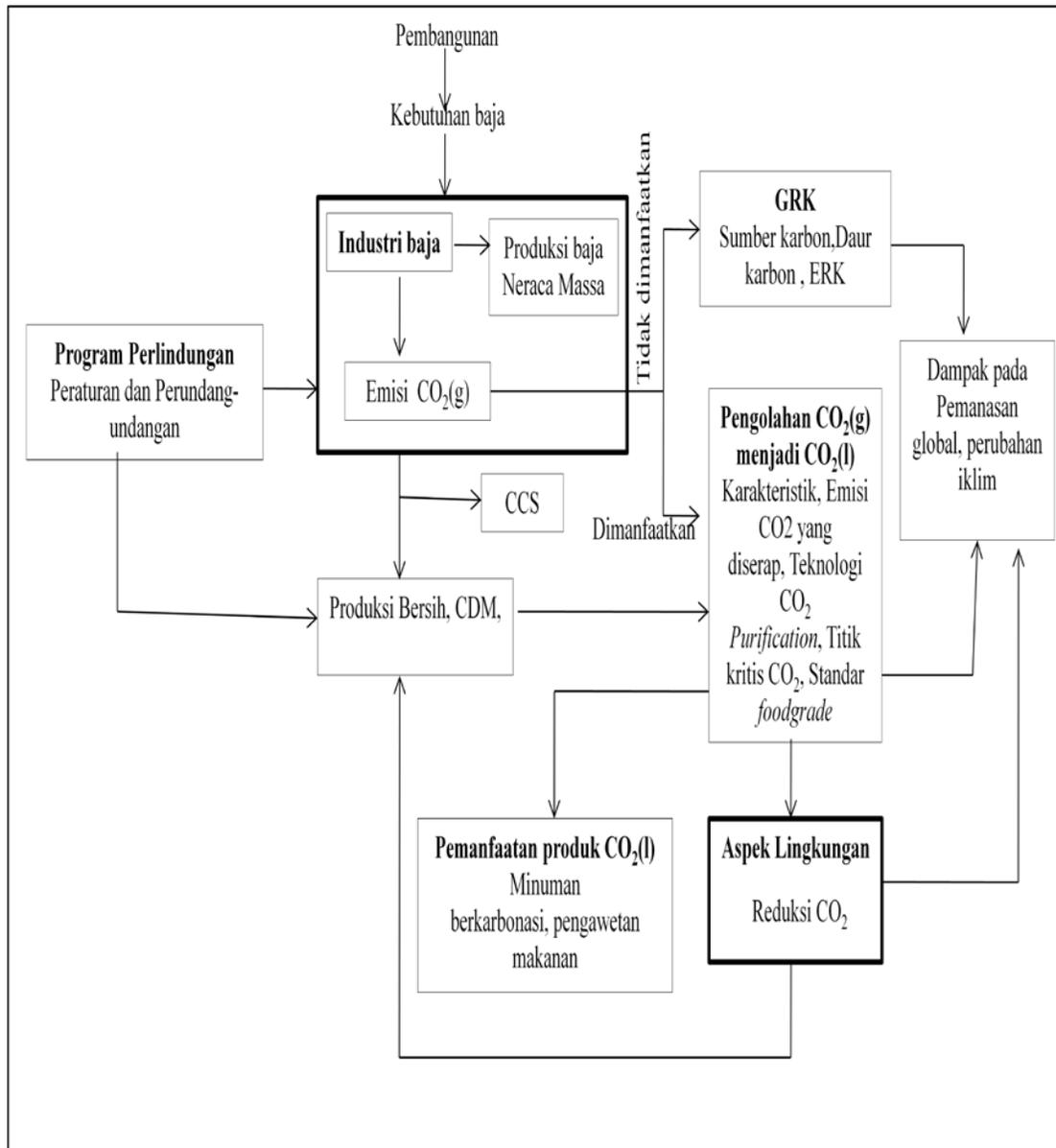
tinggi, zat pengotor yang terdapat dalam *raw gas* CO₂ ada dalam jumlah kecil sehingga layak untuk digunakan. Bahan baku industri CO₂ cair diperoleh dari *raw gas* CO₂ pabrik besi spons (proses Hyl 3) PT. Krakatau Steel. Gas *combustable* hasil reduksi bijih besi dialirkan ke proses CO₂ *absorber* sedangkan *raw gas* CO₂ dialirkan dan dilepas ke *stripping tower* kemudian dilepas ke *stack* dan *top* yang disiapkan khusus untuk dialirkan ke PT. RMIKK. *Raw gas* CO₂ dialirkan sepanjang 1,5 km melalui pipa ke pabrik pemurnian.purifikasi. *Raw gas* CO₂ masih mengandung gas pengotor seperti SO₂, H₂S dan sebagian H₂O yang terlarut masuk ke dalam Sulphur Filter Unit yang di dalamnya diisi Alumina Dioksida (Al₂O₃), PbO dan karbon aktif yang dapat mengabsorpsi SO₂, H₂S, Pb dan N. Karbon aktif harus diganti setiap 4000 jam. Gas lalu masuk ke dalam *Combined Water Scrubber* untuk melalui tahap pendinginan awal dengan menghilangkan air sebanyak mungkin. Pada kondisi yang lebih dingin, gas CO₂ dipadatkan pada tekanan 21,8 bar. Proses selanjutnya adalah pengeringan CO₂ yang hampir murni di *Dehydrator* Unit yang di dalamnya terdapat Alumina Selexsorb (Al₂O₃) yang dapat menyerap H₂O, Aldehid, NO₂. Proses terakhir adalah pemurnian dengan cara pemisahan (destilasi) yang menggunakan kondensator amoniak (NH₃) pada suhu 27⁰C. Pada suhu tersebut gas CO₂ akan mengembun sedangkan gas lain yang tidak mengembun akan dibuang. Cairan hasil kondensasi merupakan CO₂ cair yang bening, tak berwarna, dan tidak berbau. Cairan ini kemudian diuji kelayakannya untuk memenuhi standar layak makan internasional, karena digunakan pada industri makanan.



Gambar 2.13. Diagram Proses Produksi CO₂ Cair
Sumber: PT. RMIKK

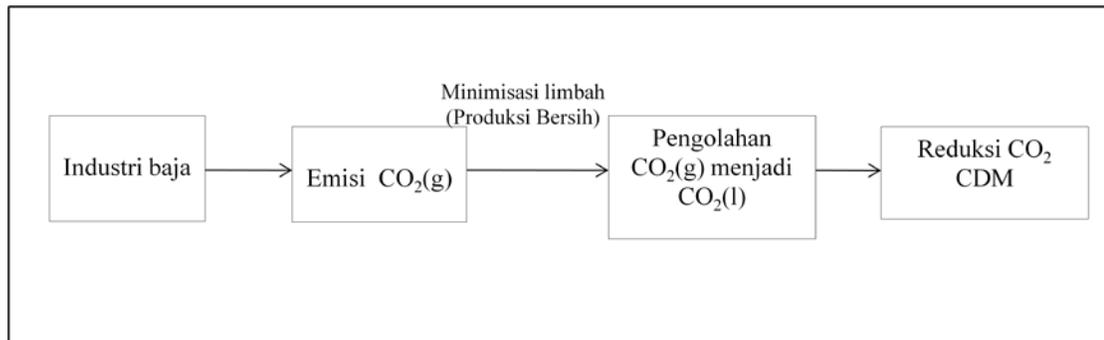
2.7. Kerangka Teori

Dari semua teori di atas, maka dapat dibuat ringkasan kerangka teori penelitian ini sebagai berikut:



Gambar 2.14. Kerangka Teori

2.8. Kerangka Konsep



Gambar 2.15. Kerangka Berpikir

2.9. Hipotesis Pengarah

Emisi CO₂ dapat dikurangi dengan pendekatan produksi bersih melalui CO₂ *Purification* sehingga dapat memberikan dampak positif terhadap lingkungan.

BAB 3

METODE PENELITIAN

3.1. Desain Penelitian

Pendekatan yang digunakan pada penelitian ini adalah pendekatan kuantitatif dengan dilengkapi data kualitatif. Pemilihan lokasinya dilakukan secara purposif. Jenis penelitian ini tergolong deskriptif. Sifat penelitian ini adalah penelitian non-eksperimental atau penelitian deskriptif-analitik dengan menggunakan metode *ex post facto*. Penelitian deskriptif merupakan penelitian untuk mengumpulkan informasi mengenai status gejala yang ada pada saat penelitian dilakukan. Penelitian deskriptif tidak bertujuan untuk menguji hipotesis, tetapi hanya menggambarkan apa adanya tentang variabel-variabel, gejala atau keadaan. Metode penelitian secara umum dijelaskan pada Tabel 3.1. berikut:

Tabel 3.1. Pendekatan dan Metode Penelitian Secara Umum

No	Tujuan Penelitian	Metode Pengumpulan Data	Metode Analisis Data
1	Mengidentifikasi dan menganalisis variabel-variabel yang menjadi pertimbangan sehingga emisi CO ₂ sebagai <i>by product</i> dimanfaatkan.	Wawancara terstruktur, analisis dokumen	Tabulasi, kalkulasi, analisis deskriptif
2	Menganalisis faktor yang mengakibatkan jumlah emisi CO ₂ yang diserap untuk produk CO ₂ cair dengan teknologi CO ₂ <i>Purification</i> masih sedikit.	Wawancara terstruktur, observasi	Analisis deskriptif
3	Menganalisis implikasi pemanfaatan emisi CO ₂ pada lingkungan.	Analisis dokumen	Kajian literatur, kalkulasi, analisis deskriptif

Menurut Arikunto (2010) variabel yang satu tidak dihubungkan dengan variabel yang lain, tetapi ingin mengetahui keadaan masing-masing variabel secara lepas. Menurut Creswell (*dalam* Sulistyarningsih, 2004), pengumpulan data kualitatif dengan

dilengkapi data kuantitatif sejumlah sampel dari populasi dalam suatu penelitian, akan saling melengkapi dan memperluas ruang lingkup, serta akan memperdalam kajian. Dalam metode *ex post facto*, peneliti menelaah variabel secara retrospektif atau melihat apa yang sudah terjadi. Peneliti tidak mempunyai kendali atau kontrol langsung terhadap variabel terikat karena terjadinya variabel terikat itu sudah berlangsung atau karena variabel itu sudah terjadi sebelumnya tanpa perlu adanya perlakuan dari peneliti.

3.2. Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian dilakukan di PT. Krakatau Steel dan PT. Resources Jaya Teknik Management Indonesia Krakatau Karbonindo (PT. RMIKK) Cilegon Jawa Barat.

3.3. Waktu Penelitian

Penelitian dilakukan selama periode Januari 2011 sampai dengan Juli 2011 meliputi penelaahan literatur, pengumpulan data primer dan sekunder.

3.4. Populasi dan Sampel Penelitian

Penarikan/pemilihan informan dalam penelitian ini dilakukan dengan metode *purposive sampling*. Informan adalah perwakilan tiap-tiap populasi yang terkait dengan program pemanfaatan emisi CO₂ di PT. KS dan PT. RMIKK yaitu Manajemen PT. KS dan PT. RMIKK. Pemilihan informan dilakukan dengan kriteria yang berbeda antara satu dengan lainnya. Kriteria masing-masing kelompok informan dapat dilihat pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2. Pemilihan Informan

Informan	Kriteria	Jumlah
Manajemen PT. KS	<ol style="list-style-type: none"> 1. Memahami penerapan pemanfaatan emisi CO₂ 2. Mengisi posisi strategis sekurang-kurangnya kepala departemen di struktur organisasi perusahaan. 3. Memiliki pengetahuan mendalam mengenai proses produksi, teknologi dan masalah lingkungan. 4. Berpendidikan minimal D3 5. Berkarir di perusahaan minimal 5 tahun 	5
Manajemen PT. RMIKK	<ol style="list-style-type: none"> 1. Memahami penerapan pemanfaatan emisi CO₂ 2. Mengisi posisi strategis sekurang-kurangnya kepala departemen di struktur organisasi perusahaan. 3. Memiliki pengetahuan mendalam mengenai proses produksi, teknologi dan masalah lingkungan. 4. Berpendidikan minimal D3 5. Berkarir di perusahaan minimal 2 tahun 	3

3.5. Instrumen Penelitian

Instrumen penelitian yang digunakan pada penelitian ini adalah lembar wawancara yang digunakan sebagai pegangan peneliti untuk memperoleh data yang relevan dengan penelitian yang dilakukan sehingga dapat dianalisis secara mendalam. Lembar wawancara dibuat 2 (dua) versi yang berbeda untuk kelompok informan yang berbeda. Lembar pertama wawancara untuk Direksi sebagai pengambil keputusan dan lembar kedua untuk Manajer dan Staff Operasional.

3.6. Teknik Pengumpulan Data

Peneliti mengumpulkan data primer melalui wawancara dan observasi. Wawancara dilakukan kepada informan yang memenuhi kriteria dengan menggunakan panduan wawancara (Lampiran 11,12). Tujuan pokok pembuatan daftar pertanyaan adalah untuk memperoleh informasi yang relevan dengan penelitian yang dilakukan sehingga dapat dianalisis secara mendalam. Penentuan informan yang dilakukan secara sengaja,

tidak ada jumlah minimal sepanjang informan yang dipilih memiliki pengetahuan dan kemampuan di bidang yang diteliti (Felisha, 2009). Data primer yang diperoleh melalui observasi adalah jumlah dan kapasitas *storage tank*, yang dapat mempengaruhi penyerapan emisi CO₂.

Metode pengumpulan data sekunder adalah dengan melakukan analisis dokumen. Dokumen yang dimaksud antara lain dokumen perusahaan, laporan survey, laporan penelitian, dan buku.

