

**POTENSI PENGURANGAN EMISI GAS RUMAH  
KACA (GRK) OLEH INDUSTRI KACA LEMBARAN  
PT.XYZ MELALUI KONSERVASI ENERGI**

**TESIS**

**Karya tulis sebagai salah satu syarat  
untuk memperoleh gelar Magister dari  
Universitas Darma Persada**

**Oleh**

**WASHINGTON PURBA**

**NIM : 2017910001**

**(Program Studi Magister Energi Terbarukan)**



**SEKOLAH PASCASARJANA  
UNIVERSITAS DARMA PERSADA  
JAKARTA**

**2019**

## **PERNYATAAN KEASLIAN**

"Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa tesis ini merupakan hasil karya sendiri dan sepanjang pengetahuan dan keyakinan saya tidak mencantumkan tanpa pengakuan bahan-bahan yang telah dipublikasikan sebelumnya atau ditulis oleh orang lain, atau sebagian bahan yang pernah diajukan untuk gelar atau ijasah pada Universitas Darma Persada atau Perguruan tinggi lainnya"

Jakarta, 9 Agustus 2018

Washington Purba

NIM : 2017910001

## ABSTRAK

**WASHINGTON PURBA (2019910001).** Potensi Pengurangan Emisi Gas Rumah Kaca (GRK) oleh Industri Kaca Lembaran PT. XYZ melalui Konservasi Energi. Dibawah Bimbingan Prof. Dr. Kamaruddin Abdullah, IPU, Dr. Ismet, M.Eng

Industri Kaca Lembaran adalah salah satu industri yang menggunakan energi 75% natural gas dan 25% energi listrik, hampir 100% natural gas dipakai untuk meleburkan bahan baku didalam tungku peleburan dengan kapasitas 500 – 700 ton pada suhu 1500°C secara terus menerus selama 15 tahun dan 24 jam operasi. Menggunakan metode penghitungan emisi IPCC-2006, diperoleh emisi GRK rata-rata dari proses kalsinasi bahan baku dan pemakaian energi dari lima pabrik PT.XYZ sebesar 112.211 tonCO<sub>2</sub>/tahun/pabrik dan mendapatkan faktor emisi (EF<sub>kl</sub>) rata-rata 0,18tonCO<sub>2</sub>/ton pull. Dengan teknologi konversi panas menjadi energi listrik yang sudah banyak digunakan pada industri lainnya (mis semen, baja, dll), sisa pembakaran yang dialirkan ke cerobang asap dengan suhu 400 – 600°C, berpotensi digunakan untuk menghasilkan energi listrik. Mengacu kepada analisa dan perhitungan sample gas dari pabrik-4 industri kaca lembaran PT.XYZ, pada suhu tersebut dan konsumsi natural gas 3800 – 4000 NM<sup>3</sup>/jam penggunaan tradisional Rankine Cycle berbasis uap air bertekanan (SRC) berpotensi menghasilkan energi listrik 1 – 3,5MW dengan efisiensi 10 – 40% untuk digunakan sendiri sehingga bisa dihitung sebagai komponen pengurang emisi GRK yang nilainya 5 – 20 tonCO<sub>2</sub>/pabrik/tahun. Dengan pengurangan emisi ini, faktor emisi EF<sub>kl</sub> turun dari rata-rata 0,18tonCO<sub>2</sub>/ton pull menjadi 0,16 tonCO<sub>2</sub>/ton pull, sehingga emisi total turun menjadi 107.205 - 99.695tonCO<sub>2</sub>/tahun/pabrik, dan pencapaian target emisi GRK NDC IPPU adalah 0,749% skenario CM1 2030 dari 4 (empat) pabrik. Dampak positif selain pengurangan emisi GRK, dengan asumsi efisiensi SRC 25%, umur pakai 30 tahun, harga produksi listrik konversi adalah 80% x BPP-Jawa Barat (Rp.729/kWH), berproduksi 335 hari, 24 jam, berpotensi menghemat biaya pengeluaran pembayaran listrik Rp.28Mil/pabrik jika investasi sendiri dengan suku bunga 8%, dan Rp.151Mil/pabrik jika investasi oleh perusahaan WHP dan PT.XYZ membeli listrik dengan harga BPP-Jawa Barat (Rp.911/kWH). Potensi tambahan pendapatan selama 30 tahun selain penghematan listrik adalah sebesar Rp.161Mil/pabrik dari perdagangan karbon

Kata kunci : Emisi GRK, Gas Buang, Konversi, Energi Listrik, Penghematan

## **ABSTRACT**

**WASHINGTON PURBA (2019910001).** *Potential of Greenhouse Gas Emissions Reduction by the Sheet Glass Industry of PT. XYZ through Energy Conservation. Under the guidance of Prof. Dr. Kamaruddin Abdullah, IPU, Dr. Ismet, M. Eng*

*Sheet Glass Industry is one industry that uses 75% natural gas energy and 25% electricity, almost 100% natural gas is used to melt raw materials in a smelting furnace with a capacity of 500 - 700 tons at a temperature of 1500°C continuously for 15 years and 24 hours operation. Using the IPCC-2006 emission calculation method, the average GHG emissions obtained from the calcination process of raw materials and energy use from five PT.XYZ plants obtained 112,211 tonsCO<sub>2</sub> / year / plant and obtained an average emission factor (EF<sub>kl</sub>) of 0.18tonCO<sub>2</sub> / ton pull. With the technology of converting heat into electrical energy that has been widely used in other industries (eg cement, steel, etc.), the residual combustion that is flowed into the flue with a temperature of 400 -600°C has the potential to be used to produce electrical energy. Referring to the analysis and calculation of gas samples from the PT.XYZ flat glass industry plant-4, at these temperature and the consumption of natural gas 3800 - 4000 NM<sup>3</sup> / hour the use of traditional Rankine Cycle based on pressurized water vapor (SRC) has the potential to generate 1 – 3,5MW electric energy with efficiency of 10 - 40% for its own use so that it can be calculated as a component of GHG emission reductions whose value is 5-20 tonsCO<sub>2</sub>/plant/year. With this emission reduction, EF<sub>kl</sub> emission factor decreased from an average of 0.18tonCO<sub>2</sub> / ton pull to 0.16 tonCO<sub>2</sub> / ton pull, so that total emissions decrease 107.205 - 99.695tonCO<sub>2</sub>/year/plant, achieving the NDC IPPU emission target was 0.749% scenario CM1 2030 from 4 (four) plant. Positive impacts other than GHG emission reductions, assuming a 25% SRC efficiency, 30 years of service life, the price of converting electricity production is 80% from BPP-Jawa Barat (Rp.729 / kWh), producing 335 days, 24 hours, potentially saving on electricity expenditure expenses by Rp.28Bil / plant if the investment itself is at 8% interest, and Rp.151Bil / plant if the investment by the WHP and PT.XYZ company buys electricity at a BPP-Jawa Barat price (Rp.911/kWh). The additional potential income for 30 years other than electricity savings is Rp.161Mil / plant from carbon trading*

