

STUDI PEMANFAATAN LIMBAH CO₂ MENJADI CO₂ CAIR DENGAN TEKNOLOGI CO₂ PURIFICATION DI INDUSTRI BAJA

Wahyu Kartika^{1*}

¹Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Bhayangkara Jakarta Raya, Jakarta, Indonesia
 e-mail: ^{1*}wahyukartika@gmail.com

Abstract

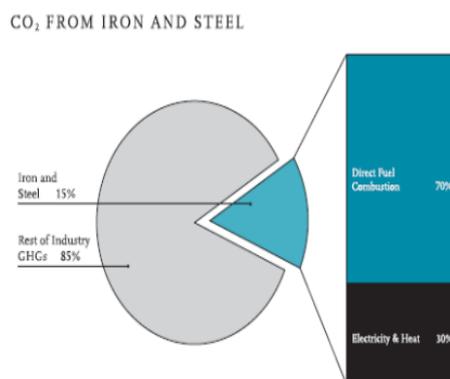
Steel products are needed to support the development of the manufacturing industry and other strategic industries in Indonesia. The steel industry is one of the contributors to CO₂ gas emissions, which contributes about 15 percent of greenhouse gases (GHG). PT. XYZ, which is one of the largest steel industries in Indonesia, produces CO₂ waste from the reduction process in the exhaust gas by an average of 20 tons/hour to produce its steel. This study aims to utilize CO₂ waste in exhaust gas into liquid CO₂ so that its utilization can reduce CO₂ emissions to the environment. Waste minimization by PT. XYZ is by recycling CO₂ waste into liquid CO₂ with CO₂ Purification technology. Liquid CO₂ is useful in various industries such as the manufacture of carbonated beverages, food and beverage preservation, and the welding industry. Waste minimization has resulted in a 10% reduction in CO₂ emissions by an average of 10%. The magnitude of this decrease is influenced by the limited production capacity and storage tank capacity. The results of the study also show that the variables that are considered for the use of CO₂ emissions are the purity of CO₂, raw gas CO₂.

Keywords : *Steel industry, CO₂ emission, recycle, liquid CO₂, CO₂ Purification technology*

PENDAHULUAN

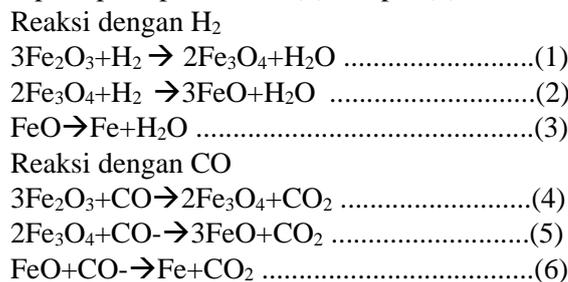
Baja merupakan salah satu komoditas yang penting bagi Indonesia. Sebagai negara yang terus melakukan pembangunan, baja adalah produk yang diandalkan karena baja terkait erat dengan industri infrastruktur dan industri strategis lainnya. Meningkatnya kebutuhan baja tentu saja tidak akan terlepas dari masalah lingkungan.

Industri baja menjadi salah satu penyumbang emisi gas karbon dioksida (CO₂) yang memberi kontribusi terbesar gas rumah kaca (GRK) dari sektor industri yaitu sekitar 15% seperti ditunjukkan pada Gambar 1 (Muryani, 2020).



Source: Baumert et al. 2005.
 Gambar 1 Emisi Karbon dari Industri Baja

Emisi CO₂ dari produksi baja dihasilkan melalui proses reduksi besi dari oksida besi dengan kokas pada tungku sembur, menghasilkan pig iron dan karbon dioksida seperti pada persamaan (1) sampai (6) :



Sumber CO₂ lainnya berasal dari proses pembakaran sejumlah bahan bakar fosil untuk mengoperasikan furnace. Gas CO₂ dalam jumlah besar dapat ditemukan pada gas buang yang dihasilkan dari peralatan furnace, dan blast furnace (Agustina & Wahyudi, 2010).