3.7. Pengolahan Data

Pengolahan data hasil wawancara dianalisis untuk dijadikan hasil penelitian. Hasil dari pengolahan data akan menghasilkan data kuantitatif dan kualitatif. Ada beberapa tahapan dalam pengolahan data, yaitu :

- a. Editing. Semua data yang diperoleh baik data primer maupun data sekunder diolah dengan melakukan reduksi data atau memilih data yang benar-benar dibutuhkan dan mendukung kegiatan penelitian serta memisah-misahkan data yang sekiranya tidak mendukung penelitian sehingga mudah dalam menganalisis.
- b. Tabulasi. Tahapan pengelompokan data dan memasukkan data dalam bentuk tabel analisis sehingga terbaca maksud data tersebut dalam analisis.

3.8. Analisis Data

Analisis data dilakukan dengan menggunakan, kajian literatur, kalkulasi, dan analisis deskriptif. Analisis deskriptif digunakan agar dapat menggambarkan mengenai variabel-variabel yang menjadi pertimbangan untuk pemanfaatan emisi CO₂. Analisis deskriptif dilakukan setelah terlebih dahulu mengelompokkan data dalam bentuk tabel, dan dilakukan perhitungan. Sedangkan kajian literatur dilakukan untuk mencari jawaban yang berkaitan dengan implikasi pemanfaatan emisi CO₂ terhadap lingkungan.

3.9. Variabel Penelitian

Masing-masing pertanyaan penelitian memiliki variabel yang perlu dioperasionalkan guna memudahkan peneliti untuk melakukan pengumpulan data di lapangan. Secara ringkas operasionalisasi dari variabel yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 3.3.

Tabel 3.3. Variabel Penelitian dan Definisi Operasional

No.	Tujuan Penelitian	Variabel Penelitian	Unit	Definisi Operasional
1.	Mengidentifikasi dan menganalisis variabel-variabel yang menjadi pertimbangan sehingga emisi CO ₂ sebagai <i>by product</i> dimanfaatkan.	Kadar CO ₂ <i>Raw gas</i> CO ₂ CO ₂ yang diserap Keberlanjutan <i>raw gas</i> CO ₂ Penjualan <i>raw gas</i> CO ₂ Permintaan pasar untuk CO ₂ cair	% ton/hari ton/hari ton/hari Rp/kg Rp/ton	Tingkat kemurnian CO ₂ yang akan diolah menjadi CO ₂ cair sebelum masuk ke unit purifikasi. Jumlah emisi CO ₂ yang dihasilkan dari sisa proses reduksi per hari Jumlah CO ₂ eq yang diserap dari gas buang untuk diolah menjadi CO ₂ cair Ketersediaan jumlah limbah CO ₂ secara kontinu setiap hari untuk pembuatan CO ₂ cair. Hasil penjualan emisi CO ₂ yang diserap untuk produksi CO ₂ cair Kebutuhan produk CO ₂ cair
2.	Menganalisis faktor yang mengakibatkan jumlah emisi CO ₂ yang diserap untuk produk CO ₂ cair dengan teknologi CO ₂ <i>Purification</i> masih sedikit.	Kapasitas produksi Kapasitas <i>storage tank</i>	ton ton	Kemampuan memproduksi CO ₂ cair Daya tampung tanki untuk menyimpan CO ₂ cair
3.	Menganalisis implikasi pemanfaatan emisi CO ₂ pada aspek lingkungan.	Penurunan emisi CO ₂ CDM	% \$/ton/tahun	Besarnya CO ₂ yang diserap untuk produk CO ₂ cair dibandingkan dengan emisi CO ₂ yang dihasilkan dari sisa proses reduksi bijih besi Jumlah reduksi emisi CO ₂ dikalikan dengan besaran kompensasi CDM sebesar \$5-\$10/ton CO ₂

BAB IV

HASIL PENELITIAN & PEMBAHASAN

4.1. Gambaran Umum Perusahaan

4.1.1. PT. Krakatau Steel

PT. Krakatau Steel terletak sekitar 110 km dari Jakarta, tepatnya di Jl. Industri No.5 Cilegon, Banten dengan menempati areal seluas 350 Ha. Perbatasan dengan lingkungan sekitar adalah sebagai berikut :

Sebelah Utara : Laut Jawa

Sebelah Selatan : Pemukiman penduduk terletak di kecamatan Ciwandan

Sebelah Timur : Gunung Propelat

Sebelah Barat : Pelabuhan Gading (sekitar 6 km) dan Terminal Indocement

PT Krakatau Steel (Persero) Tbk didirikan pada tanggal 31 Agustus 1970, bertepatan dengan dikeluarkannya Peraturan Pemerintah RI No. 35 tahun 1970 tentang Penyertaan Modal Negara Republik Indonesia untuk Pendirian Perusahaan Perseroan (Persero) PT Krakatau Steel. Pembangunan industri baja ini dimulai dengan memanfaatkan sisa peralatan Proyek Baja Trikora, yakni untuk Pabrik Kawat Baja, Pabrik Baja Tulangan dan Pabrik Baja Profil. Pabrik-pabrik ini diresmikan penggunaannya oleh Presiden Republik Indonesia pada tahun 1977.

Pada tahun 1979 dilangsungkan peresmian penggunaan fasilitas-fasilitas produksi seperti Pabrik Besi Spons dengan kapasitas 1,5 juta ton/tahun, Pabrik Billet Baja dengan kapasitas 500.000 ton/tahun, Pabrik Batang Kawat dengan kapasitas 220.000 ton/tahun serta fasilitas infrastruktur berupa Pusat Pembangkit Listrik Tenaga Uap 400 MW, Pusat Penjernihan Air, Pelabuhan Cigading serta sistem telekomunikasi.

Pada tahun 1983 diresmikan beroperasinya Pabrik Slab Baja dan Pabrik Baja Lembaran Panas. Pada tahun 1991 Pabrik Baja Lembaran Dingin yang merupakan

pabrik baja perusahaan patungan yang berada di kawasan industri Cilegon bergabung menjadi unit produksi PT Krakatau Steel (Persero) Tbk, melengkapi pabrik-pabrik baja lain yang telah ada.

PT. Krakatau Steel terbagi atas 3 plant sebagai berikut :

1. Pabrik pengolahan besi dan baja

Proses produksi baja di PT Krakatau Steel (Persero) Tbk dimulai dari Pabrik Besi Spons. Pabrik ini mengolah bijih besi pellet menjadi besi dengan menggunakan air dan gas alam.

2. Pabrik peleburan besi dan baja

Besi yang dihasilkan kemudian diproses lebih lanjut pada Electric Arc Furnace (EAF) di Pabrik Slab Baja dan Pabrik Billet Baja. Di dalam EAF besi dicampur dengan scrap, hot bricket iron dan material tambahan lainnya untuk menghasilkan dua jenis baja yang disebut baja slab dan baja billet.

3. Pabrik pengerolan besi dan baja

Baja slab selanjutnya menjalani proses pemanasan ulang dan pengerolan di Pabrik Baja Lembaran Panas menjadi produk akhir yang dikenal dengan nama baja lembaran panas. Produk ini banyak digunakan untuk aplikasi konstruksi kapal, pipa, bangunan, konstruksi umum, dan lain-lain. Baja lembaran panas dapat diolah lebih lanjut melalui proses pengerolan ulang dan proses kimiawi di Pabrik Baja Lembaran Dingin menjadi produk akhir yang disebut baja lembaran dingin. Produk ini umumnya digunakan untuk aplikasi bagian dalam dan luar kendaraan bermotor, kaleng, peralatan rumah tangga, dan sebagainya.

Sementara itu, baja billet mengalami proses pengerolan di Pabrik Batang Kawat untuk menghasilkan batang kawat baja yang banyak digunakan untuk aplikasi senar piano, mur dan baut, kawat baja, pegas, dan lain-lain.

Perusahaan ini merupakan produsen baja terintegrasi terbesar di Asia Tenggara. Dalam hal spesifikasi produk, PT. Krakatau Steel menguasai sekitar 85% dari total

produk yang diserap oleh pasar domestik. Perusahaan ini mengimpor bijih besi dari negara-negara di Amerika Selatan dan Timur Tengah. Krakatau Steel menjual sebagian besar produknya di Indonesia khususnya Jakarta dan Surabaya, sementara sebagian kecil dijual ke Australia, Jepang, Malaysia, Singapura, Inggris dan Vietnam.

PT. Krakatau Steel mempunyai 10 anak perusahaan yang saling mendukung, 3 diantaranya sebagai berikut :

1. PT. Krakatau Daya Listrik

PT Krakatau Daya Listrik (KDL) didirikan tanggal 28 Februari 1996 adalah anak perusahaan PT Krakatau Steel (Persero) Tbk yang membangkitkan listrik terutama untuk memenuhi kebutuhan PT. KS dan industri di lingkungan Krakatau Industrial Estate Cilegon-Banten. Fasilitas utama yang saat ini dimiliki PT KDL adalah pembangkit listrik tenaga uap dengan kapasitas terpasang sebesar 400 MW. Untuk menjaga keandalan suplai listrik, PT KDL juga diinterkoneksi dengan jaringan listrik tegangan tinggi dari PLN melalui tegangan 150 kV.

Fasilitas pendukung berupa peralatan-peralatan sistem pembangkit maupun jaringan listrik yang tergolong lengkap dan kompleks juga dimiliki PT KDL guna menunjang operasi dan perawatan fasilitas utama.

2. PT Krakatau Tirta Industri

PT Krakatau Tirta Industri yang didirikan pada tanggal 28 Februari 1996 adalah anak perusahaan yang sahamnya 100% dimiliki PT Krakatau Steel (Persero) Tbk. Perusahaan ini sebelumnya merupakan unit penunjang kegiatan operasional PT. Krakatau Steel (Persero) Tbk dalam bidang penyediaan air bersih yang mulai beroperasi sejak tahun 1979.

Sebagian besar dari air bersih yang dihasilkan digunakan untuk kebutuhan industri dan sebagian lagi untuk kebutuhan Kota Cilegon. Air baku yang diambil dari sungai Cidanau berasal dari danau alam Rawa Dano dan diolah menjadi air

bersih melalui water treatment plant, yang terdiri dari beberapa pentahapan proses antara lain fokolasi, sedimentasi, filtrasi yang diikuti dengan disinfeksi.

3. PT Krakatau Bandar Samudera

Pelabuhan Cigading - dikelola oleh PT Krakatau Bandar Samudera merupakan entitas bisnis yang berkonsentrasi kepada penanganan curah (bulk) baik berupa bahan baku bijih besi, curah kering (gypsum, gula, soyabean meal, dan lain-lain) serta barang-barang seperti batu bara dan besi tua.

Menjalankan operasinya di daerah Cigading, suatu Kawasan Industri di Cilegon yang dapat dengan mudah diakses, baik melalui rute kereta api, jalan tol maupun jalan biasa ke wilayah Jawa Barat dan Jakarta.

Pelabuhan Cigading memiliki kedalaman pelabuhan yang tidak dimiliki oleh perusahaan lain di Indonesia, berbagai jenis kapal bisa dengan mudah bersandar, dengan kapasitas angkut sampai 150.000 ton.

Fasilitas yang dimiliki berupa dermaga untuk ekspor dan sandar yang mampu melayani 10 kapal dalam waktu bersamaan dan tidak hanya untuk keperluan PT Krakatau Steel (Persero) Tbk, namun juga pengguna jasa pelabuhan lain.

Sebagai bentuk tanggung jawab perusahaan pada lingkungan, PT. KS telah mendapatkan beberapa sertifikasi diantaranya :

1. Sertifikasi mutu produk yaitu International Standard Organization (ISO) 9001 tahun 2004/2006 yang dikeluarkan oleh Sucofindo.
2. Sertifikasi manajemen mutu lingkungan yaitu ISO 14000 tahun 2004/2006 yang dikeluarkan oleh Sucofindo.
3. Sertifikat PROPER tahun 2009 dengan tingkat Proper Biru dikeluarkan oleh Kementerian Lingkungan Hidup (KLH).

4.1.2. PT. Resources Jaya Management Indonesia Krakatau Karbonindo

PT. RMIKK adalah pabrik purifikasi CO₂ pertama di Indonesia yang memanfaatkan emisi CO₂ sisa dari proses reduksi PT. KS. Mulai beroperasi pada bulan Februari 2009. Terletak di Jl. Australia sebelah timur PT. KS dengan jarak 1.600 km, menempati area seluas 2 ha di di kawasan industri PT. KS.

4.2. Pelaksanaan Penelitian

Sesuai dengan jadwal penelitian, peneliti melakukan peninjauan terlebih dahulu ke lokasi penelitian di plant HYL III PT. Krakatau Steel dan pabrik purifikasi PT. RMIKK Cilegon, Banten pada bulan Januari 2011 untuk melakukan prasurvey pabrik. Selanjutnya peneliti melakukan pengumpulan data sekunder dan wawancara terbuka selama periode Februari hingga Juli 2011. Wawancara menggunakan lembar panduan wawancara yang sudah disiapkan oleh peneliti sesuai dengan informasi yang ingin digali. Lamanya pengumpulan data disebabkan kesibukan informan di dalam kantor maupun tugas ke luar daerah/negeri sehingga diperlukan waktu yang luang untuk bertemu.