*Keywords: GHG emission, Flue Gas, Conversion, Electrical Energy, Saving*

## LEMBAR PERSETUJUAN TESIS

**Judul Tesis** : Potensi Pengurangan Emisi Gas Rumah Kaca (GRK) oleh Industri Kaca Lembaran PT. XYZ melalui Konservasi Energi.  
**Nama** : Washington Purba  
**NIM** : 2017910001

### Telah disetujui oleh komisi pembimbing dan penguji

Prof. Dr. Kamaruddin Abdullah, IPU  
(Pembimbing Utama/Penguji)

---

Dr. Aep Saepul Uyun, M.Eng  
(Ketua Penguji)

---

Dr. Ir. Erwin Susanto Sadirsan, MM, MBA  
(Anggota Penguji)

---

Dr. M. Syukri Nur, M.Si  
(Anggota Penguji)

---

Mengetahui

Ketua Program Studi

Direktur Pascasarjana

(Dr. Aep Saepul Uyun, M.Eng)

(Prof. Dr. Kamaruddin Abdullah, IPU)

Tanggal Ujian : 15 Agustus 2019  
Tanggal Yudisium : 15 Agustus 2019

## **KATA PENGANTAR**

Puji Syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa karena hanya oleh Kasih Karunia dan BerkatNya, saya bisa menyelesaikan penulisan Tesis ini sebagai syarat utama menyelesaikan Program Magister Energi Terbarukan di Universitas Darma Persada dengan judul **PENGURANGAN EMISI GAS RUMAH KACA (GRK) OLEH INDUSTRI KACA LEMBARAN PT. XYZ MELALUI KONSERVASI ENERGI**

Kembali ke bangku kuliah pada umur 53 tahun, bukanlah direncanakan dari awalnya, dengan bekerja di daerah Cikampek dan kuliah di Jakarta pasti melelahkan, tetapi didorong oleh keinginan kuat untuk menyegarkan pikiran dari kejenuhan bekerja di industri sejak 1993.

Tesis didasarkan pada kondisi sebenarnya dimana penulis masih bekerja sampai dengan Tesis ini ditulis, melihat fakta bahwa gas buang dari cerobong pabrik dengan suhu 400 -600°C tidak dimanfaatkan untuk konversi energi. Dengan bekal dari kuliah di program Pascasarjana Universitas Darma Persada, penulis memutuskan untuk melakukan penelitian kuantitatif dan kualitatif potensi gas buang untuk digunakan menjadi pembangkit listrik, dengan tujuan memperoleh manfaat pengurangan emisi GRK dan penghematan biaya pembayaran listrik

Kemampuan dan waktu yang terbatas, membuat Tesis ini jauh dari sempurna, tetapi penulis percaya didalam ketidak sempurnaan tersebut ada sesuatu yang bermanfaat, bagi penulis setidaknya sudah bisa menuliskan dalam wujud tulisan akan sesuatu apa yang dipelajari, dilihat dan dipikirkan, bagi pembaca setidaknya bisa memikirkan apa yang sedang dilihat dan dibaca.

Pada akhirnya penulis terbuka untuk dikoreksi jika dalam proses penulisan dan isi Tesis kurang tepat secara kaidah penulisan karya ilmiah, semoga kedepan bisa melakukannya lebih baik

## **RIWAYAT HIDUP**

Penulis lahir tanggal 14 September 1965 di Desa Tigarunggu, Kabupaten Simalungun, Propinsi Sumatera Utara sebagai anak ke-8 dari 11 bersaudara dari pasangan bapak saya Willem Purba dan Ibu saya K Listeria Saragih. Dengan 11 bersaudara, kedua orang tua saya mendidik kami dengan keras, disiplin, hemat dan tekun berdoa dan selalu semangat

Penulis menyelesaikan Pendidikan SD dan SMP Desa Tigarunggu tahun 1980, menyelesaikan Sekolah Menengah Atas di SMA Kristen 2 PSKD Jakarta, menyelesaikan Pendidikan Perguruan S1 di Universitas Sumatera Utara Jurusan Teknik Elektro Tahun 1991, dan sejak tahun 1993 sampai Tesis ini ditulis bekerja di Perusahaan Industri Kaca Lembaran PT. Asahimas Flat Glass.,Tbk

Tahun 2017 penulis diterima sebagai mahasiswa Pascasarjana Energi Terbarukan di Universitas Darma Persada sebagai mahasiswa pendaftar pertama untuk angkatan 2017, dan berbekal semangat dan doa bisa menyelesaikannya dalam waktu 2 (dua) tahun.

*Tesis ini saya persembahkan untuk Istri saya tercinta Nurselimah Saragih dan ke tiga anak yang saya kasihi Abrillianetta Lischaryo, Meilia Nur Chrisandra, Junibert Phillip Martino dan ke dua almarhum orang tua saya yang selalu berpesan untuk berbuat baik kepada sesama manusia terutama kepada Tuhan*

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis sangat berterima kasih kepada Prof. Dr. Kamaruddin Abdullah, IPU sebagai ketua Pembimbing sekaligus selaku Direktur Sekolah Pascasarjana Energi Terbarukan (UNSADA) yang dengan profesionalisme beliau selalu memberikan masukan dan mengingatkan penulis untuk melaporkan kemajuan tesis, Dr. Ismet, M.Eng selaku Pembimbing 1 yang saya hormati, Dr. Aep Saepul Uyun, M.Eng selaku Ka. Prodi Sekolah Pascasarjana Energi Terbarukan (UNSADA) yang selalu memberikan masukan yang tidak terduga, Dr. M. Syukri Nur, M.Si yang selalu memberikan semangat dan motivasi, Ir. Erkata Yandri M.Sc.rer.nat atas kata-kata pedas yang menjadikan semangat selalu baru, Dr. Erwin Susanto Sadirsan.,MM dengan pengalaman beliau bekerja di perusahaan Oil & Gas ternama yang menjadikan diskusi dalam kuliah selalu berlangsung interaktif. Penulis juga sangat berterima kasih kepada Ir. Riki Ibrahim.,M.Sc, Ir. Ratna Ariati.,M.Sc, Drs. Rahedi Soegeng.,M.Sc, Ir. Joko.,M.Sc dan segenap Dosen Pascasarjana yang mendidikasikan waktu, tenaga, pikiran, pengetahuan dan pengalamannya. Ucapan terimakasih juga untuk istri saya tercinta dan ketiga anak terkasih saya karena hari Sabtu yang seharusnya bersama dengan mereka, penulis pergunakan untuk kuliah