Emisi CO₂ mengalami peningkatan dari tahun ke tahun akibat semakin meningkatnya kegiatan manusia dari berbagai sektor. Hasil perhitungan inventarisasi GRK nasional menunjukkan tingkat emisi GRK di tahun 2018 adalah 1.637.156 Gg CO₂e meningkat sebesar 450.928 Gg CO₂e dibanding tingkat emisi tahun 2000 (Gas & Kaca, 2020). Untuk emisi pada tahun 2018 masing-masing kategori/sektor dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Emisi GRK Tahun 2018

Sumber	Gg CO ₂ e
Energi	595.665
Proses industri & p pupuk	59.262
Pertanian	131.642
Kehutanan	723.510
Limbah	127.077
Total	1.637.156

PT. XYZ yang merupakan salah satu industri baja di Indonesia menghasilkan emisi CO₂eq sebesar 301.776,44 ton per tahun untuk memproduksi baja sebesar 1.360.650 ton/tahun (Indonesia, 2010) Emisi terbesar berasal dari proses yaitu sebesar 63% dari emisi keseluruhan. Dalam upaya permasalahan lingkungan akibat emisi CO₂, minimisasi limbah CO₂ dilakukan dengan menggunakan teknologi CO₂ Purification untuk mengubah limbah CO₂ menjadi CO₂ cair berstandar food grade. Minimalisasi limbah adalah pendekatan produksi bersih yang dalam pelaksanaannya tidak terlepas dari satu hal penting yaitu teknik minimisasi limbah (waste minimization techniques), yaitu 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 (Kartika, 2012). Tujuan utama dari penerapan Produksi Bersih menurut Kep.Men LH Nomor 75 Tahun 2004 adalah dengan melakukan implementasi perubahan dalam desain produk, proses manufaktur, dan teknik-teknik manajemen untuk meningkatkan efisiensi, mencegah polusi dan mengurangi limbah..

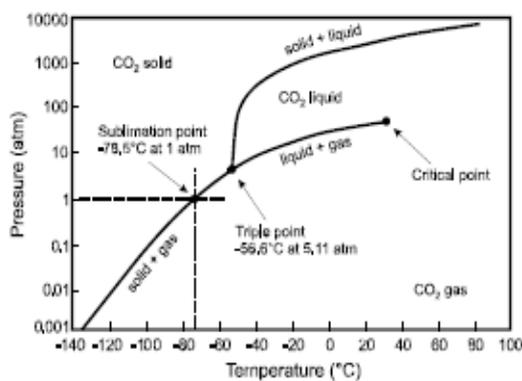
Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui seberapa besar penyerapan limbah CO₂ yang diubah menjadi CO₂ cair dengan menggunakan teknologi CO₂ Purification, dan

variabel-variabel yang menjadi pertimbangan dijadikan *by product*. Pemanfaatan limbah CO₂ untuk diolah menjadi CO₂ cair berstandar food grade masih sedikit dilakukan. Teknologi CO₂ Purification menggunakan alat dari Jerman. Produk CO₂ cair banyak dimanfaatkan pada berbagai industri antara lain sebagai bahan pendingin terutama dalam industri makanan yang digunakan saat pengangkutan dan penyimpanan es krim dan makanan beku lainnya. CO₂ cair juga digunakan untuk membuat minuman ringan berkarbonasi dan air soda, untuk memadamkan api, dan dipakai untuk pengelasan dalam manufaktur (Hu et al., 2006). Manfaat CO₂ juga dapat dijumpai pada proses pembuatan roti yang berfungsi sebagai pengembang roti dengan bantuan ragi.

Berbagai macam proses pemisahan gas CO₂ secara luas telah dikembangkan untuk mereduksi CO₂ sebagai upaya minimisasi limbah seperti metode pelarutan dan difusi dengan teknologi membran, kriogenik (pendinginan), adsorpsi, dan absorpsi secara kimiawi (Yu et al., 2012). 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.

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. Kondisi operasional yang sering kali dipakai dalam dunia industri adalah pada kisaran temperatur di bawah 200°C dan kisaran tekanan di bawah 400 bar. Karbon dioksida tidak mempunyai bentuk cair

pada tekanan di bawah 5,1 atm namun langsung menjadi padat pada temperatur di bawah -78 °C. Gas CO₂ memiliki suhu kritis yang cukup tinggi yakni sekitar 31°C. Memiliki titik kritis 73 atm. CO₂ cair akan membeku pada suhu -56,6°C (5,2 atm). Tekanan uap padatnya adalah 1 atm pada suhu -78,5°C sehingga sangat memungkinkan untuk menguap pada udara terbuka tanpa mencair terlebih dahulu. Bila CO₂ cair dibiarkan menguap, maka akan terbentuk massa kristalin seperti salju yang dapat dipakai sebagai penurun suhu seperti ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Titik Kritis CO₂