4.3. Hasil Wawancara

Tabel 4.1. Jawaban Wawancara Manager dan Supervisor

No.	Jawaban	Frekwensi	Persen
1.	a. Bahan bakar yang digunakan adalah gas alam dan kontribusinya terhadap emisi CO ₂ tidak terlalu besar dibandingkan kontribusi dari proses reduksi	4	4/4 x 100%= 100%
	b. Raw material Iron Ore Pellet akan bereaksi dengan CO menghasilkan CO ₂	4	4/4 x 100%= 100%
	c. CO ₂ yang dihasilkan 2300-3300 NCM/hari	4	4/4 x 100%= 100%
2.	Alasan pemanfaatan emisi CO ₂ adalah <i>zero waste</i> dan meningkatkan nilai <i>guna by product</i> CO ₂	4	4/4 x 100%= 100%

Tabel 4.1. Lanjutan

3.	Alasan kadar CO ₂ yang dimanfaatkan kadarnya harus minimal 70% adalah karena nilai komersial yang baik (d disesuaikan dengan <i>equipment design</i>), karena jika kurang dari 70% biaya pemurnian semakin tinggi.	6	6/6 x 100%= 100%
4.	a. Keunggulan teknologi dari Denmark dilihat dari kekuatan mesin dan <i>life timenya</i> .	2	2/2 x 100% = 100%
	b. Selama <i>raw</i> CO ₂ sesuai dengan yang disyaratkan tidak ada kendala.	2	2/2 x 100% = 100%
	c. Investasi untuk proyek ini sebesar 10 juta USD	2	2/2 x 100% = 100%
	d. Secara teknologi ada, tetapi yang jadi masalah adalah mutu <i>engine</i> lokal.	2	2/2 x 100% = 100%
5.	CO ₂ cair digunakan pada pembuatan minuman berkarbonasi, pengawetan makanan, industri pengelasan	2	2/2 x 100% = 100%
6.	a. Harga beli limbah CO ₂ dari PT. KS sebesar Rp. 135.000,-/ton	4	4/6 x 100% = 66,67%
	b. Harga jual CO ₂ cair kepada distributor Rp. 1.500 s/d Rp. 2.000,-/kg	2	2/2 x 100% = 100%
	c. Produk dipasarkan ke pertanian, perikanan, makanan dan minuman, kesehatan, pertambangan, pengolahan kertas	2	2/2 x 100% = 100%
	d. Kebutuhan CO ₂ cair di pasaran per hari sebesar 300 ton	2	2/2 x 100% = 100%
	e. PT. RMIKK baru memenuhi kebutuhan sebesar 20%/hari	2	2/2 x 100% = 100%
7.	Penyediaan emisi CO ₂ secara kontinu per hari akan mengalami kendala bila pabrik mengadakan program pemeliharaan rutin, atau alat rusak	6	6/6 x 100%= 100%

Tabel 4.2. Jawaban Wawancara Direktur dan General Manager

No.	Jawaban	Frekwensi	Persen
1.	a. Kebijakan yang melandasi pemanfaatan emisi CO ₂ adalah program <i>zero waste</i> b. Pemanfaatan emisi CO ₂ baru dilakukan karena sebelumnya penggunaan CO ₂ cair masih sedikit.	1	1/1 x 100% = 100%
2.	CDM adalah mekanisme di bawah Kyoto Protokol untuk pengurangan CO ₂ di udara	2	2/2 x 100% = 100%
3.	Setiap reduksi CO ₂ dapat dikaitkan dengan CDM, tetapi di PT. KS belum didaftarkan ke dalam CDM terkait pemanfaatannya yang dapat menyebabkan CO ₂ cair berubah menjadi CO ₂ gas ke udara. Saran untuk dapat dimasukkan ke dalam CDM adalah utilisasi CO ₂ cair pada pertumbuhan spirulina	1	1/1 x 100% = 100%
4.	Pengurangan emisi CO ₂ belum optimal dengan melihat masih besarnya emisi CO ₂ yang dilepas ke udara	2	2/2 x 100% = 100%
5.	Dilihat dari aspek lingkungan dapat mereduksi emisi CO ₂ sehingga menurunkan suhu udara setempat, dari aspek sosial memberikan penambahan lapangan kerja dan dari aspek ekonomi memberikan keuntungan perusahaan	1	1/1 x 100% = 100%

4.4. Variabel-Variabel yang Menjadi Pertimbangan Pemanfaatan Emisi CO₂

4.4.1. Karakteristik Emisi CO₂

Hasil penelitian karakteristik gas CO₂ yang dihasilkan PT. KS sebelum masuk proses purifikasi diperoleh data seperti pada Tabel 4.3. Keterangan dari 100% informan (Tabel 4.1.) menyatakan bahwa karakteristik CO₂ yang akan masuk ke dalam unit purifikasi disyaratkan minimum kadarnya 70%. Kadar CO₂ yang berasal dari PT. KS

rata-rata diatas 93% (Tabel 4.1 jawaban nomor 3), sisanya 7 % adalah kandungan H₂O dan gas pengotor seperti Sulfur. Dari data yang diperoleh, gas ikutan seperti sulfur kadarnya masih di bawah ambang batas Baku Mutu Emisi yaitu sebesar 3 mg/m³, sehingga aman dibuang ke lingkungan. Informan menyatakan bahwa penentuan karakteristik ini berdasarkan *equipment design* teknologi CO₂ Purification.

Tabel 4.3. Pengukuran Kadar CO₂ sebelum masuk Unit Purifikasi

Bulan	Kadar CO ₂ (%) Tahun 2009	Kadar CO ₂ (%) Tahun 2010	Kadar CO ₂ (%) Tahun 2011
Januari	93,64	93,50	92,22
Februari	93,76	92,83	92,33
Maret	94,38	92,22	93,10
April	93,50	93,40	92,52
Mei	94,10	94,45	93,51
Juni	93,70	95,10	94,52
Juli	95,23	94,91	94,20
Agustus	94,52	93,80	
September	94,20	94,10	
Oktober	92,87	92,74	
November	92,91	92,33	
Desember	93,47	93,25	
Kadar CO₂ rata-rata/bulan	93,86	93,55	93,20

Sumber : Dokumen PT. RMIKK

Dari data tersebut dapat dianalisis bahwa karakteristik gas CO₂ yang dihasilkan PT. KS memenuhi syarat untuk pemanfaatan. Semakin besar zat pengotor (impuritis) semakin besar pula tahapan *treatment* yang diperlukan untuk menghilangkan zat pengotor tersebut, sehingga biaya yang dikeluarkan lebih besar. Dengan tingkat kemurnian yang tinggi, maka biaya produksi pembuatan CO₂ cair dapat ditekan sehingga harga jual ke pasaran kompetitif dibandingkan dengan CO₂ cair yang sudah beredar selama ini. Di sisi lain dengan tingkat kemurnian yang rendah, gas CO₂ juga dapat digunakan sebagai bahan pembuatan CO₂ cair, akan tetapi karena tingkat impuritisnya tinggi maka diperlukan tahapan *treatment* yang lebih panjang dan

berakibat pada meningkatnya biaya operasional sehingga harga jual produk CO₂ cair menjadi lebih mahal.

4.4.2. Emisi CO₂ yang Dihasilkan PT. KS

Hasil penelitian jumlah emisi CO₂ yang dihasilkan PT. KS berbanding lurus dengan banyaknya produksi besi spons yang dihasilkan. Semakin besar produksi besi spons maka akan semakin besar emisi CO₂ yang dihasilkan (Tabel 4.4.). Keterangan dari 100% informan menyatakan bahwa emisi terbesar dihasilkan dari sisa proses reduksi bijih besi menjadi besi spons, sedangkan bahan bakar yang digunakan yaitu gas alam menghasilkan emisi lebih kecil (Tabel 4.1. jawaban nomor 1).

PT. Krakatau Steel pada proses produksinya menggunakan bahan bakar gas alam. Gas alam dipasok dari Pertamina, Cilamaya Jawa Barat dan PNG. Kontribusi bahan bakar gas alam tidak terlalu besar pengaruhnya dibandingkan dengan proses reduksi di HYL III dalam menghasilkan emisi karbon. Gas alam menghasilkan CO₂ paling sedikit dibandingkan bahan bakar minyak dan batubara. Hal ini disebabkan minyak dan batubara tersusun dari molekul yang jauh lebih kompleks, rasio karbonnya lebih tinggi dan mengandung nitrogen dan belerang yang lebih tinggi. Jika minyak dan batubara dibakar maka akan melepaskan karbon dioksida (CO₂), karbon monoksida (CO), nitrogen oksida (NO_x) dan sulfur dioksida (SO_x) dalam rasio yang lebih tinggi dibandingkan dengan gas alam.

Tabel 4.4. Produksi Besi Spons dan Emisi CO₂ yang Dihasilkan Tahun 2009, 2010, dan 2011

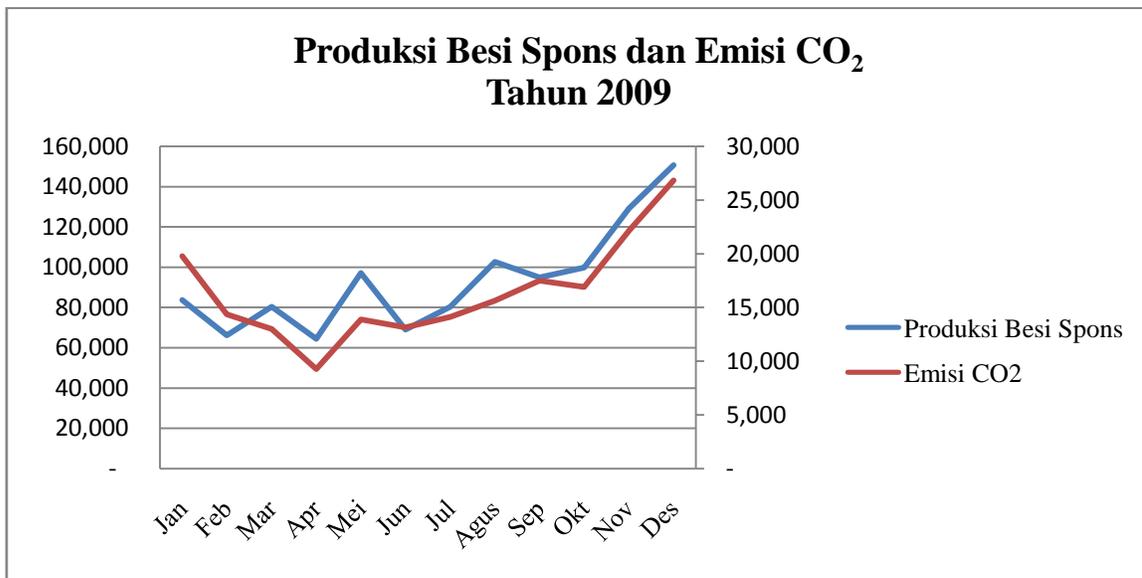
Bulan	Produksi Besi Spons Tahun 2009 (ton)	Emisi CO ₂ yang Dihasilkan (ton)	Produksi Besi Spons Tahun 2010 (ton)	Emisi CO ₂ yang Dihasilkan (ton)	Produksi Besi Spons Tahun 2011 (ton)	Emisi CO ₂ yang Dihasilkan (ton)
Januari	83.705	19.772	103.195	18.455	72.,760	9.119
Februari	66.204	14.362	113.926	19.931	99.899	12.986
Maret	80.516	12.991	122.215	22.244	109.348	18.223
April	64.522	9.275	132.648	20.870	80,939	10.350
Mei	97.222	13.879	129.479	18.834	113.177	19.930
Juni	69.042	13.164	80.323	12.666	114.611	20.053
Juli	80.508	14.115	120.235	16.381	106.713	16.914
Agustus	102.803	15.627	90.584	10.672		
September	94.916	17.492	47.403	5.669		
Oktober	99.898	16.907	128.854	15.302		
November	129.281	22.152	127.535	11.917		
Desember	150.719	26.815	77.508	1.047		
Total	1.119.336	196.551	1.273.906	173.988	697.387	107.575
Jumlah rata-rata/bulan	93.278	16.379	106.159	14.499	99.627	15.368
Jumlah rata-rata/hari	3.731	655	4.246	580	3.985	615
Jumlah emisi CO₂ rata-rata/jam		27		24		25,6

Sumber: Dokumen PT. KS

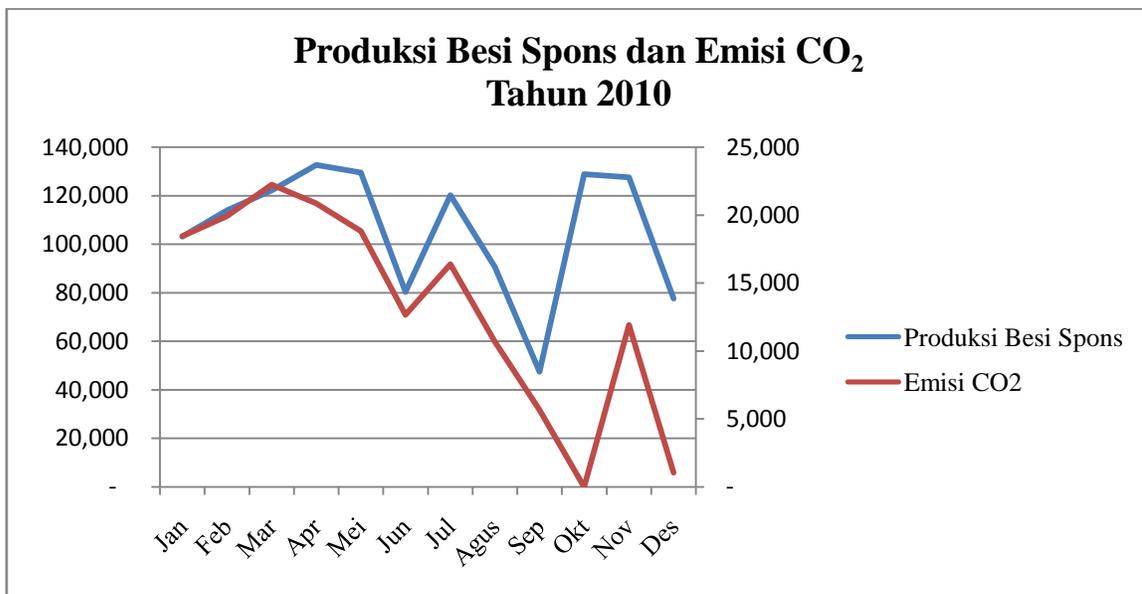
Hasil pengolahan data pada Tabel 4.4. menunjukkan bahwa pada tahun 2009 untuk memproduksi besi spons rata-rata 3.731 ton/hari, dihasilkan emisi sisa hasil proses sebesar 655 ton/hari atau 27 ton/jam, dan pada tahun 2010 untuk memproduksi besi spons rata-rata 4.246 ton/hari, dihasilkan emisi sisa hasil proses sebesar 580 ton/hari atau 24 ton/jam pada tahun 2011 untuk memproduksi besi spons rata-rata 3.985 ton/hari, dihasilkan emisi sisa hasil proses sebesar 615 ton/hari atau 25,6 ton/jam. Data menunjukkan jika emisi CO₂ yang dihasilkan dari proses produksi baja berjumlah cukup besar tidak dikelola dengan baik, maka akan menjadi ancaman bagi lingkungan yaitu dengan meningkatnya suhu bumi akibat gas rumah kaca bertambah. Ketidakharmonisan antara lingkungan buatan dan lingkungan alam akan mengakibatkan ketidakharmonisan pada lingkungan sosial, dimana dengan meningkatnya suhu bumi akan mengakibatkan perubahan iklim yang akan berdampak kepada masyarakat. Oleh karena itu, minimisasi limbah dengan *recycle by product* CO₂ menjadi produk yang bermanfaat seperti CO₂ cair merupakan suatu upaya menjaga keharmonisan interaksi antara kesetimbangan CO₂ sebagai lingkungan alam, industri baja dan teknologinya sebagai lingkungan buatan dan dampak terhadap masyarakat sebagai lingkungan sosial.