Terimakasih juga kepada teman-teman angkatan 2017,yang selalu saling memotivasi dan mendukung satu sama lainnya. Ucapan terimakasih yang terakhir adalah kepada bagian administrasi dan kebersihan Sekolah Pascasarjana Energi Terbarukan Universitas Darma Persada, karena dengan adanya mereka segala kegiatan administrasi menjadi tertib, dan ruangan selalu terawat.

## DAFTAR ISI

DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR GAMBAR .....	xii
DAFTAR TABEL.....	xiv
DAFTAR LAMPIRAN.....	i
DAFTAR SINGKATAN DAN LAMBANG.....	i
BAB 1 Pendahuluan .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Ruang Lingkup Penelitian .....	4
1.5 Kerangka Penelitian .....	5
BAB 2 Tinjauan Pustaka .....	7
2.1 Emisi GRK Global dan Indonesia .....	7
2.2 Metode Perhitungan Emisi GRK Sektor Energi dan Industri .....	8
2.2.1 Perhitungan Emisi GRK dari Penggunaan Energi .....	9
2.2.2 Perhitungan Emisi GRK dari Proses Industri Bahan Baku (IPPU). .....	10
2.3 Energi Listrik dari Panas Gas Buang .....	11
2.3.1 Konversi Panas Gas Buang menjadi Energi Listrik.....	13
2.3.2 Pengurangan Emisi CO <sub>2</sub> dengan konversi Energi Panas Gas Buang menjadi Energi Listrik.....	16
2.3.3 Proses Produksi Industri Kaca Lembaran PT.XYZ .....	19
2.4 Pasar Karbon .....	21
BAB 3 Metodologi Penelitian .....	23
3.1 Pengumpulan Data .....	24

3.2	Perhitungan Panas Gas Buang.....	29
3.3	Teknologi Konversi Panas ke Energi Listrik .....	31
BAB 4	Hasil dan Pembahasan .....	37
BAB 5	Kesimpulan dan Saran .....	48
5.1	Kesimpulan.....	48
5.2	Saran .....	49
	DAFTAR PUSTAKA .....	50
	LAMPIRAN.....	52

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1-1. Kerangka penelitian .....	5
Gambar 2-1. Emisi CO <sub>2</sub> global berdasarkan sumber energi .....	7
Gambar 2-2. Emisi GRK tahun 2002 – 2016 .....	8
Gambar 2-3. Sistem proses pemanasan dalam tungku .....	11
Gambar 2-4. Potensi Gas Buang 12 Negara Industri .....	17
Gambar 2-5. Gambar tampak atas Industri Kaca Lembaran Pabrik-3A, 3B .....	20
Gambar 2-6. Diagram proses produksi kaca lembaran, penggunaan energi dan gas buang yang dihasilkan .....	21
Gambar 3-1 Tahapan kajian dan penelitian .....	24
Gambar 3-2. Diagram alir (foto monitor DCS) pembakaran .....	26
Gambar 3-3. Data fisika gas buang dari cerobong asap (60 hari) .....	27
Gambar 3-4. Grafik fisika gas buang (Suhu dan Tekanan) dari cerobong asap selama 60 hari .....	28
Gambar 3-5. Perhitungan energi panas dari konsumsi Natural Gas dalam satu jam .....	30
Gambar 3-6. Gambar siklus SRC atau ORC .....	31
Gambar 3-7. Grafik Keluaran (Output) Daya Listrik (kW) dengan suhu sumber panas .....	32
Gambar 3-8. Mekanisme aliran gas buang kedalam SRC .....	33
Gambar 3-9. Penghematan biaya listrik, investasi oleh perusahaan WHP .....	35
Gambar 3-10. Potensi pendapatan dari perdagangan karbon .....	36
Gambar 4-1. Emisi GRK dari Energi dan Bahan Baku .....	38

Gambar 4-2.Pull (ton) .....	39
Gambar 4-3. Emisi GRK (tonCO <sub>2</sub> ) per-ton pull.....	39
Gambar 4-4. Potensi Energi Listrik (1 tahun) dari Konversi Gas Buang 8.353kW-h per-NM <sub>3</sub> natural gas pada efisiensi SRC 10-40% .....	40
Gambar 4-5. Potensi Pengurangan Emisi GRK per-tahun dari Listrik hasil Konversi .....	41
Gambar 4-6. Emisi GRK (1 tahun) sebelum dan sesudah penggunaan listrik hasil konversi .....	41
Gambar 4-7. Emisi per-ton pull (FEkl) sebelum dan sesudah penggunaan listrik hasil konversi .....	42
Gambar 4-8. Potensi kontribusi pengurangan emisi oleh 4 pabrik sampai tahun 2030 .....	43
Gambar 4-9. Potensi persentasi kontribusi pengurangan emisi terhadap sektor industri (IPPU) tahun 2030 dengan tiga skenario .....	43
Gambar 4-10. Analisa Net Present Value (NPV) dan ROI .....	45
Gambar 4-11. Potensi Penghematan biaya energi listrik, dan pendapatan dari Kredit Karbon .....	46

## DAFTAR TABEL

Tabel 2-1. Faktor Emisi Bahan Bakar .....	9
Tabel 2-2. Faktor Emisi Energi Listrik .....	10
Tabel 2-3. Komposisi gas buang pembakaran dengan beberapa % eksek udara ...	14
Tabel 2-4. Panas sepesifik gas buang dengan bahan bakar Natural Gas.....	15
Tabel 2-5. Kapasitas Tungku dan Gas Buang beberapa Jenis Industri Kaca.....	16
Tabel 2-6. Konversi gas buang menjadi listrik beberapa sektor industri .....	18
Tabel 2-7. Aplikasi ORC pada 4 sektor industri di beberapa negara EU27 .....	18
Tabel 2-8. Jenis-jenis emisi GRK utama dalam Protokol Kyoto dan Laporan IPCC ke-5 .....	21
Tabel 3-1. Konsumsi Energi Listrik Tahun 2014 - 2018 .....	25
Tabel 3-2. Konsumsi Natural Gas (NG) dan Minyak Residu (MR) Tahun 2014 - 2018 .....	25
Tabel 3-3. Pull (ton) Tahun 2014 - 2018 .....	26
Tabel 3-4. Komposisi Kimia Gas Buang .....	28
Tabel 3-5. Massa molekul gas buang dalam 1 NM3 Natural Gas .....	29
Tabel 3-6. Teknologi konversi panas menjadi daya listrik .....	33