Menurut PT. XYZ (2010), proses pembuatan karbon dioksida cair memakai teknologi CO₂ Purification adalah melalui proses penyerapan, pengeringan dan pengembunan. Karakteristik emisi CO₂ yang digunakan dalam pembuatan CO₂ 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. XYZ. 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. 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 didalamnya diisi alumina dioksida (Al₂O₃), PbO dan karbon aktif yang dapat mengabsorbsi 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, aldehyd, NO₂. Proses terakhir adalah pemurnian dengan cara pemisahan (destilasi) yang menggunakan kondensator amoniak (NH₃) pada suhu 27°C. 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.

Beberapa penelitian untuk mengurangi emisi CO₂ telah dilakukan seperti pengurangan emisi CO₂ pada gas buang boiler dengan teknologi absorpsi melalui membran serat berpori (Hariastuti et al., 2010), 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% (Agustina & Wahyudi, 2010), pemanfaatan emisi CO₂ dari PLTU Batubara dalam pengolahan limbah cair domestik berbasis mikroalga (Istiyanie, 2011), Mikro alga untuk penyerapan emisi CO₂ dan pengolahan limbah cair di lokasi industri (Santoso et al., 2011). Selain itu penelitian dengan menggunakan metode kriogenik juga telah dilakukan yaitu suatu metode pemurnian yang melibatkan campuran gas dengan kondensasi dan destilasi pada temperatur rendah. Pada proses kriogenik crude biogas ditekan hingga 80 bar (Hart & Gnanendran, 2009), penelitian menggunakan absorben efektif seperti DETA, PZ, DEG dan H₂O untuk menangkap CO₂ pada suhu rendah atau dalam larutan kaya CO₂ juga telah dilakukan (Yu & Tan, 2014).

METODE PENELITIAN

Penelitian ini bersifat non-eksperimental atau penelitian deskriptif-analitik dengan menggunakan metode *ex post facto*. Dalam metode *ex post facto*, peneliti menelaah variabel secara retrospektif atau melihat apa yang sudah terjadi. Metode penelitian secara umum dijelaskan pada Tabel 3.

Populasi dan Sampel Penelitian

Penarikan/pemilihan informan dalam penelitian ini dilakukan dengan metode *purposive sampling*.

Teknik Pengumpulan Data

Data primer diperoleh melalui wawancara dan observasi. Wawancara dilakukan kepada informan yang memenuhi kriteria dengan menggunakan panduan wawancara, sedangkan data sekunder diperoleh dengan melakukan analisis dokumen seperti dokumen perusahaan, laporan survey, laporan penelitian, dan buku.

Pengolahan Data

Pengolahan data dilakukan melalui beberapa tahapan sebagai berikut :

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

Analisis Data

Analisis data dilakukan dengan menggunakan, kajian literatur, kalkulasi, dan analisis deskriptif. Analisis deskriptif dilakukan setelah terlebih dahulu mengelompokkan data dalam bentuk tabel, dan dilakukan perhitungan. Sedangkan kajian literatur dilakukan untuk mencari jawaban yang berkaitan dengan dampak pemanfaatan emisi CO₂ terhadap lingkungan.

Tabel 3. Pendekatan dan Metode Penelitian

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 pengaruh pemanfaatan emisi CO ₂ pada lingkungan.	Analisis dokumen	Kajian literatur, kalkulasi, analisis deskriptif

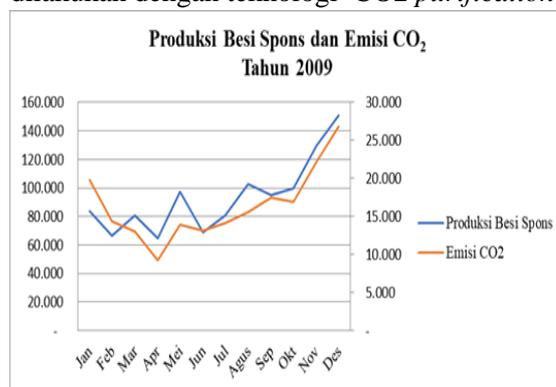
HASIL PENELITIAN & PEMBAHASAN

Data yang diperoleh dari hasil wawancara menyatakan bahwa karakteristik CO₂ yang akan masuk ke dalam unit purifikasi disyaratkan minimum kadarnya 70%. Penentuan karakteristik ini berdasarkan *equipment design* teknologi CO₂ Purification. masih di bawah ambang batas Baku Mutu Emisi yaitu sebesar 3 mg/m³, sehingga aman dibuang ke lingkungan. **Emisi CO₂ yang Dihasilkan PT. XYZ**