Pada Gambar 4.1., 4.2., dan 4.3. menunjukkan tren bahwa semakin besar produksi besi spons yang dihasilkan semakin besar pula CO₂ yang dihasilkan. Hal ini disebabkan pada proses reduksi bijih besi dengan gas reduktor CO dan H₂ menghasilkan *pig iron* dan gas CO₂. Gas CO₂ yang diijinkan masuk ke dalam proses hanya sebesar 2-4%, sisanya dibuang ke udara. CO₂ hasil dari sisa proses reduksi tidak dapat dihindari maupun diminimalkan, semakin besar produk besi spons yang dihasilkan semakin besar pula gas CO₂. Dengan melihat besarnya emisi CO₂ yang dihasilkan dari setiap proses produksi serta tingkat kemurnian CO₂ yang tinggi maka pemanfaatan emisi CO₂ dari sisa proses reduksi untuk diubah menjadi bentuk lain yang bermanfaat (*by product*) dapat dilakukan. Di sisi lain, kebijakan yang mendasari pemanfaatan emisi CO₂ ini dari hasil wawancara diperoleh keterangan bahwa 100% informan menyatakan bahwa yang mendasari kebijakan tersebut adalah *zero waste* atau minimalisasi limbah dalam rangka menuju *green company* (Tabel 4.1, jawaban nomor 2 dan Tabel 4.2, jawaban nomor 1).

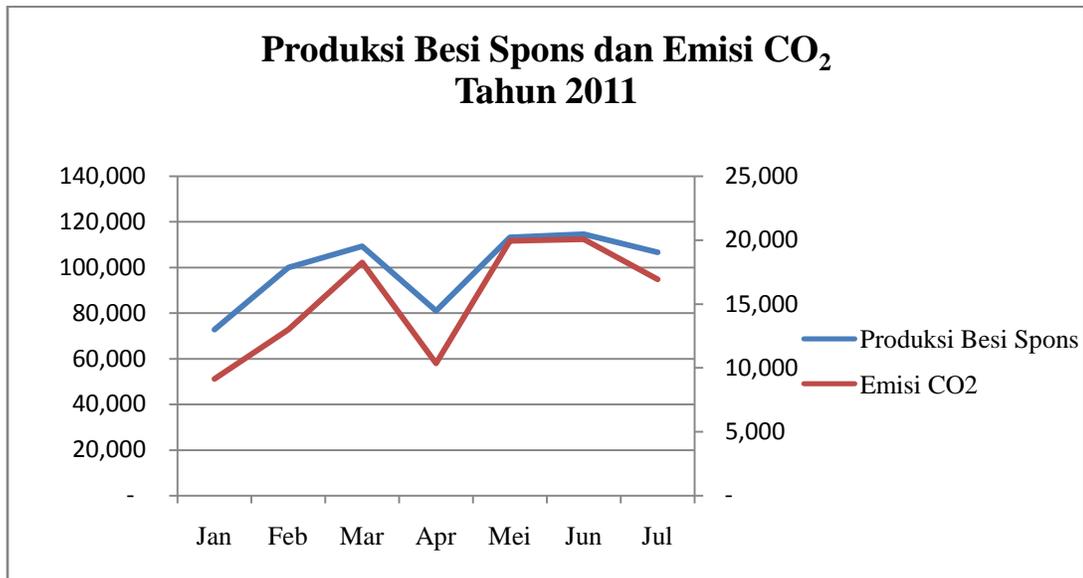
Minimalisasi limbah melalui upaya pemanfaatan emisi CO₂ menjadi produk CO₂ cair adalah dengan menggunakan pendekatan produksi bersih dengan cara *recycle*. Upaya pengurangan emisi CO₂ diharapkan dapat dimasukkan dalam Mekanisme Pembangunan Bersih (CDM).



Gambar 4.1. Grafik Emisi CO₂ pada Gas Buang dan Produksi Tahun 2009



Gambar 4.2. Grafik Emisi CO₂ pada Gas Buang dan Produksi Tahun 2010



Gambar 4.3. Grafik Emisi CO₂ pada Gas Buang dan Produksi Tahun 2011

Untuk mengetahui suatu kesetimbangan massa dari komponen yang terlibat dan limbah/output yang dihasilkan dari proses produksi, peneliti membuat neraca massa berdasarkan data komputer yang ada di control room PT. KS seperti pada Gambar 4.4. Adapun untuk mengontrol kesetimbangan massa, PT. KS menggunakan perhitungan Yield dengan persamaan berikut:

$$\text{Yield} = \text{Net Produk} / \text{Total Pellet (IOP)} \times 100\% \dots\dots\dots (17)$$

Neraca Massa menggambarkan *input* gas dan *output* gas yang terlibat dalam proses reduksi bijih besi serta *input* material (pellet) dan *output* material (besi spons). Gas reduksi *input* dihasilkan dari reaksi antara gas alam dan steam pada suhu diatas 830⁰C sehingga terbentuk gas dengan perbandingan sebagai berikut : N₂:CO:CH₄:CO₂:H₂ = 5,65% : 13,56% : 5,05% : 2,92% : 72,82%. Gas ini masuk ke dalam reaktor, dan gas-gas yang akan bereaksi pada proses reduksi adalah gas CO dan H₂, sedangkan gas CH₄ akan mengalami *cracking* pada suhu di atas 850⁰C sehingga C yang terlepas dapat digunakan untuk reaksi karburasi dimana C ditambahkan pada Fe. Karena gas CO dan H₂ bereaksi dengan pellet maka pada gas reduksi *output* jumlah CO dan H₂ berkurang, sedangkan gas alam yang mengandung CH₄ diinjeksikan ke dalam bagian bawah reaktor untuk proses

pendinginan sekaligus menambah kadar C dalam Fe membentuk Fe_3C yang dikenal dengan reaksi karburasi. Pada reaksi reduksi dihasilkan gas CO_2 , sehingga pada gas reduksi output jumlah CO_2 bertambah. Sedangkan gas N_2 karena merupakan gas inert, maka jumlahnya tetap, akan tetapi karena komposisi keseluruhan gas berubah maka persentase N_2 juga berubah. Reaksi yang terjadi pada pembuatan besi spons sama seperti persamaan reaksi nomor (4) sampai dengan (9) ditambah dengan reaksi karburasi sebagai berikut:

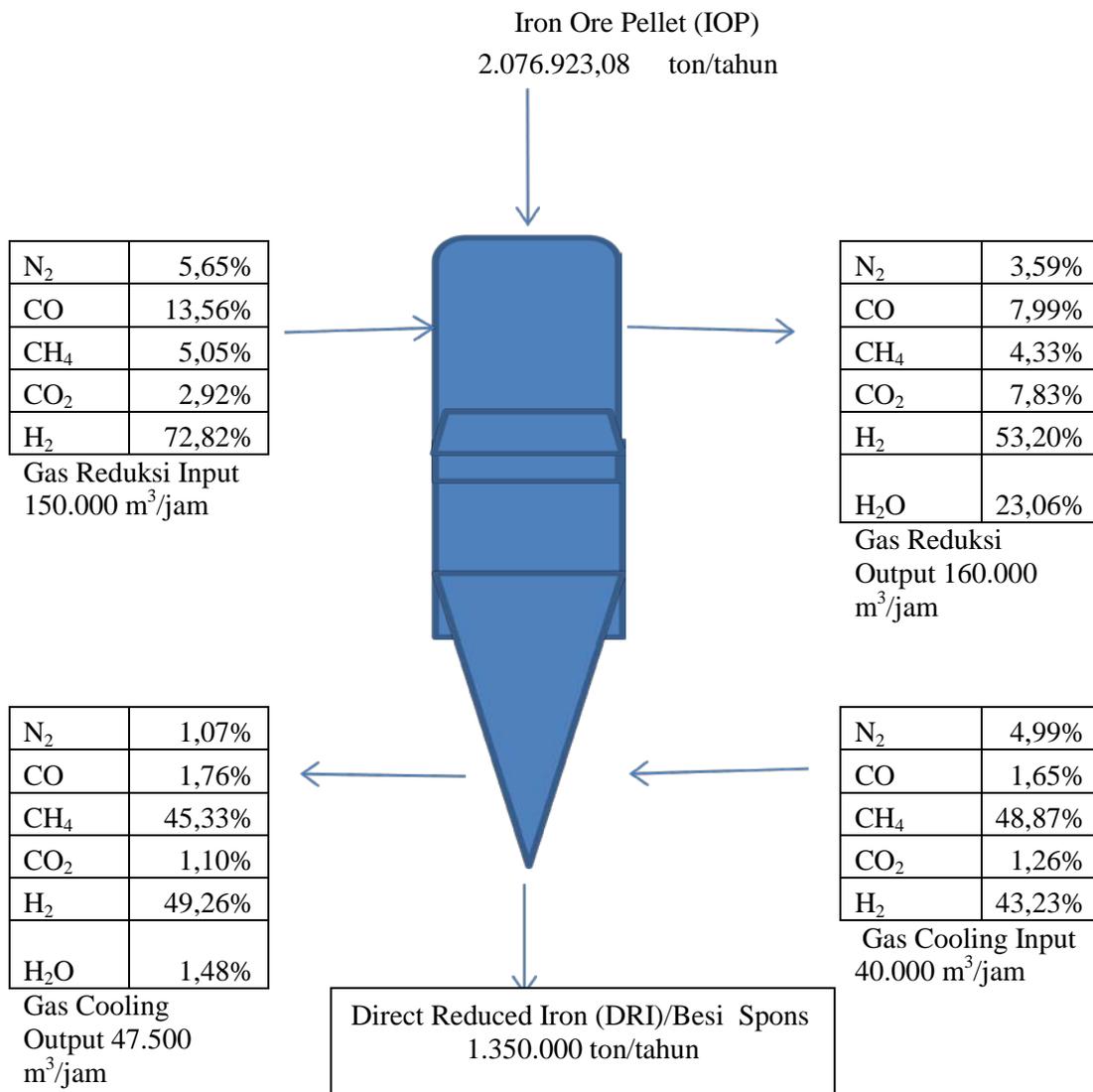
Reaksi dengan CH_4



Dari Neraca Massa terlihat bahwa pada proses reduksi bijih besi akan selalu menghasilkan gas CO_2 . Untuk menghasilkan 1.350.000 ton/tahun besi spons akan diemisikan CO_2 sisa proses reduksi sebesar 25 ton/jam atau 600 ton/hari. Apabila tidak dilakukan upaya reduksi CO_2 , akan mengakibatkan terakumulasinya CO_2 yang dihasilkan PT. KS dengan CO_2 dari sumber lain di atmosfer.

Meningkatnya gas CO_2 di atmosfer sebagai salah satu GRK, menyebabkan terjadinya akumulasi panas di atmosfer bumi. Dengan adanya akumulasi yang berlebihan tersebut iklim global melakukan penyesuaian dengan cara peningkatan suhu bumi yang mengakibatkan efek pemanasan secara global. Pemanasan secara global akan diikuti dengan perubahan iklim seperti meningkatnya curah hujan di beberapa belahan dunia sehingga menimbulkan banjir dan erosi, sedangkan di belahan bumi lain akan mengalami musim kering yang berkepanjangan disebabkan kenaikan suhu. Dampak yang ditimbulkan akibat perubahan iklim secara global antara lain; musnahnya berbagai jenis keanekaragaman hayati; meningkatnya frekuensi dan intensitas hujan badai, angin topan, dan banjir; mencairnya es dan glasier di kutub; meningkatnya jumlah tanah kering yang potensial menjadi gurun karena kekeringan yang berkepanjangan; kenaikan permukaan air laut menyebabkan banjir yang luas; kenaikan permukaan laut hingga menyebabkan terjadinya *coral bleaching* dan kerusakan terumbu karang di seluruh dunia;

meningkatnya frekuensi kebakaran hutan; menyebarnya berbagai macam penyakit tropis seperti malaria ke daerah-daerah baru karena bertambahnya populasi serangga (nyamuk).