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran-1 : Perhitungan Emisi GRK dari Konsumsi Natural Gas dan Minyak Residu .....	53
Lampiran-2 : Perhitungan Emisi GRK dari Konsumsi Listrik PLN .....	54
Lampiran-3 : Perhitungan Emisi GRK dari Proses Peleburan Bahan Baku (IPPU) .....	55
Lampiran-4 : Perhitungan NPV dan ROI .....	56

## DAFTAR SINGKATAN DAN LAMBANG

SINGKATAN	NAMA
BAU	Business as Usual (tanpa melakukan tindakan)
BEP	Break Event Point
BOO	Build, Own, Operation
BPP	Biaya Pokok Pembangkitan
CDM	Clean Development Mechanism
CM1	Countermeasure 1 (unconditional/tanpa bantuan negara lain)
CM2	Countermeasure 2 (conditional/dengan bantuan negara lain)
CO <sub>2</sub> e	Carbondioxide ekivalen
C <sub>p</sub>	Panas Jenis
CR	Cullet Ratio
EA	Excess Air
EF	Efficiency Factor
EFkl	Faktor Emisi Kaca Lembaran
GRK	Gas Rumah Kaca
GRK <sub>ENG</sub>	Emisi GRK Energi
GRK <sub>IPPU</sub>	Emisi GRK IPPU
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IPPU	Industrial Process and Product Use
JCM	Joint Credit Mechanism
kWH	Kilo Watt Hour
NDC	Nationally Determined Contribution
ORC	Organic Rankine Cycle
Q <sub>hr</sub>	Energi Panas
RAN-GRK	Rencana Aksi Nasional Gas Rumah Kaca
ROI	Return of Investment
SRC	Steam Rankine Cycle
TJ	Tera Joule
VCS	Verified Carbon Standard
V <sub>tot</sub>	Udara Pembakaran
WHP	Waste Heat to Power
η	Efisiensi

# **BAB 1**

## **Pendahuluan**

### **1.1 Latar Belakang**

Pemanasan global merupakan istilah yang digunakan untuk menggambarkan peningkatan bertahap suhu rata-rata atmosfer bumi dan lautannya, nilainya  $0.74 \pm 0.18$  °C ( $1.33 \pm 0.32$  °F) selama seratus tahun terakhir. Peningkatan jumlah karbon dioksida dan gas rumah kaca lainnya yang dilepaskan oleh pembakaran bahan bakar fosil, pembukaan lahan, pertanian, dan aktifitas manusia lainnya, diyakini sebagai sumber utama pemanasan global yang telah terjadi selama 50 tahun terakhir. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) menyimpulkan bahwa, sebagian besar peningkatan suhu rata-rata global sejak pertengahan abad ke-20 kemungkinan besar disebabkan oleh meningkatnya konsentrasi gas-gas rumah kaca (GRK) akibat aktifitas manusia..

Emisi GRK terkait energi global tumbuh 1,7% pada 2018 hingga mencapai rekor tertinggi 33,1 Gton CO<sub>2</sub> dan merupakan pertumbuhan tertinggi sejak 2013, dan 70% lebih tinggi dari peningkatan rata-rata sejak 2010. Peningkatan emisi didorong oleh konsumsi energi yang lebih tinggi, serta kondisi cuaca di beberapa bagian dunia yang menyebabkan meningkatnya permintaan energi untuk pemanasan dan pendinginan.

Emisi GRK stabil antara 2014 dan 2016, bahkan ketika ekonomi global terus berkembang. Dinamika berubah sejak 2017 dan 2018, pertumbuhan ekonomi yang lebih tinggi tidak diikuti oleh produktivitas energi yang tinggi, dimana energi rendah karbon tidak dijalankan dengan baik, yang mengakibatkan emisi GRK meningkat hampir 0,5% untuk setiap kenaikan 1% pertumbuhan ekonomi.

Sektor industri memberikan konsumsi energi yang berbeda-beda berdasarkan wilayah, sesuai dengan perbedaan hasil industri, intensitas energi (diukur sebagai energi yang dikonsumsi per unit output kotor), dan komposisi industri. Perusahaan dapat mengurangi konsumsi energi dalam segala cara, termasuk meningkatkan proses sektor industri untuk mengoptimalkan pemakaian energi dan meminimumkan rugi-rugi energi (energy losses), meningkatkan penggunaan kogenerasi, dan mendaur ulang bahan dan jenis bahan bakar untuk mengurangi biaya dan meningkatkan efisiensi

Menurut laporan World Industry Balance 2018 yang dipublikasikan oleh IEA (International Energy Agency), sampai dengan tahun 2016 konsumsi energi dunia adalah sebesar 9.555Mtoe. Dari jumlah konsumsi tersebut, sektor industri merupakan pemakai energi terbesar yaitu 37% diikuti oleh transportasi 29%, pemukiman 22% dan yang lainnya. Berdasarkan jenis energi yang digunakan, minyak merupakan persentase terbesar yaitu sebesar 40,9%, diikuti oleh listrik 18,8%, natural gas 15.1%, biofuel 11%, batubara 10%, dan energi lainnya sebesar 3.4%, dan kondisi ini tidak berubah sejak 1971.