Hasil penelitian menunjukkan jumlah emisi CO₂ yang dihasilkan PT. XYZ berbanding lurus dengan banyaknya produksi besi spons yang dihasilkan. Semakin besar produksi besi spons maka akan semakin besar emisi CO₂ yang dihasilkan seperti ditunjukkan pada Gambar 3, 4, dan 5. 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

Kadar CO₂ yang berasal dari PT. XYZ rata-rata diatas 93% ditunjukkan pada Tabel 4, sisanya 7 % adalah kandungan H₂O dan gas pengotor seperti sulfur. Dari data yang diperoleh, gas ikutan seperti sulfur kadarnya

dihasilkan dari setiap proses produksi serta tingkat kemurnian CO₂ yang tinggi maka pemanfaatan emisi CO₂ dari sisa proses reduksi untuk diubah menjadi CO₂ cair dapat dilakukan dengan teknologi CO₂ purification.

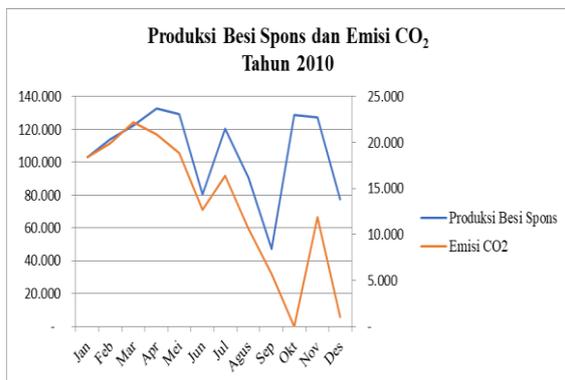


Gambar 3. Grafik Emisi CO₂ pada Gas Buang dan Produksi Tahun 2009

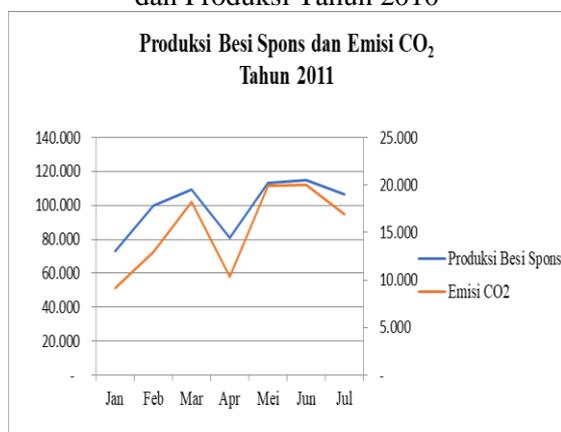
Tabel 4. Pengukuran Kadar CO₂ sebelum masuk Unit Purifikasi

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 : (Kartika, 2012)