Gambar 4.4. Perhitungan Neraca Massa CO₂ PT. Krakatau Steel Tahun 2010
Sumber: Hasil Perhitungan

4.4.3. Emisi CO₂ yang Diserap

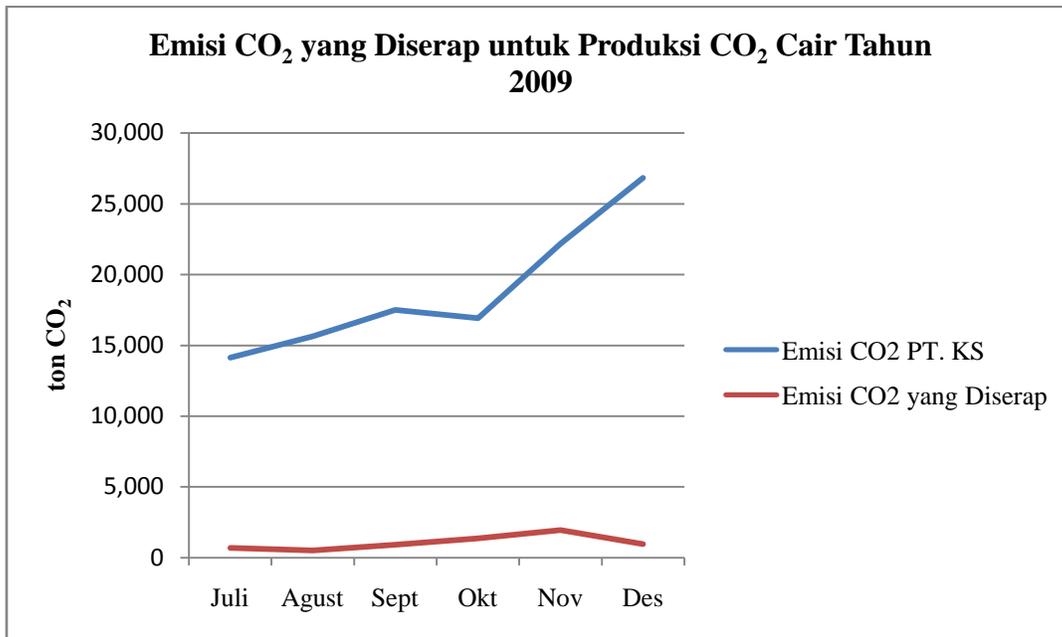
Pada Tabel 4.5. menunjukkan bahwa penyerapan emisi CO₂ dimulai pada bulan Juli 2009, karena proyek ini baru dimulai pada bulan tersebut. Pada tahun 2009 emisi CO₂ yang diserap rata-rata per bulan sebesar 5,7%, tahun 2010 sebesar 10,4% dan tahun 2011 sebesar 10,4% (Gambar 4.5, 4.6, 4.7). Pada tahun 2009 emisi yang diserap kurang dari 10%, karena pada tahun tersebut masih dalam tahap *commissioning* 3 bulan. Dari hasil tersebut terlihat bahwa besarnya emisi CO₂ yang diserap selalu konstan sebesar rata-rata 10% per hari dari emisi CO₂ yang dihasilkan PT. KS.

Emisi CO₂ yang diserap, selanjutnya masuk ke dalam unit *purification* dan diuji tingkat kemurniannya. CO₂ cair ini harus berstandar *foodgrade* seperti yang tercantum pada Lampiran 6., karena digunakan dalam industri makanan dan minuman. Uji analisis kadar CO₂ cair dilakukan setiap 6 bulan sekali oleh Petrokimia Gresik. Hasil uji yang dilakukan pada tahun 2011 menunjukkan bahwa tingkat kemurnian CO₂ sebesar 99,97%; kandungan sulfur 0,1 ppm; SO₂ 0; total hidrokarbon 0,34 ppm; H₂O 1 ppm; benzena tidak terdeteksi, CH₄ tidak terdeteksi. Hasil analisis harian yang dilakukan *on line* secara komputerisasi di PT. RMIKK menunjukkan bahwa tingkat kemurnian CO₂ cair sebesar 99,97%; sulfur 0,97 ppm; hidrokarbon 0,759 ppm; H₂O 0,581 ppm; aromatik tidak terdeteksi, sehingga dari hasil uji tersebut, produk ini layak untuk dipakai.

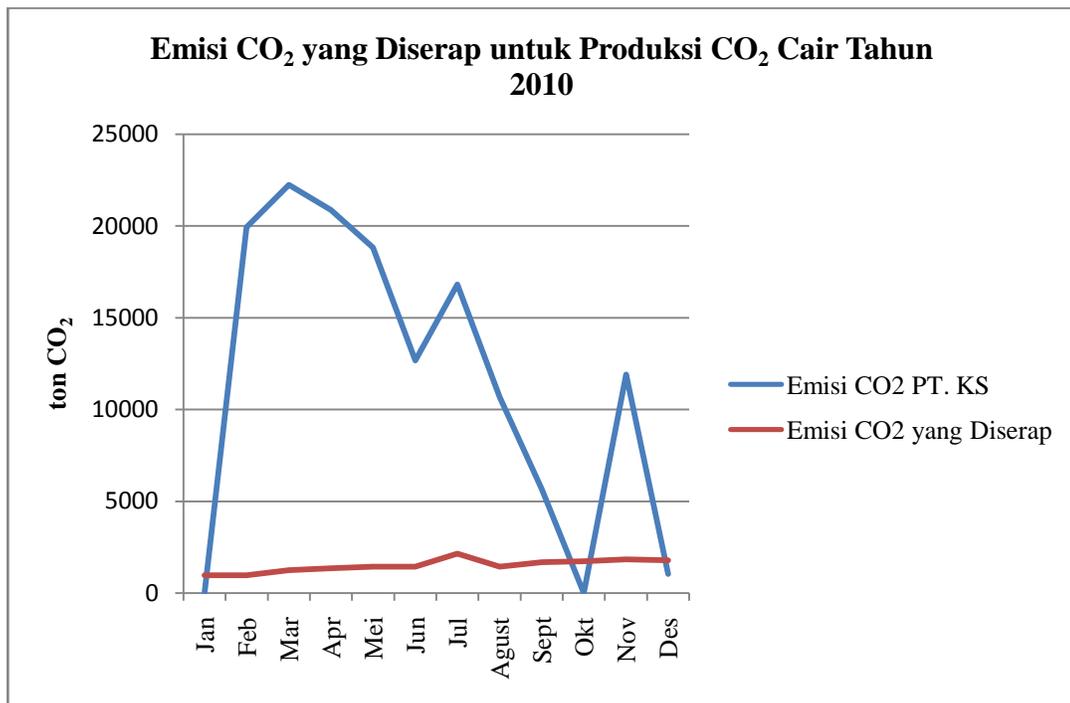
Menurut penelitian yang dilakukan Patricia (2011) dalam pemisahan gas CH₄ dari CO₂ dengan menggunakan teknologi kriogenik yaitu suatu metode pemurnian yang melibatkan campuran gas dengan sistem kondensasi dan destilasi pada temperatur rendah, diperoleh hasil gas metana dengan kemurnian mencapai 97%. Analog dengan teknologi CO₂ Purification yang menggunakan sistem serupa yaitu kondensasi dan destilasi pada temperatur rendah, diperoleh hasil CO₂ dengan tingkat kemurnian 99,97%.

Tabel 4.5. Emisi CO₂ yang dihasilkan pada Gas Buang dan Emisi CO₂ yang Diserap untuk Produksi CO₂ cair

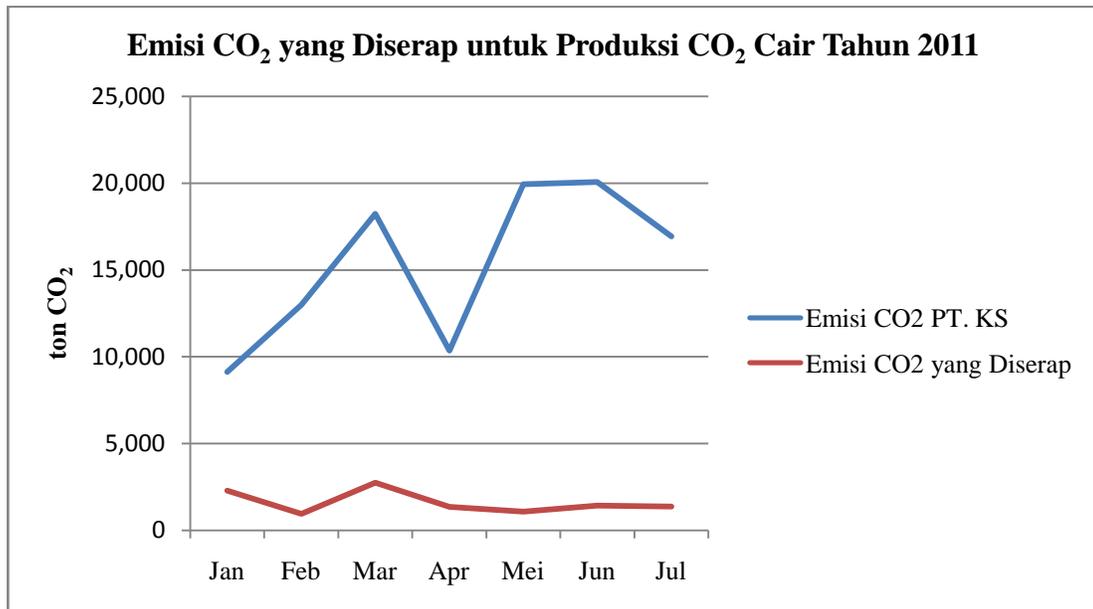
Bulan	Emisi CO ₂ pada Gas Buang (ton) Tahun 2009	Emisi CO ₂ yang Diserap (ton) Tahun 2009	Emisi CO ₂ pada Gas Buang (ton) Tahun 2010	Emisi CO ₂ yang Diserap (ton) Tahun 2010	Emisi CO ₂ pada Gas Buang (ton) Tahun 2011	Emisi CO ₂ yang Diserap (ton) Tahun 2011
Januari	19.772		18.455	969	9.119	2.294
Februari	14.362		19.931	974	12.986	949
Maret	12.991		22.244	1.252	18.223	2.51
April	9.275		20.870	1.350	10.350	1.352
Mei	13.879		18.834	1.430	19.930	1.071
Juni	13.164		12.666	1.430	20.053	1.420
Juli	14.115	700	16.81	2.147	16.914	1.370
Agustus	15.627	514	10.672	1.432	-	-
September	17.492	910	5.669	1.683	-	-
Oktober	16.907	1.363	-	1.739	-	-
November	22.152	1.936	11.917	1.838	-	-
Desember	26.815	969	-	1.777	-	-
Total	113.108^{*)}	6.392^{*)}	138.856^{**)}	14.505^{**)}	107.575	11.207
Rata-rata/bulan	18.851	1.065	13.886	1.451	15.368	1.601
Persentase emisi rata-rata yang diserap/bln		5,7%		10,4%		10,4%



Gambar 4.5. Emisi CO₂ yang Diserap untuk Produksi CO₂ Cair Tahun 2009



Gambar 4.6. Emisi CO₂ yang Diserap untuk Produksi CO₂ Cair Tahun 2010



Gambar 4.7. Emisi CO₂ yang Diserap untuk Produksi CO₂ Cair Tahun 2011

4.4.4. Keberlanjutan Raw Gas CO₂ oleh PT. KS

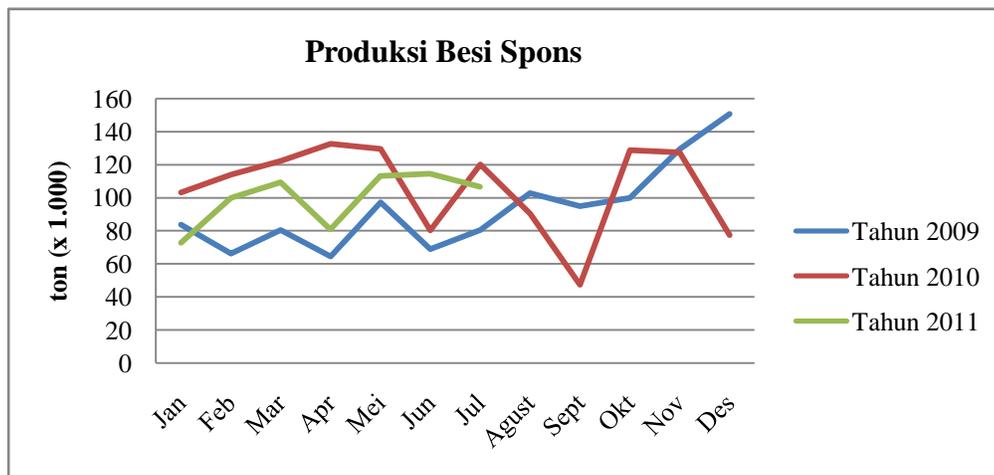
Keberlanjutan raw gas CO₂ adalah tersedianya raw gas CO₂ atau emisi yang dihasilkan PT. KS secara kontinu setiap hari untuk produksi CO₂ cair. Dari data yang diperoleh menunjukkan hasil produksi besi spons dari tahun 2009 sampai 2011 berfluktuasi seperti disajikan pada Tabel 4.6 dan Gambar 4.8. Rata-rata produksi/bulan tahun 2009 sebesar 93.278 ton, tahun 2010 sebesar 106.159 ton, tahun 2011 sebesar 99.627 ton. Produksi yang berfluktuasi sebagian besar disebabkan masalah internal seperti adanya program rutin tahunan untuk pemeliharaan yang biasa dilakukan selama 1 bulan, kerusakan alat dari kedua belah pihak sehingga proses terhenti, atau adanya penurunan *supply* gas alam disebabkan keterbatasan sumber gas alam yang ada, sedangkan masalah eksternal yang dihadapi adalah kondisi kebutuhan baja di pasaran yang berfluktuasi. Keterangan dari 100% informan diperoleh data bahwa ketidakkontinuan penyediaan raw gas CO₂ disebabkan masalah internal PT. KS (Tabel 4.1, jawaban nomor 7). Keberlanjutan raw gas ini perlu diperhatikan karena menyangkut kekontinuan produksi CO₂ cair yang sampai kepada distributor. Jika produksi CO₂ cair tidak kontinu, otomatis distributor akan mencari produsen lain, hal ini berdampak pada

terhentinya upaya pemanfaatan emisi CO₂ yang diolah menjadi CO₂ cair yang akhirnya berdampak pada upaya perlindungan lingkungan melalui minimalisasi limbah.