Konsumsi energi di negara kita Indonesia sampai dengan tahun 2016 adalah sebesar 1.016BBoe. Berbeda dengan distribusi konsumsi global per sektor, dari total konsumsi tersebut industri berada di urutan ke-2 pemakai energi yaitu 30.88%. Konsumsi energi terbesar adalah sektor transportasi sebesar 43.89% diikuti oleh pemukiman/rumah tangga 16.62%, komersial 5.8% dan yang lainnya. Berdasarkan jenis energi yang digunakan, minyak bumi masih merupakan porsi terbesar yaitu 43.7% diikuti oleh listrik 19.9%, natural gas 15.3%, batubara 9.6%, LPG 8.5% dan biofuel 2.97%

Kekhawatiran masyarakat dunia terhadap emisi GRK mendorong lahirnya Kyoto Protocol pada bulan Desember 1998, dilanjutkan dengan lahirnya Paris Agreement pada COP ke-21 di Paris, 30 November hingga 12 Desember 2015. yang berisi kesepakatan-kesepakatan dari negara anggota, yang pada intinya menyetujui ambang suhu global berada di bawah 2°C, mengatasi perubahan suhu maksimal 1,5°C dari masa pra industri

Indonesia ikut menandatangani Paris Agreement pada 22 April 2016 dan kemudian diratifikasi melalui Undang-Undang Nomor 16 Tahun 2016. Komitmen Indonesia pada COP-21 di Paris untuk menurunkan emisi GRK sebesar 29% di tahun 2030 dengan usaha sendiri (CM1) atau sebesar 41% dengan bantuan internasional CM2) yang dituangkan dalam dokumen Nationally Determined Contribution (NDC). Momentum ini menjadi dasar perubahan target bagi penurunan emisi GRK di Indonesia sebesar 26% di tahun 2020. Dari angka 29% tersebut, sektor energi mendapatkan porsi penurunan emisi sebesar 314 juta ton CO<sub>2</sub> atas upaya sendiri dan 398 juta ton CO<sub>2</sub> dengan dukungan internasional

## **1.2 Perumusan Masalah**

Industri Kaca Lembaran merupakan sebagian industri yang menggunakan energi di atas 6000MToe, sehingga masuk dalam amanat Peraturan Pemerintah No.70 Tahun 2009 pasal 12 ayat 2 tentang kewajiban melakukan Konservasi Energi. Energi terbesar yang digunakan adalah natural gas dan listrik, yang mencapai porsi 30% dari COGM. Dalam pengelompokan IPCC 2006 sebagai penghasil emisi GRK, industri kaca masuk sub sektor 2A (mineral) IPPU dan 1A2 (manufacturing industries & construction) pengguna energi

Natural Gas merupakan salah satu gas metane yang secara langsung (tanpa digunakan) dan saat digunakan akan menghasilkan emisi GRK. Dari konsumsi natural gas ini sebagai bahan bakar di industri kaca lembaran dalam peleburan material didalam tungku berkapasitas 700 ton, dihasilkan gas buang dengan rentang suhu 400 – 600°C yang berpotensi bisa dimanfaatkan kembali (kogenerasi) menjadi pembangkit listrik untuk dipakai sendiri dalam proses yang sama sehingga bisa mensubsitusi sebagian pasokan listrik dari PLN, dengan demikian ada potensi pengurangan emisi GRK dari proses subsitusi tersebut

Dengan uraian di atas, masalah dapat dirumuskan sebagai berikut :

1. Proses apa saja yang bisa menimbulkan emisi GRK
2. Berapa besar emisi GRK yang dihasilkan dari konsumsi natural gas dan listrik?

3. Apakah bisa dilakukan pengurangan emisi GRK di dalam industri kaca lembaran?
4. Bagaimana pengurangan emisi bisa dilakukan ?
5. Berapa besar potensi pengurangan emisi GRK?
6. Apa manfaat ekonomis dari pengurangan emisi GRK?

### **1.3 Tujuan Penelitian**

Berdasarkan uraian pada perumusan masalah di atas, penelitian ini ditujukan untuk :

1. Menganalisa dan menghitung potensi energi listrik hasil konversi gas buang industri kaca lembaran untuk menurunkan emisi GRK
2. Menjadi acuan pelaku industri kaca lembaran di Indonesia untuk berkontribusi mencapai target emisi GRK Industri Nasional sebesar 66,85 Mton CO<sub>2</sub> (skenario 26% / CM1) dan 66,35 Mton CO<sub>2</sub> (skenario 41% / CM2) pada tahun 2030
3. Potensi penghematan biaya energi listrik dengan penggunaan listrik hasil konversi

### **1.4 Ruang Lingkup Penelitian**

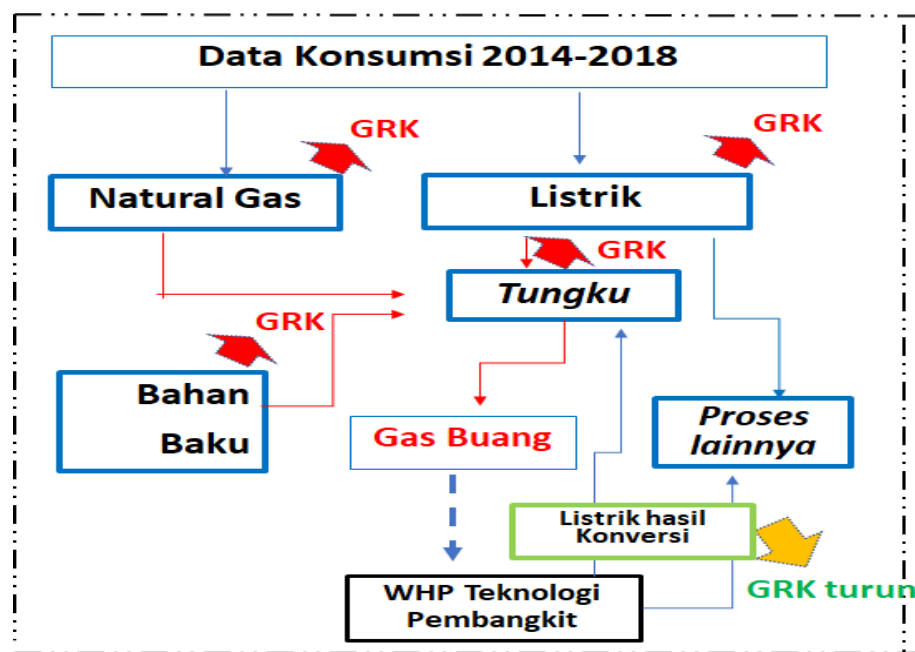
Dalam proses produksi Industri Kaca Lembaran, beberapa tahapan dilakukan untuk menghasilkan kaca lembaran yang siap dijual, dan setiap proses menggunakan energi dari natural gas 75% dan listrik 25%, dengan demikian penulis membatasi ruang lingkup penelitian sebagai berikut :