Gambar 4. Grafik Emisi CO₂ pada Gas Buang dan Produksi Tahun 2010

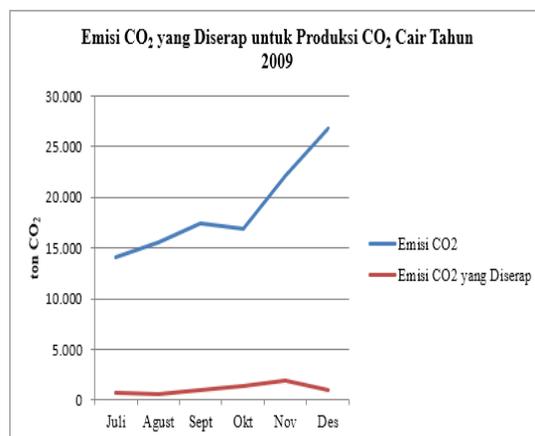


Gambar 5. Grafik Emisi CO₂ pada Gas Buang dan Produksi Tahun 2011

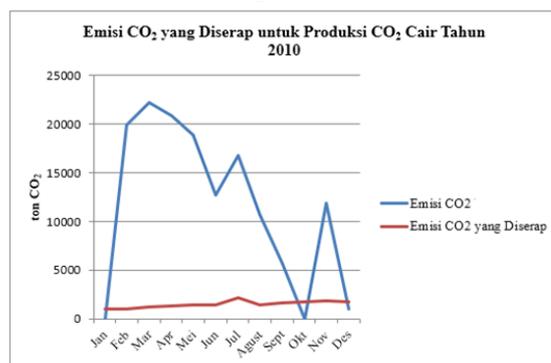
Penyerapan Emisi CO₂

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 6, 7, dan 8). Dari hasil tersebut terlihat bahwa besarnya emisi CO₂ yang diserap selalu konstan sebesar rata-rata 10% per hari. Emisi CO₂ yang diserap, selanjutnya masuk ke dalam unit *purification* dan diuji tingkat kemurniannya. 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 *online* secara komputerisasi menunjukkan bahwa tingkat kemurnian CO₂ cair sebesar 99,97%; sulfur 0,97 ppm; hidrokarbon 0,759 ppm; H₂O 0,581

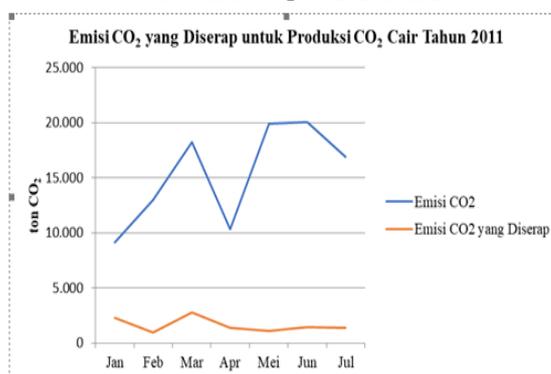
ppm; aromatik tidak terdeteksi, sehingga dari hasil uji tersebut, produk ini layak untuk dipakai.



Gambar 6. Emisi CO₂ yang Diserap untuk Produksi CO₂ Cair Tahun 2009



Gambar 7. Emisi CO₂ yang Diserap untuk Produksi CO₂ Cair Tahun 2010



Gambar 8. Emisi CO₂ yang Diserap untuk Produksi CO₂ Cair Tahun 2011

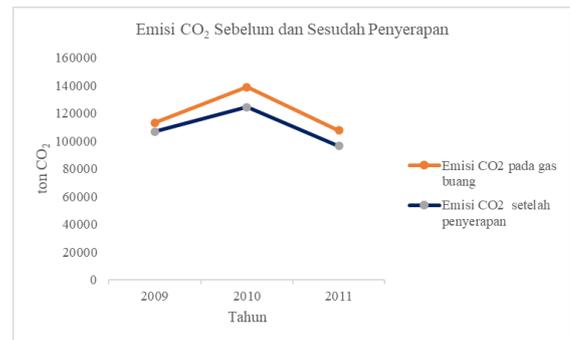
Faktor yang Mempengaruhi Jumlah Penyerapan Emisi CO₂ untuk Produk CO₂ Cair

Pada Tabel 5 menunjukkan bahwa jumlah emisi CO₂ yang diserap pada tahun

Studi Pemanfaatan Limbah CO₂....

2009, 2010 dan 2011 rata-rata 2-3 ton/jam atau rata-rata 10% dari emisi CO₂ yang dihasilkan dari sisa proses reduksi. Hal ini menunjukkan terjadi penurunan emisi CO₂ ke atmosfer sebesar 10% seperti ditunjukkan pada Gambar 9, dengan demikian dapat disimpulkan bahwa dengan teknologi CO₂ purification dapat mengurangi gas CO₂ ke atmosfer yang dapat menekan laju pemanasan global, akan tetapi volume penyerapan CO₂ ini belum optimal jika dilihat dari jumlah emisi CO₂ yang diserap dibandingkan dengan jumlah emisi CO₂ yang dilepaskan, hal ini disebabkan kapasitas produksi yang sudah didesain mempengaruhi jumlah emisi yang diserap. Teknologi yang digunakan di pabrik purifikasi hanya mempunyai kapasitas produksi 3 ton/jam. Variabel lain yang mempengaruhi 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* hanya dapat menyimpan CO₂ cair untuk 1 minggu produksi, maka produksi CO₂ cair dihentikan sementara waktu sambil menunggu *storage tank* dapat diisi lagi.