Tabel 4.6. Produksi Besi Spons Tahun 2009-2011

Bulan	Jumlah (ton) Tahun 2009	Jumlah (ton) Tahun 2010	Jumlah (ton) Tahun 2011
Januari	83.705	103.195	72.760
Februari	66.204	113.926	99.899
Maret	80.516	122.215	109.348
April	64.22	132.648	80.939
Mei	97.222	129.479	113.177
Juni	69.042	80.323	114.611
Juli	80.508	120.235	106.713
Agustus	102.803	90.584	-
September	94.916	47.403	-
Oktober	99.898	128.854	
November	129.281	127.535	
Desember	150.719	77.508	
Total Produksi	1.119.336	1.273.906	697.387
Produksi rata-rata/bulan	93.278	106.159	99.627
Produksi rata-rata/hari	3.731	4.246	3.985

Sumber: Dokumen PT. KS



Gambar 4.8. Grafik Produksi Besi Spons Tahun 2009-2011

4.4.5. Penjualan *Raw Gas CO₂*

Salah satu variabel yang menjadi pertimbangan pemanfaatan emisi CO₂ adalah nilai jual dari *raw gas* tersebut. Hal ini menjadi daya tarik bagi industri lain yang ingin melakukan kegiatan yang sama. Melalui pemanfaatan ini akan diperoleh dua keuntungan sekaligus yaitu perusahaan mendapatkan tambahan pendapatan dari penjualan *raw gas CO₂* dan memberikan perlindungan lingkungan dengan metode penerapan Produksi Bersih melalui minimisasi limbah yang pada akhirnya dapat meningkatkan citra positif dari masyarakat terhadap perusahaan. Dari penjualan *raw gas* dengan menggunakan data emisi tahun 2010, yaitu sebesar 18.021 ton/tahun dan harga emisi Rp. 135,-/kg (hasil wawancara Tabel 4.1, jawaban nomor 6a), diperoleh pendapatan tambahan sebesar Rp. 2.432.835.000,-/tahun (dua miliar empat ratus tiga puluh dua juta delapan ratus tiga puluh lima ribu rupiah). Pendapatan tersebut dapat digunakan kembali untuk kegiatan pengelolaan lingkungan seperti alih teknologi ramah lingkungan, dan pembinaan kepada masyarakat sekitar. Hal ini akan menjadi pertimbangan bagi industri yang akan melakukan kegiatan serupa.

4.4.6. Permintaan Pasar untuk CO₂ Cair

Adanya kebutuhan CO₂ cair untuk berbagai industri yang cukup besar menjadi pertimbangan untuk melakukan pemanfaatan emisi CO₂. Pemanfaatan CO₂ cair terbesar digunakan pada industri pembuatan minuman berkarbonasi, pengawetan makanan, dan industri pengelasan. Keterangan dari 100% informan diperoleh data bahwa kebutuhan CO₂ cair di pasaran sekitar 300 ton/hari. Dengan harga yang kompetitif produk CO₂ cair yang dihasilkan dapat dengan mudah terserap pasar. Dalam satu hari PT. RMIKK menghasilkan CO₂ cair sekitar 60 ton/hari. Saat ini kebutuhan yang baru dapat dipenuhi adalah sekitar 20% atau 60 ton/hari, sehingga produksi satu hari langsung habis terjual (Tabel 4.7.). Konsumen tetap saat ini adalah PT Molindo (40%), PT. Samator (35%) sebagai distributor yang menyalurkan kepada PT. Coca Cola perusahaan minuman berkarbonasi, perusahaan makanan untuk pengawetan, dan sisanya 25% adalah PT. Iwatani yang merupakan perusahaan

pengelasan.

Dengan adanya kebutuhan CO₂ cair yang cukup besar serta permintaan pasar yang meningkat pada perusahaan, memberi peluang untuk menambah jumlah produksi CO₂ cair, sehingga dengan adanya penambahan kapasitas produksi maka semakin banyak emisi CO₂ yang diolah untuk produk CO₂ cair sehingga akan menambah nilai manfaat ekonomi. Adanya manfaat ekonomi akan berdampak positif pada lingkungan dimana gas CO₂ yang lepas ke udara semakin besar dikelola sehingga CO₂ yang lepas ke udara berkurang, hal ini akan berdampak positif pada lingkungan sosial yaitu memperkecil dampak perubahan iklim yang merugikan masyarakat dan juga memberikan peluang kerja. Hal ini diperkuat dengan hasil wawancara dari keseluruhan informan menyatakan hal serupa (Tabel 4.2, jawaban nomor 5).

Tabel 4.7. CO₂ Cair yang Dihasilkan dan Penjualan PT. RMIKK

Bulan	Produksi Tahun 2009 (ton)	Penjualan Tahun 2009 (ton)	Produksi Tahun 2010 (ton)	Penjualan Tahun 2010 (ton)	Produksi Tahun 2011 (ton)	Penjualan Tahun 2011 (ton)
Januari			921	921	2.179	2.179
Februari			925	925	902	902
Maret			1.189	1.189	2,613	2.613
April			2.472	2.472	1.284	1.284
Mei			1.359	1.359	1.017	1.017
Juni			1.359	1.359	1.349	1.349
Juli	665	665	2.040	2.040	1.302	1.302
Agustus	488	488	1.360	1.360		
September	865	865	1.599	1.599		
Oktober	1.295	1.295	1.652	1.652		
November	1.839	1.839	1.746	1.746		
Desember	921	921	1.688	1.688		

Sumber: Dokumen PT. RMIKK

4.5. Faktor yang Mempengaruhi Jumlah Penyerapan Emisi CO₂ untuk Produk CO₂ Cair

4.5.1. Kapasitas Produksi

Data yang diperoleh menunjukkan bahwa jumlah emisi CO₂ yang diserap rata-rata 3 ton/jam, sedangkan emisi CO₂ yang dihasilkan PT. KS dari sisa proses reduksi rata-rata 40 ton/jam, sehingga dalam 1 hari emisi CO₂ yang dilepas ke udara rata-rata sekitar 888 ton. Hal ini juga diperkuat dengan keterangan dari 100% informan yang menyatakan bahwa pengurangan emisi CO₂ dengan teknologi tersebut belum optimal (Tabel 4.2, jawaban nomor 4). Kapasitas produksi yang sudah didesain mempengaruhi jumlah emisi yang diserap. Teknologi yang digunakan di pabrik purifikasi hanya mempunyai kapasitas produksi 3 ton/jam, sehingga berapapun besarnya emisi CO₂ yang dihasilkan PT. KS, tidak akan merubah daya serap pabrik purifikasi tersebut. Dengan demikian variabel desain kapasitas pabrik menjadi variabel yang harus dipertimbangkan dalam upaya mendukung perlindungan lingkungan yang optimal. Pemanfaatan ini dapat saja memenuhi manfaat ekonomi perusahaan, akan tetapi jika pemanfaatan ini ditujukan untuk solusi terhadap masalah lingkungan seperti pengurangan gas CO₂ yang ditimbulkan akibat aktivitas pabrik/perusahaan, maka daya serap harus ditingkatkan agar gas CO₂ yang lepas ke udara berkurang banyak.

4.5.2. Kapasitas *Storage Tank*

Variabel lain yang harus dipertimbangkan adalah kapasitas *storage tank*. Dari hasil observasi diperoleh hasil bahwa pabrik purifikasi memiliki 2 unit *storage tank* dengan kapasitas keseluruhan 480 ton. *Storage tank* berfungsi untuk menyimpan hasil produksi CO₂ cair. Jika dalam 1 hari mampu memproduksi sekitar 60-70 ton, maka *storage tank* tersebut dapat menyimpan CO₂ cair untuk 1 minggu produksi. Kendala yang mungkin muncul adalah jika isi *storage tank* penuh karena jadwal pengambilan oleh distributor tidak tepat waktu, maka produksi CO₂ cair dihentikan sementara waktu sambil menunggu *storage tank* dapat diisi lagi. Untuk itu diperlukan tambahan *storage*

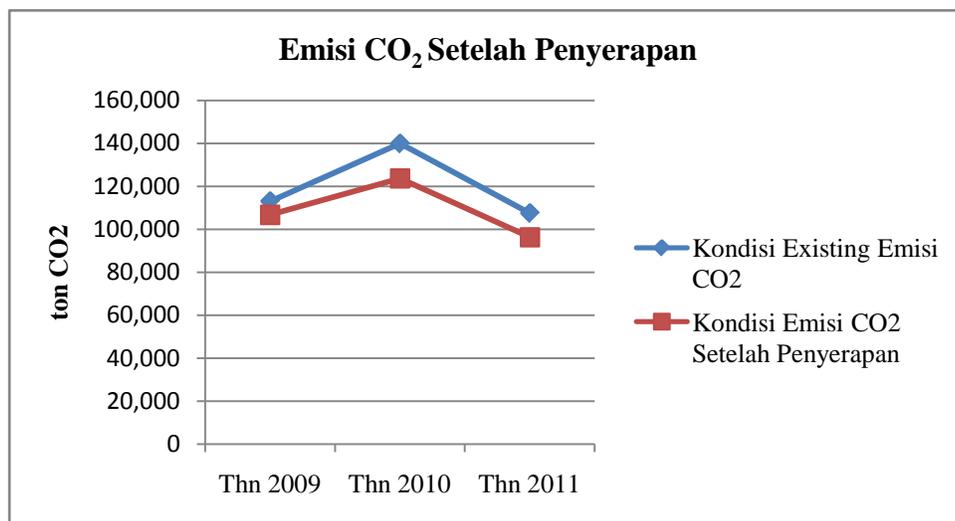
tank agar produksi CO₂ cair tetap kontinu setiap hari. Dengan demikian variabel ini juga harus dipertimbangkan dalam upaya minimisasi limbah yang berlanjut.

4.6. Implikasi Pemanfaatan Emisi CO₂ pada Lingkungan

4.6.1. Penurunan Emisi CO₂

Hasil perhitungan dari data yang diperoleh menunjukkan bahwa pemanfaatan emisi CO₂ menjadi produk CO₂ cair memberikan penurunan emisi CO₂ sebesar 10% dari sebelum pemanfaatan seperti dijelaskan pada Gambar 4.9. Dengan demikian pemanfaatan emisi CO₂ dengan teknologi CO₂ *Purification* dapat menjadi salah satu cara untuk perlindungan terhadap lingkungan. Dengan teknologi tersebut di atas, upaya minimisasi limbah CO₂ dapat dilakukan dengan cara *recycle* sehingga dihasilkan *by product* yang dapat digunakan pada industri-industri lain. Minimisasi limbah adalah salah satu cara yang digunakan dalam pendekatan Produksi Bersih yaitu suatu strategi pengelolaan lingkungan yang bersifat preventif dengan tujuan untuk mengurangi resiko terhadap manusia dan lingkungan. Upaya ini berimplikasi positif pada lingkungan, karena dengan adanya pengurangan emisi CO₂ akan memperkecil laju perubahan iklim yang saat ini mengancam ekosistem. Meningkatnya gas CO₂ di udara akan menaikkan suhu rata-rata di bumi yang mengakibatkan efek pemanasan secara global, dan hal ini akan mempengaruhi perubahan iklim yang pada akhirnya akan mempengaruhi kehidupan di bumi. Dampak dari perubahan iklim akan berpengaruh pada aspek lingkungan, sosial dan buatan. Sebagai contoh curah hujan rata-rata di beberapa tempat naik, tetapi di tempat lain menurun sehingga di tempat tertentu musim hujannya panjang dan mengalami banjir sedangkan di tempat lain mengalami kekeringan berkepanjangan mengakibatkan daerah pertanian di beberapa tempat mengalami gagal panen yang dapat meningkatkan rawan pangan. Jika hal ini berlangsung terus menerus, kemungkinan besar para petani akan beralih tempat olahan ke pegunungan yang lebih sejuk, menyebabkan terdesaknya hutan dan terancamnya kehidupan di hutan serta terancamnya mutu dan jumlah suplai air. Meningkatnya suhu bumi juga dapat mengakibatkan bertambah dan berkembangnya serangga yang menyebabkan penyakit tropis baik di utara maupun di selatan katulistiwa. Agar upaya pemanfaatan emisi CO₂

ini terus berlanjut, maka semua variabel yang terlibat sebaiknya ditingkatkan mulai dari teknologi sebagai lingkungan buatan, sehingga dengan teknologi yang baik diharapkan dapat memanfaatkan emisi CO₂ semaksimal mungkin dengan demikian emisi CO₂ ke udara dapat dikurangi. Pengurangan CO₂ ke udara diharapkan dapat menjaga kesetimbangan konsentrasi CO₂ di atmosfer dengan demikian ancaman perubahan iklim dapat diperkecil sehingga dampak perubahan iklim terhadap masyarakat seperti banjir, menyebarnya wabah penyakit, gagal panen dapat dicegah.