1. Industri Kaca Lembaran Perusahaan PT. XYZ
2. Proses pemuatan bahan baku sampai menjadi kaca lembaran semua jenis kaca lembaran

3. Perhitungan emisi GRK pada pemakaian energi natural gas, listrik pada tungku peleburan, peralatan pendukungnya dan proses peleburan bahan baku
4. Potensi pengurangan emisi GRK berbasiskan listrik yang dihasilkan dari konversi gas buang dari cerobong menjadi energi listrik
5. Tidak termasuk penelitian pada faktor pendukung lainnya di dalam pabrik, misalnya transportasi bahan baku dan hasil produksi, dan utilitas lainnya
6. Tidak termasuk perhitungan emisi GRK dan pengurangannya dari komposisi kimia gas buang
7. Perhitungan keekonomian pembangkit listrik hasil konversi
8. Potensi pendapatan dari perdagangan karbon hasil pengurangan emisi GRK

## 1.5 Kerangka Penelitian

Penelitian difokuskan pada identifikasi proses produksi dan penggunaan energi yang ber potensi mengemisikan GRK, identifikasi potensi konversi gas buang tungku peleburan menjadi energi listrik, perhitungan energi listrik yang dihasilkan, dan perhitungan penurunan emisi GRK yang dihasilkan dari konversi gas buang menjadi energi. Karena diperlukan investasi, maka penelitian juga akan



Gambar 1 - 1. Kerangka penelitian

menganalisa dan menghitung ke ekonomian konversi gas buang menjadi listrik seperti digambarkan pada gambar 1-1

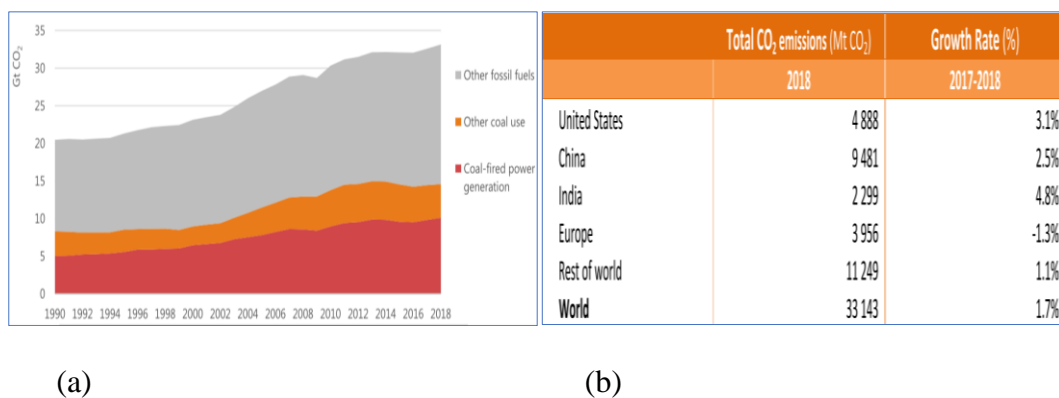
Dari gambar 1-1, emisi GRK akan timbul dari pemakaian langsung energi natural gas dan listrik pada tungku peleburan dan energi listrik pada proses lainnya diluar tungku peleburan, sebagai emisi tidak langsung. Emisi GRK langsung adalah hasil proses pembakaran dalam tungku dan kalsinasi bahan baku yang diemisikan melalui gas buang cerobong tungku, dan sekaligus bisa digunakan sebagai pengurang emisi GRK jika dikonversi kembali menjadi energi listrik untuk digunakan dalam mensubsitusi listrik dari sumber PLN

# BAB 2

## Tinjauan Pustaka

### 2.1 Emisi GRK Global dan Indonesia

Tahun 2018 emisi GRK global karena konsumsi energi mencapai 33Gton CO<sub>2</sub> yang meningkat 1,7% dari tahun sebelumnya dan merupakan peningkatan tertinggi sejak 2013 seperti ditunjukkan pada Gambar 2-1.

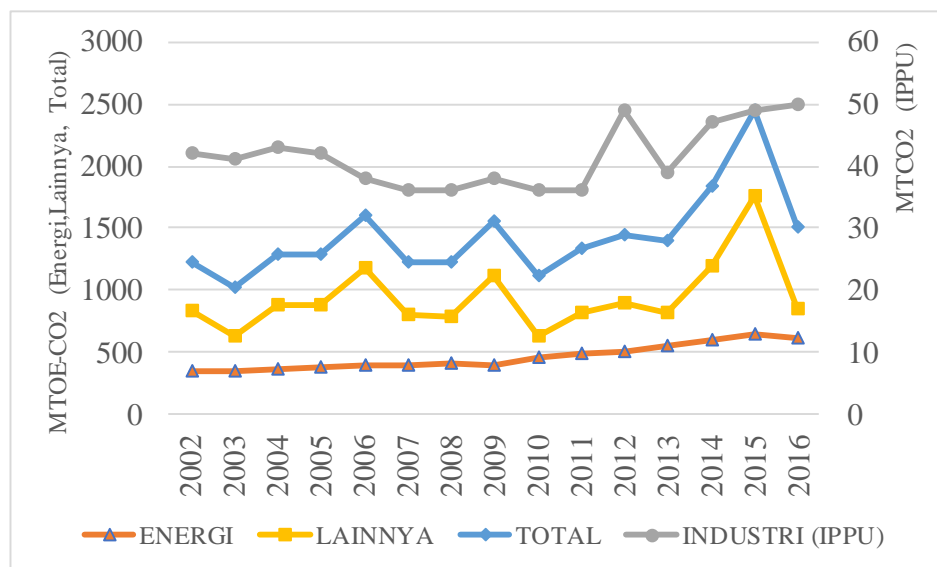


Gambar 2-1. Emisi CO<sub>2</sub> global berdasarkan sumber energi (a) tahun 1990-2018 dan dari beberapa wilayah (b) Negara (International Energy Agency, 2019)

Pada gambar 2-1 (a), pertumbuhan ekonomi yang tinggi tahun 2017-2018 tidak diimbangi dengan produktivitas energi tinggi, dan penggunaan energi rendah karbon tidak mencukupi untuk memenuhi peningkatan permintaan energi.