Gambar 9. Emisi CO₂ Sebelum dan Sesudah Penyerapan

Tabel 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
Rata-rata/jam	26,18	1,48	19,29	2,00	21,34	2,22
Emisi rata-rata yang diserap(%)		5,7%		10,4%		10,4%

KESIMPULAN & SARAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa emisi CO₂ yang dapat diserap adalah sebesar 10% /bulan dari total emisi CO₂ yang dihasilkan dari sisa proses produksi. Hal ini dipengaruhi oleh kapasitas produksi yg sudah didesain pada alat CO₂ purification dan juga kapasitas storage tank. Upaya pengurangan emisi CO₂ tersebut merupakan konsep produksi bersih dengan minimisasi limbah yang berdampak positif mereduksi GRK ke atmosfer sebagai penyebab *global warming*. Perlu jugs dicari teknologi yang dapat menyerap emisi CO₂ dengan volume lebih besar lagi agar berdampak signifikan terhadap penurunan GRK terutama gas CO₂ di atmosfer sehingga kualitas lingkungan menjadi lebih baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Agustina, S., & Wahyudi, H. (2010). *Studi Proses Pemisahan Gas CO₂ dari Gas Buang Industri Besi Baja Melalui Optimalisasi Rancangan Kontaktor Membran*. July 2019.
- Gas, I., & Kaca, R. (2020). *Inventarisasi Gas Rumah Kaca (GRK) dan Monitoring, Pelaporan, Verifikasi (MPV) 2019*.
- Harihastuti, N., Widiyasa, I. N., Djayanti, S., Harsono, D., & Sari, I. R. J. (2010). Pengurangan Emisi Co₂ Pada Gas Buang Boiler Dengan Teknologi Absorpsi Melalui Membran Serat Berpori. In *Jurnal Riset Industri* (Vol. 4, Issue 1, pp. 57–66).
- Hart, A., & Gnanendran, N. (2009). Energy Procedia Cryogenic CO₂ Capture in Natural Gas. *Energy Procedia*, 1(1), 697–706.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2009.01.092>
- Hu, C. qing, CHEN, L. yun, ZHANG, C. xia, QI, Y. hong, & YIN, R. yu. (2006). Emission Mitigation of CO₂ in Steel Industry: Current Status and Future Scenarios. *Journal of Iron and Steel Research International*, 13(6), 38–52.
[https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(06\)60107-6](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(06)60107-6)
- Indonesia, S. (2010). *Laporan Survey (2010). Emisi gas rumah kaca PT. Krakatau Steel pabrik besi spon unit hyl 3*.
- Istiyanie, D. (2011). *Pemanfaatan emisi CO₂ dari PLTU Batubara dalam pengolahan limbah cair domestik berbasis mikroalga*.
- Kartika, W. (2012). *Pemanfaatan Limbah CO₂ Dengan Pendekatan Produksi Bersih (Kajian Pemanfaatan oleh PT . Krakatau Steel dan PT . Resources Jaya Management Indonesia Krakatau Karbonindo , Cilegon Banten)*. Universitas Indonesia.
- Muryani, M. (2020). Produksi bersih dan model kerjasama sebagai upaya mitigasi emisi gas rumah kaca pada sektor industri. *Jurnal Sosiologi Dialektika*, 13(1), 48.
<https://doi.org/10.20473/dk.v13i1.2018.48-65>
- Santoso, A. D., Darmawan, R. A., & Susanto, J. P. (2011). Mikro Alga untuk Penyerapan Emisi CO₂ dan Pengolahan Limbah Cair di Lokasi Industri. *Jurnal Ilmu Dan Teknologi Kelautan Tropis*, 3(2), 62–70.
- Yu, C. H., Huang, C. H., & Tan, C. S. (2012). A review of CO₂ capture by absorption and adsorption. *Aerosol and Air Quality Research*, 12(5), 745–769.
<https://doi.org/10.4209/aaqr.2012.05.0132>
- Yu, C. H., & Tan, C. S. (2014). CO₂ capture by aqueous solution containing mixed alkanolamines and diethylene glycol in a rotating packed bed. *Energy Procedia*, 63, 758–764.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.11.084>