Gambar 4.9. Penurunan Emisi CO₂

4.6.2. Potensi CDM

Hasil perhitungan pada Tabel 4.5. menunjukkan bahwa pengurangan emisi CO₂ dengan teknologi CO₂ Purification adalah sebesar 10%. Dalam Protokol Kyoto mekanisme kerja sama antara negara berkembang dan negara maju dalam upaya pengurangan emisi CO₂ adalah melalui CDM. Negara-negara maju yang harus membatasi atau menurunkan emisinya harus mendapatkan sertifikasi penurunan emisi yang disebut *carbon credit*. Untuk CDM sertifikat *carbon credit* disebut CER. Melalui CDM negara berkembang akan mendapatkan tambahan pendanaan dan alih teknologi dari negara maju untuk mencapai pembangunan berkelanjutan, di sisi lain negara maju akan mendapatkan CER dari proyek CDM yang dilaksanakan di negara berkembang. Pembangunan berkelanjutan

yang dimaksud dalam proyek CDM adalah upaya pembangunan yang bertujuan menghasilkan emisi seminimal mungkin atas aktivitas manusia. Kompensasi reduksi CO₂ berdasarkan proyek CDM sebesar \$5-\$10/ton. Dengan upaya pengurangan emisi CO₂ melalui teknologi CO₂ *Purification* diperoleh hasil perhitungan potensi reduksi CO₂ yang dapat dimasukkan ke dalam CDM seperti disajikan pada Tabel 4.8.

Tabel 4.8. Potensi Reduksi CO₂ untuk Proyek CDM

Tahun	Reduksi CO₂ (ton)	Kompensasi (\$/ton)	Potensi CDM (\$)
2009	6.392	5 – 10	31.960 – 63.920
2010	14.505	5 – 10	72.525 – 145.050
2011	11.207	5 – 10	56.035 – 112.070

Sumber: Perhitungan

Pada Tabel 4.8. terlihat bahwa pada tahun 2009 reduksi CO₂ dihitung untuk 6 bulan mulai bulan Juli sampai dengan Desember, karena pemanfaatan emisi CO₂ baru dimulai pada bulan tersebut, sedangkan pada tahun 2011 reduksi CO₂ dihitung untuk 6 bulan mulai bulan Januari sampai dengan Juli, karena waktu penelitian yang telah habis. Jika *carbon credit* berhasil diperoleh, maka *carbon credit* tersebut dapat digunakan sebagai tambahan untuk modal alih teknologi yang ramah lingkungan. Semakin besar reduksi CO₂ semakin besar *carbon credit* yang diperoleh, hal ini akan memberi daya tarik perusahaan untuk meningkatkan upaya pengurangan CO₂ dan hal ini akan memberi implikasi baik pada upaya perlindungan lingkungan.

BAB V

KESIMPULAN dan SARAN

5.1. Kesimpulan

- a. Variabel-variabel yang menjadi pertimbangan pemanfaatan *by product* emisi CO₂ adalah: kemurnian/kadar CO₂, jumlah emisi CO₂ sisa proses reduksi, jumlah emisi CO₂ yang diserap untuk produksi CO₂ cair, keberlanjutan *raw gas* CO₂, penjualan *raw gas* CO₂, permintaan pasar untuk CO₂ cair.
- b. Faktor yang mempengaruhi jumlah penyerapan emisi CO₂ sebesar 10% adalah kapasitas produksi dan kapasitas *storage tank* yang terbatas.
- c. Pengurangan emisi CO₂ melalui pemanfaatan ini berimplikasi positif pada lingkungan karena dapat mengurangi peningkatan suhu akibat meningkatnya gas CO₂ di udara yang mempengaruhi terjadinya perubahan iklim, di sisi lain pengurangan ini berpotensi mendapat *carbon credit* melalui proyek CDM, semakin besar pengurangan emisi CO₂ yang dilakukan semakin besar *carbon credit* yang diperoleh. Hal ini dapat menjadi daya tarik perusahaan meningkatkan upaya pengurangan CO₂.

5.2. Saran

- a. Untuk industri/perusahaan, upaya ini sebaiknya menselaraskan antara kepentingan perlindungan lingkungan dan kepentingan bisnis, sehingga upaya pengurangan CO₂ dari sisa proses reduksi dapat ditingkatkan secepatnya.
- b. Untuk peneliti selanjutnya, disarankan meneliti lebih lanjut mengenai ketersediaan teknologi lokal yang mirip dengan teknologi yang saat ini digunakan dalam pemanfaatan emisi CO₂ dan
- c. Perlu diperhitungkan berapa emisi CO₂ yang dikeluarkan dari pemakaian energi untuk proses pembuatan CO₂ cair.

DAFTAR PUSTAKA

- _____.2011. Dokumen PT. Krakatau Steel
- _____.2011. Dokumen PT. Resources Jaya Management Indonesia Krakatau Karbonindo
- _____.1995. Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 13 Tahun 1995 tentang Baku Mutu Emisi Sumber Tidak Bergerak.
- _____.2004. Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 75 Tahun 2004 tentang Cleaner Production.
- _____.2004. KLH. *Indonesian DNA's Approval Mechanism*. KLH, Jakarta
- _____.1999.KLH. *Indonesia National Action Plan for Climate Change*. KLH, Jakarta.
- _____.1994.KLH. Inventarisasi Emisi GRK
- _____.2004. Undang-undang Nomor 17 Tahun 2004 tentang Protokol Kyoto atas Konvensi Kerangka Kerja Perserikatan Bangsa Bangsa tentang Perubahan Iklim.
- _____.2009. Undang-undang Nomor 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup.
- Agustina (2010). *Studi proses pemisahan gas CO₂ dari gas buang industri besi baja melalui optimalisasi rancangan kontaktor membran*. Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia Kejuangan.2010.
- Arikunto, S. (2010). *Manajemen penelitian*. Penerbit: Rineka Cipta, Jakarta
- Cekanova, Patricia, Natalia Jasminska, Tomas Brestovic. *Biogas Upgrading Processes for The Production of Natural Gas Substitute*. The Holistic Approach to Environment, 1 (2011)2, 53-62
- Clark, J. & Duncan Macquarrie (2002). *Handbook of green chemistry and technology*. Blackweel Science Ltd, USA.
- Emission mitigation of CO₂ in steel industry current status & future scenario..* Journal of Iron & Steel Research, International,2006,13(6):38-42,52.
- Fitriawan, D. (2007). Studi pengelolaan limbah padat & cair PT X-Pasuruan sebagai upaya penerapan proses produksi bersih. Tesis Institut Teknologi Surabaya.

- Forster, et.al. (2007). *Greenhouse gas Measurements*. [http://www.niwa.co.nz/our-science/climate/information-and-resources / clivar/gases](http://www.niwa.co.nz/our-science/climate/information-and-resources/clivar/gases), 15 Februari 2010, pukul 13.20 WIB.
- Freeman, H.M. (1990). *Hazardous waste minimization*. Mc. Graw Hill Publishing Co., Singapore.
- Global Environment Division Greenhouse Gas Assessment Handbook- *A Practical guidance document for the assessment of project-level greenhouse gas emissions*. World Bank. <http://www.worldbank.org>. 25 November, 2009 pukul 22.00 WIB.
- Gradel, T.E. and B.R. Allenby (1995). *Industrial ecology*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NY, USA.
- Himmelblau D.M (1996). *Basic principles and calculation in chemical Engineering*, 6th ed, Prentice Hall.
- Houghton, J. (2004). *Global warming, the Complete Briefing*. 3rd ed, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Houghton, R. A. (2005). *The contemporary carbon cycle*. Pages 473-513 in W. H. Schlesinger, editor. Biogeochemistry. Elsevier Science.
- H Sien H . K hoo, Reginald B.H. Tan (2006). *Life cycle investigation of CO₂ recovery and sequestration*. Environ. Sci. Technol. 2006, 40, 4016-4024.
- Hu Chang-Q.''' , Chen Li-yun² , Zhang Chun-xia' , Qi Yuan-hong' , Yin Rui-yu (2006). *Emission mitigation of CO₂ in steel Industry*. Journal of Iron and Steel Research, International. 2006, 13(6): 38-42, 52.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), (2005). *Special report on carbon dioxide capture and storage*. Cambridge University Press, Cambridge United Kingdom and New York, NY, USA
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Guideline (2006).
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2007.: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)). Cambridge University Press, Cambridge United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.

- Janzen, H. H. (2004). Carbon cycling in earth systems—a soil science perspective. *In Agriculture, ecosystems and environment*, 104, 399 – 417.
- Journal of Cleaner Production, Vol. 18, Issues 10-11, July 2010, Page 1052-1058. Zhijia Huang, Xiao Ding, Hao Sun. Siyue Liu.
- Julian, M., Allwood, Jonathan M.C., Andrachell, Milford (2010). *Options for achieving a 50% cut in industrial carbon emissions by 2050*. Department of Engineering, University of Cambridge, Trumpington Street, Cambridge CB2 1PZ, United Kingdom Environ. Sci. Technol. 2010, 44, 1888–1894 Environ. Sci. Technol. 2010, 44, 1888–1894.
- Lagowski, J. Macmillan Encyclopedia of chemistry, vol 1 1997.
- Laporan Survey (2010). Emisi gas rumah kaca PT. Krakatau Steel pabrik besi spon unit hyl 3. Surveyor Indonesia.
- Patricia, C., Natalia J., Tomas B. *Biogas upgrading processes for the production of natural gas substitute*. The Holistic Approach to Environment 1 (2011)2, 53-62.
- Phase change data for carbon dioxide*. National Institute of Standards and Technology. <http://www.google.com>. 05 November, 2009, pukul 15.25 WIB.
- Pramesti, F.D. (2009). Penggunaan bahan bakar alternatif di industri semen, Tesis Universitas Indonesia Jakarta.
- Reklaitis G.V. *Introduction to material and energy balances*, John Wiley 1983
- Rohde, Robert. “*Global warming Art Project*.” <http://www.globalwarmingart.com>. 30 Maret 2010, pukul 11.00 WIB.
- Shakhashiri (2008). *Carbon dioxide*. <http://scifun.chem.wisc.edu/chemweek/pdf/carbondioxide>. 03 Oktober 2010, pukul 21.15 WIB.
- Sulistyaningsih, D. (2004). Kontribusi CDM untuk mendukung pengembangan diversifikasi energi panas bumi (Studi emisi CO₂ PLTP panas bumi, Garut-Jawa Barat dengan mekanisme CDM dalam Kyoto Protocol). Tesis Universitas Indonesia Jakarta.
- Sutamihardja, RTM. (2009). *Perubahan lingkungan global*. Penerbit Yayasan Pasir Luhur, Bogor.

Trismidianto, Eddy Hermawan, Toni Samiaji, Martono, Mugni Hadi, Asri Indrawati dan Romdhon Hamdan, (2008). Studi penentuan konsentrasi CO₂ dan gas rumah kaca (GRK) lainnya di wilayah Indonesia. Lapan.

Yuanita, T. (2010). Analisis pemilihan teknologi guna mengurangi emisi CO₂ pada pabrik besi spons PT. Krakatau Steel dengan metode environmental management accounting (EMA). Skripsi Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Website:

<http://www.biochar.org/joomla/images/stories/steiner-greenhouse-effect.jpg> 15 Februari 2010, pukul 13.00 WIB.

<http://www.besibaja.kemenpen.go.id>. Penjualan baja. 24 November 2010, pukul 21.00 WIB.

Lampiran 1: Perhitungan Produksi Besi Spons

Produksi Besi Spons Tahun 2009-2011

Bulan	Jumlah (ton) Tahun 2009	Jumlah (ton) Tahun 2010	Jumlah (ton) Tahun 2011
Januari	83,705	103,195	72,760
Februari	66,204	113,926	99,899
Maret	80,516	122,215	109,348
April	64,522	132,648	80,939
Mei	97,222	129,479	113,177
Juni	69,042	80,323	114,611
Juli	80,508	120,235	106,713
Agustus	102,803	90,584	
September	94,916	47,403	
Oktober	99,898	128,854	
November	129,281	127,535	
Desember	150,719	77,508	
Total Produksi	1,119,336	1,273,906	697,387
Produksi rata-rata/bulan	93,278	106,159	99,627
Produksi rata-rata/hari	3,731	4,246	3,985

$$\begin{aligned}\text{Rata-rata produksi/bulan tahun 2009} &= \text{Total produksi}/12 \text{ bulan} \\ &= 1,119,336 \text{ ton}/12 \text{ bulan} \\ &= 93,278 \text{ ton/bulan}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Rata-rata produksi/hari tahun 2009} &= \text{Total produksi}/300 \text{ hari}^{*}) \\ &= 1,119,336 \text{ ton}/300 \text{ hari} \\ &= 3,731 \text{ ton/hari}\end{aligned}$$

Keterangan *) : Efektif operasional pabrik dalam 1 tahun adalah 300 hari

$$\begin{aligned}\text{Rata-rata produksi/bulan tahun 2010} &= \text{Total produksi}/12 \text{ bulan} \\ &= 1,273,906 \text{ ton}/12 \text{ bulan} \\ &= 106,159 \text{ ton/bulan}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Rata-rata produksi/hari tahun 2010} &= \text{Total produksi}/300 \text{ hari}^{*}) \\ &= 1,273,906 \text{ ton}/300 \text{ hari} \\ &= 4,246 \text{ ton/hari}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Rata-rata produksi/bulan tahun 2011} &= \text{Total produksi}/7 \text{ bulan} \\ &= 697,387 \text{ ton}/7 \text{ bulan} \\ &= 99,627 \text{ ton/bulan}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Rata-rata produksi/hari tahun 2011} &= \text{Total produksi}/175 \text{ hari}^{*}) \\ &= 697,387 \text{ ton}/175 \text{ hari} \\ &= 3,985 \text{ ton/hari}\end{aligned}$$

Keterangan *) : Masa produksi selama 7 bulan (175 hari)