Kenaikan emisi GRK tahun 2017-2018 terbesar terjadi di India, seperti ditunjukkan pada gambar 2-1 (b) disebabkan oleh pertumbuhan ekonomi 7%, mengakibatkan penggunaan energi yang meningkat terutama batubara 5% untuk pembangkit listrik (International Energy Agency, 2019)

Sampai dengan tahun 2016, emisi GRK di Indonesia adalah 1.515 MtonCO<sub>2</sub> dan angka ini turun 39% dibandingkan dengan tahun 2015, dan kontribusi penurunannya yang terbesar dari sektor kebakaran lahan gambut/hutan 88%, energi sebesar 5%, sektor penggunaan lahan dan kehutanan (Land use, land-use change, and forestry/LULUCF) sebesar 27% sementara sektor Industri (Industrial Processes and Production Use/IPPU) meningkat 2%. Grafik emisi GRK tahun 2002 – 2016 ditunjukkan pada Gambar 2-2



Gambar 2-2. Emisi GRK tahun 2002 – 2016 ( Laporan Inventarisasi GRK dan Monitoring, Pelaporan dan Verifikasi 2017)

## 2.2 Metode Perhitungan Emisi GRK Sektor Energi dan Industri

Metode perhitungan emisi GRK menggunakan Intergovernmental Panel on Climate Change Guidelines dalam IPCC Guidelines 2006 (Combustion *et al.*, 2006; Hanle *et al.*, 2006) dan Penerapan metodologi ini telah ditetapkan dalam Peraturan Menteri LHK Nomor P.73/MenLHK/Setjen/Kum.1/12/2017 tanggal 29 Desember 2017 tentang Pedoman Penyelenggaraan dan Pelaporan Inventarisasi Gas Rumah Kaca (Lingkungan, Dan and Republik, 2018)

Perhitungan untuk kedua sektor tersebut dengan berbasis pada faktor pengali, yaitu Faktor Emisi yang dikeluarkan oleh IPCC ataupun oleh negara bersangkutan

2.2.1 Perhitungan Emisi GRK dari Penggunaan Energi

Untuk sektor energi khususnya pada pembakaran bahan bakar fosil, tingkat emisi akan tergantung pada volume dan jenis bahan bakar, fraksi oksidasi bahan bakar, dan kandungan karbonnya. Untuk menghitung emisi GRK harus didapatkan data (1) jenis penggunaan bahan bakar fosil, (2) koefisien kandungan karbon, (3) karbon yang tersimpan dalam produk untuk jangka waktu tertentu, (4) persentase karbon teroksidasi selama pembakaran.

Secara matematika, menghitung emisi GRK dari penggunaan energi dituliskan pada persamaan 2-1,

$$\text{Emisi GRK}_{ENG} = EC \times EF \dots\dots\dots 2 - 1$$

dimana :  $EC$  = Konsumsi Energi

$EF$  = Faktor Emisi

Faktor Emisi yang digunakan dalam hal ini disesuaikan dengan emisi faktor lokal Indonesia seperti pada Tabel 2.1 dan 2.2, yaitu faktor emisi untuk energi listrik dan bahan bakar.

Tabel 2-1. Faktor Emisi Bahan Bakar (Indonesia, 2014)

BAHAN BAKAR	FAKTOR EMISI (CO <sub>2</sub> /TJ)			NCV (TJ/Gg)	%C
	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O		
Natural Gas	56,1	1	0,1	48,0	73,4
LPG	63,1	1	0,1	47,3	81,4
Biodiesel	70,8	3	0,6	27,0	52,1
Jet Kerosene	71,5	3	0,6	44,1	86,0
Minyak Diesel	74,1	3	0,6	43,0	86,9
Minyak Residu	77,4	3	0,6	40,4	85,3
Kayu/limbah	112	30	4	15,6	47,7
Batubara antrasit	98,3	10	1,5	26,7	71,6

Table 2-2. Faktor Emisi Energi Listrik (Indonesia, 2014)

SISTIM KETENAGA LISTRIKAN	BASELINE FAKTOR EMISI
Jawa-Madura-Bali	0,725
Sumatera	0,743
Kalimantan TIMUR	0,742
Kalimantan Barat	0,775
Kalimantan Tengah dan Barat	1,273
Sulut, Sulteng, Gorontalo	0,161

**2.2.2 Perhitungan Emisi GRK dari Proses Industri (IPPU)**

Emisi GRK dari sektor industri mencakup CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O dan perfluorokarbon (PFC) dalam bentuk CF<sub>4</sub> dan C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>. Emisi yang dihasilkan, sebagai CO<sub>2</sub> ekivalen, sebagian besar berasal dari penggunaan energi yang sudah dijelaskan pada 2.2.1 dan kegiatan proses produksi.

Jenis industri berdasarkan IPCC 2006, dikelompokkan menjadi industri mineral, kimia, logam, penggunaan produk bahan bakar non-energi dan pelarut, elektronik dan lain-lain, dan industri kaca masuk dalam kelompok mineral bersama dengan industri semen, keramik dan industri lainnya yang menggunakan bahan karbonat

Sebagian besar industri kaca termasuk industri kaca lembaran secara umum menggunakan bahan baku pasir silika (SiO<sub>2</sub>), soda (Na<sub>2</sub>O), dan kapur (CaO), dengan sebagian kecil alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), dan bahan aditif lainnya

Bahan baku yang menghasilkan CO<sub>2</sub> selama proses peleburan dengan suhu 1500°C adalah batu kapur (CaCO<sub>3</sub>), dolomit Ca, Mg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> dan soda ash (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), mewakili sebagian besar emisi GRK dari bahan baku.

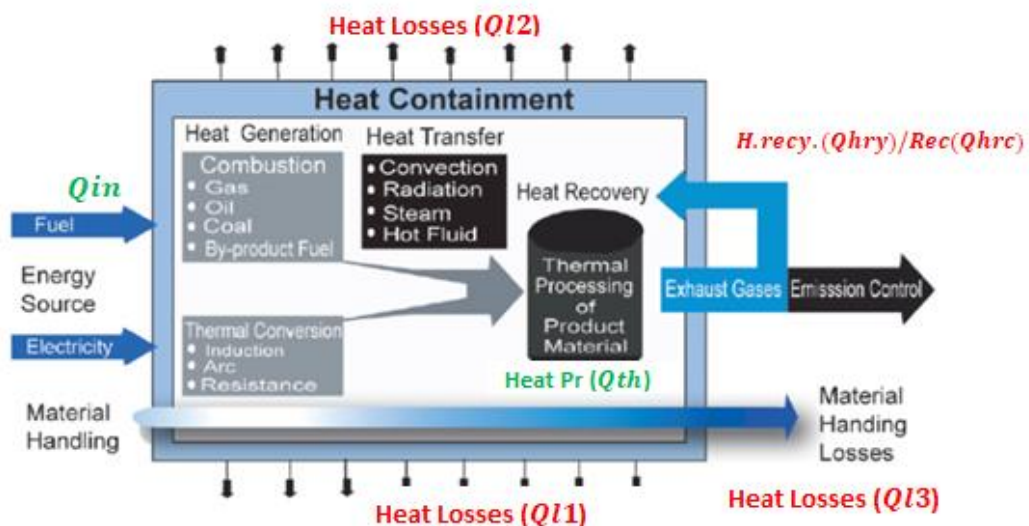
Persamaan 2-2 menunjukkan formula perhitungan emisi pada industri kaca dari proses bahan baku (IPPU),