Lampiran 2: Perhitungan Karakteristik CO₂

Pengukuran Kadar CO₂ sebelum masuk Unit Purifikasi

Bulan	Kadar CO ₂ (%) Tahun 2009	Kadar CO ₂ (%) Tahun 2010	Kadar CO ₂ (%) Tahun 2011
Januari	93.64	93.50	92.22
Februari	93.76	92.83	92.33
Maret	94.38	92.22	93.10
April	93.50	93.40	92.52
Mei	94.10	94.45	93.51
Juni	93.70	95.10	94.52
Juli	95.23	94.91	94.20
Agustus	94.52	93.80	
September	94.20	94.10	
Oktober	92.87	92.74	
November	92.91	92.33	
Desember	93.47	93.25	
Kadar CO₂ rata-rata/bulan	93.86	93.55	93.20

Rata-rata kadar CO₂/bulan tahun 2009 = Total kadar CO₂/12

$$= 1,126/12 = 93.86\%$$

Rata-rata kadar CO₂/bulan tahun 2010 = Total kadar CO₂/12

$$= 1,122.63/12 = 93.55\%$$

Rata-rata kadar CO₂/bulan tahun 2011 = Total kadar CO₂/12

$$= 652.40/7 = 93.20\%$$

**Lampiran 3: Perhitungan Emisi CO₂ dari Sisa Proses Reduksi
PT. Krakatau Steel**

Produksi Besi Spons dan Emisi CO₂ yang Dihasilkan Tahun 2009

Bulan	Produksi Besi Spons (ton)	Emisi CO ₂ yang Dihasilkan (ton/bulan)
Januari	83,705	19,772
Februari	66,204	14,362
Maret	80,516	12,991
April	64,522	9,275
Mei	97,222	13,879
Juni	69,042	13,164
Juli	80,508	14,115
Agustus	102,803	15,627
September	94,916	17,492
Oktober	99,898	16,907
November	129,281	22,152
Desember	150,719	26,815
Total		196,551
Jumlah rata-rata/bulan	93,278	$196,551/12 = 16,379$
Jumlah rata-rata/hari	3,731	$196,551/300 = 655$
Jumlah emisi CO ₂ rata-rata/jam		$655 \text{ ton} / 24 \text{ jam} = 27$

(lanjutan)

Produksi Besi Spons dan Emisi CO₂ yang Dihasilkan Tahun 2010

Bulan	Produksi Besi Spons (ton)	Emisi CO ₂ yang Dihasilkan (ton/bulan)
Januari	103,195	18,455
Februari	113,926	19,931
Maret	122,215	22,244
April	132,648	20,870
Mei	129,479	18,834
Juni	80,323	12,666
Juli	120,235	16,381
Agustus	90,584	10,672
September	47,403	5,669
Oktober	128,854	15,302
November	127,535	11,917
Desember	77,508	1,047
Total		173,988
Jumlah rata-rata/bulan	106,159	$173,988/12 = 14,499$
Jumlah rata-rata/hari	4,246	$173,988/300 = 580$
Jumlah emisi CO ₂ rata-rata/jam		$580 \text{ ton}/24 \text{ jam} = 24$

(lanjutan)

Produksi Besi Spons dan Emisi CO₂ yang Dihasilkan Tahun 2011

Bulan	Produksi Besi Spons (ton)	Emisi CO ₂ yang Dihasilkan (ton/bulan)
Januari	72,760	9,119
Februari	99,899	12,986
Maret	109,348	18,223
April	80,939	10,350
Mei	113,177	19,930
Juni	114,611	20,053
Juli	106,713	16,914
Agustus		
September		
Oktober		
November		
Desember		
Total	697,387	107,575
Jumlah rata-rata/bulan	$697,387/7 = 99,627$	$107,575/7 = 15,368$
Jumlah rata-rata/hari	3,985	$107,575/175 = 615$
Jumlah emisi CO ₂ rata-rata/jam		$615 \text{ ton}/24 \text{ jam} = 25.6$

Lampiran 4: Perhitungan Emisi CO₂ yang Diserap PT. RMIKK

Emisi CO₂ yang dihasilkan pada Gas Buang dan Emisi CO₂ yang Diserap untuk Produksi CO₂ cair

Bulan	Emisi CO ₂ pada Gas Buang (ton) Tahun 2009	Emisi CO ₂ yang Diserap (ton) Tahun 2009	Emisi CO ₂ pada Gas Buang (ton) Tahun 2010	Emisi CO ₂ yang Diserap (ton) Tahun 2010	Emisi CO ₂ pada Gas Buang (ton) Tahun 2011	Emisi CO ₂ yang Diserap (ton) Tahun 2011
Januari	19,772		18,455	969	9,119	2,294
Februari	14,362		19,931	974	12,986	949
Maret	12,991		22,244	1,252	18,223	2,751
April	9,275		20,870	1,350	10,350	1,352
Mei	13,879		18,834	1,430	19,930	1,071
Juni	13,164		12,666	1,430	20,053	1,420
Juli	14,115	700	16,81	2,147	16,914	1,370
Agustus	15,627	514	10,672	1,432	-	-
September	17,492	910	5,669	1,683	-	-
Oktober	16,907	1,363	-	1,739	-	-
November	22,152	1,936	11,917	1,838	-	-
Desember	26,815	969	1,047	1,777	-	-
Total	113,108^{*)}	6,392^{*)}	138,856^{**)}	14,505^{**)}	107,575	11,207
Rata-rata/bulan	113,108/ 6 = 18,851	6,392/6 = 1,065	138,856/1 0 = 13,886	14,505/10 = 1,451	107,575/7 = 15,368	11,207/7 = 1,601
Persentase emisi rata-rata yang diserap/bulan		1,065/18,85 1 x 100% = 5.7%		1,451/13,88 6 x 100% = 10.4%		1,601/15,3 68 x 100% = = 10.4%

(lanjutan)

Keterangan :

- *) : Perhitungan penyerapan emisi CO₂ untuk produksi CO₂ cair dimulai pada bulan Juli 2009 (pada awal proyek dimulai).
- **): Data tahun 2010 yang digunakan adalah data 10 bulan, karena pada bulan Oktober tidak ada data emisi yang dihasilkan PT. KS, sedangkan pada bulan Desember jumlah emisi CO₂ yang dihasilkan PT. KS lebih kecil dari emisi yang diserap disebabkan alat monitoring CO₂ bermasalah.

**Lampiran 5: Perhitungan Potensi
CDM**

Tahun	Reduksi CO₂ (ton)	Kompensasi (\$/ton)	Potensi CDM (\$)
2009	6,392	5 - 10	31,960 - 63,920
2010	14,505	5 - 10	72,525 - 145,050
2011	11,207	5 - 10	56,035 - 112,070

Potensi CDM PT. KS tahun 2009 (6 bulan):

$$6,392 \text{ ton} \times (\$5 \text{ s/d } \$10) = \$ 31,960 - \$ 63,920$$

Potensi CDM PT. KS tahun 2010 (12 bulan):

$$14,505 \text{ ton} \times (\$5 \text{ s/d } \$10) = \$ 72,525 - \$ 145,050$$

Potensi CDM PT. KS tahun 2011 (6 bulan):

$$11,207 \text{ ton} \times (\$5 \text{ s/d } \$10) = \$ 56,035 - \$ 112,070$$

Lampiran 6: Standar *Foodgrade* CO₂ Cair

International Society of Beverage Technologist (ISBT)	
<u>2001 Quality Guidelines for Liquid Carbon Dioxide (LCO₂)</u>	
% Purity	99.9% min
Moisture	20 ppm v/v max
Oxygen	30 ppm v/v max
Carbon Monoxide	10 ppm v/v max
Ammonia	2.5 ppm v/v max
Nitric Oxide/Nitrogen Dioxide	2.5 ppm v/v each max
Non-volatile Residue (NVR)	10 ppm w/w max
Non-volatile Organic Residue (NVOR)	5 ppm w/w max
Phosphine	0.3 ppm v/v max
Total Volatile Hydrocarbons (THC as Methane)	50 ppm v/v max
Total Non-methane Hydrocarbons (TNMHC)	20 ppm v/v max
Acetaldehyde	0.2 ppm v/v max
Aromatic Hydrocarbon Content (as benzene)	20 ppb v/v
Total Sulfur Content (less SO ₂)	0.1 ppm v/v
Sulfur Dioxide	1 ppm v/v max
Odor of Solid CO ₂ (Snow)	no foreign odor
Appearance in Water	no color or turbidity
Odor & Taste in Water	no foreign odor or taste

Lampiran 7: Hasil Analisis CO₂ Cair Berstandar *Foodgrade*

Keterangan	Nilai
% Kemurnian	99,97%
SO ₂	0
Sulfur	0.1 ppm
Total Hidrokarbon	0,34 ppm
Uap Air (H ₂ O)	1 ppm
Benzena	-
CH ₄	-
Bau dan Rasa	Tidak Ada

Sumber : PT. RMIKK

Lampiran 8 : Pabrik Pemurnian CO₂ RMIKK & Unit CO₂ Removal System PBS



Lampiran 9: Fasilitas Absorpsi CO₂**CO₂ Absorption Plant in PTKS**

Lampiran 10: *Storage Tank* PT. RMIKK



Lampiran 11: Panduan Wawancara

LEMBAR UNTUK MANAGER & SUPERVISOR

PANDUAN WAWANCARA

Data Responden

Nama Lengkap :

Jabatan :

Pendidikan :

Alamat :

Pertanyaan

1. Emisi CO₂ dari hasil proses pembuatan baja berasal dari berbagai sumber.
 - a. Bahan bakar apa yang digunakan di perusahaan? Seberapa besar kontribusinya terhadap emisi CO₂?
 - b. Apakah jenis raw material juga ikut berkontribusi terhadap emisi CO₂?
 - c. Berapa besar emisi CO₂ yang dihasilkan dari proses pembuatan baja per jam, per hari?
2. Alasan apa yang mendasari pemanfaatan emisi CO₂ untuk produksi CO₂ cair?
3. Kadar CO₂ pada gas buang yang dimanfaatkan harus sebesar minimal 70%. Apa yang mendasari penentuan karakteristik tersebut?
4. Terkait teknologi pengolahan emisi CO₂ menjadi CO₂ cair yang berasal dari Denmark.
 - a. Apa keunggulan teknologi tersebut?
 - b. Apakah ada kendala dalam menerapkan teknologi tersebut?
 - c. Berapa investasi yang dikeluarkan?
 - d. Adakah teknologi lokal yang dapat dipakai untuk pengolahan emisi CO₂ seperti teknologi dari Denmark?
 - e. Jika jawaban 4.d ya, mengapa tidak menggunakan teknologi tersebut?
5. Bagaimana bentuk pemanfaatan CO₂ cair pada industri lain?

(Lanjutan)

6. Terkait dengan nilai manfaat yang diperoleh dari pemanfaatan emisi CO₂.
 - a. Berapa harga beli limbah CO₂ dari PT. Krakatau Steel?
 - b. Berapa harga jual CO₂ cair kepada konsumen?
 - c. Dipasarkan kemana saja produk CO₂ cair tersebut?
 - d. Berapa banyak kebutuhan CO₂ cair di pasaran per hari?
 - e. Berapa banyak PT. Krakatau Karbonindo dapat memenuhi permintaan pasar?

7. Adakah kendala dalam penyediaan CO₂ pada gas buang PT. Krakatau Steel yang digunakan untuk produksi CO₂ cair secara kontinyu?

CATATAN PANDUAN WAWANCARA

Informan Penelitian	Nomor Pertanyaan yang Akan Diajukan
Manajemen PT. Krakatau Steel	1, 2, 3, 6a, 7
Manajemen PT. Krakatau Karbonindo	3, 4, 5, , 6a s/6e,7

Lampiran 12: Panduan Wawancara

LEMBAR UNTUK DIREKSI

PANDUAN WAWANCARA

Data Responden

Nama Lengkap :

Jabatan :

Pendidikan :

Alamat :

1. Industri baja pada proses produksinya menghasilkan emisi CO₂. Emisi CO₂ dari industri baja sebesar 25% memberikan kontribusi terbesar gas rumah kaca (GRK) dari sektor industri. Salah satu upaya menurunkan emisi karbon adalah dengan memanfaatkan emisi karbondioksida gas buang untuk diolah menjadi CO₂ cair.
 - a. Kebijakan apa yang melandasi pemanfaatan emisi karbondioksida gas buang untuk diolah menjadi CO₂ cair?
 - b. Jika perusahaan mengedepankan aspek lingkungan mengapa pemanfaatan emisi CO₂ pada gas buang baru dilakukan?
2. Pengurangan emisi karbon dikaitkan dengan CDM. Apa yang perusahaan ketahui mengenai CDM?
3. Apakah pembuatan CO₂ cair dapat dikaitkan dengan CDM? Kalau ya, bagaimana implementasinya? Kalau tidak, mengapa tidak dilakukan?
 - a. Apa kendala-kendalanya terkait dengan CDM?
 - b. Apa saran atau masukan jika CDM mau diimplementasikan?
4. Apakah dengan berjalannya proyek ini, dapat dilihat bahwa pemanfaatan ini dapat mengurangi emisi CO₂ secara optimal?
 - a. Jika Ya, apa alasannya?
 - b. Jika Tidak, adakah upaya lain yang dilakukan untuk mengurangi emisi CO₂ tersebut?

(lanjutan)

5. Bagaimana pemanfaatan emisi CO₂ pada gas buang untuk diolah menjadi CO₂ cair dilihat dari aspek lingkungan, sosial dan ekonomi?

CATATAN PANDUAN WAWANCARA

Informan Penelitian	Nomor Pertanyaan yang Akan Diajukan
Manajemen PT. Krakatau Steel	1, 2, 3,4
Manajemen PT. Krakatau Karbonindo	2, 4, 5