$$\text{Emisi } GRK_{IPPU} = Mg \cdot EF \cdot (1 - CR) \dots\dots\dots 2 - 2$$

dimana :  $Emisi\ GRK_{IPPU} = CO_2\ ekivalen\ (ton)$   
 $Mg = pull\ (ton)$   
 $EF = Faktor\ Emisi\ (ton\ CO_2/ton\ kaca)$   
 $= 0,21\ kgCO_2/kg\ kaca\ pada\ rasio\ cullet\ 10 - 25\%$   
 (Hanle *et al.*, 2006)  
 $CR = rasio\ cullet$

### 2.3 Energi Listrik dari Panas Gas Buang

Energi dan limbah saling berhubungan, limbah yang dihasilkan dari berbagai sumber seperti area komersial, area industri, area tertentu, fasilitas umum, dan/atau fasilitas lainnya. Energi dari limbah atau residu, gas metan dari landfill digunakan untuk menghasilkan panas (landfill gas to fuel) untuk pemakaian langsung dan ataupun panas yang dikonversi menjadi energi listrik (landfill gas to electricity) yang bisa dimanfaatkan untuk komersial ataupun industri.



Gambar 2-3. Sistem proses pemanasan dalam tungku

Dalam proses sistem pemanasan, energi ditransfer ke bahan yang akan dipanaskan dengan pemanasan langsung dan tidak langsung. Secara umum proses

pemanasan dalam industri dibagi 3 (tiga) kategori, yaitu pembakaran dengan bahan bakar (combustion), listrik dengan elemen pemanas (electric heater), dan uap panas (steam heating). Gambar 2-3 menunjukkan proses pemanasan secara umum.

Dari gambar 2-3, dalam proses konversi bahan bakar menjadi panas berlaku hukum ke-2 termodinamika tentang kekekalan energi, dimana energi yang masuk harus sama dengan energi digunakan ditambah dengan rugi-rugi dalam bentuk panas gas buang melalui konduksi, konveksi dan radiasi melalui cerobong gas buang ataupun melalui produk industri yang dilepaskan selama proses pembakaran, dalam bentuk formulasi seperti pada persamaan 2-3,

$$Q_{in} = Q_{l1} + Q_{l2} + Q_{l3} + Q_{hry} + Q_{hrc} \dots\dots\dots 2 - 3$$

$Q_{hry}$  dan  $Q_{hrc}$  merupakan energi panas yang dikeluarkan sebagai gas buang melalui cerobong, dan pada kondisi panas tidak ada yang digunakan ulang, maka  $Q_{hry} + Q_{hrc}$  berpotensi dikonversi menjadi energi panas mekanik dan listrik, sehingga persamaan 2-3 menjadi persamaan 2-4,

$$Q_{in} = Q_{l1} + Q_{l2} + Q_{l3} + Q_{hr} \dots\dots\dots 2 - 4$$

dimana :

$$Q_{hr} = Q_{hry} + Q_{hrc}$$

Volume panas gas buang dan efisiensi, dapat dihitung dengan persamaan 2-5,

$$Q_{hr} = m \times C_p \times \Delta T \dots\dots\dots 2 - 5$$

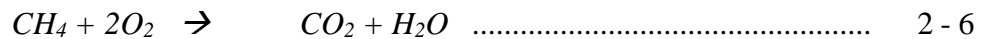
$$\eta = \frac{Q_{hr}}{Q_{in}} \times 100\% \dots\dots\dots 2 - 6$$

dimana,  $Q_{hr}$  = energi panas (J),  $m$  = massa (kg),  $C_p$  = panas spesifik (J/kg. K), dan  $\Delta T$  = perbedaan suhu (K/C) tertinggi akhir ( $T_{out}$ ) dan suhu awal ( $T_{in}$ ) sistem,  $\eta$  = efisiensi ( $< 1$ )

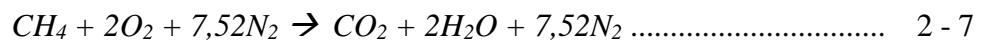
### 2.3.1 Konversi Panas Gas Buang menjadi Energi Listrik

Dalam proses pembakaran, stoikiometri (Richter, 1792) reaksi dibutuhkan untuk menghitung massa gas-gas dalam asap hasil pembakaran, yang terbentuk dari reaksi bahan bakar dengan oksigen dan bahan baku.

Dalam pembakaran sempurna (stoikiometri) dengan bahan bakar metan, dibutuhkan 2 mol oksigen untuk membakar 1 mol natural gas, persamaan reaksinya dituliskan pada persamaan 2-6



Molekul udara terdiri dari 0,9% argon, 78,1% Nitrogen, 20,9% Oksigen dan 0,038% CO<sub>2</sub>, dengan mengabaikan argon dan CO<sub>2</sub>, perbandingan Oksigen dengan Nitrogen dianggap dalam udara adalah 21 % : 79%, sehingga persamaan 2-6 menjadi,



Dari persamaan 2-7, untuk pembakaran sempurna (stoikiometri) perbandingan antara udara dengan bahan bakar (air to fuel ratio = A/F) adalah 9,52

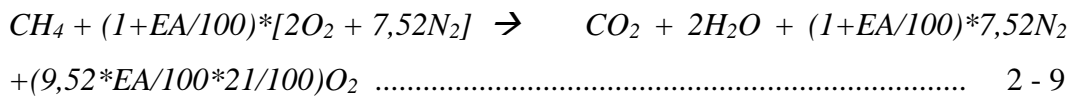
Dalam pembakaran sebenarnya, pembakaran sempurna (stoikiometri) tidak bisa terjadi sehingga timbul ekkses (kelebihan) udara atau bahan bakar dan beberapa senyawa lain yang terbentuk dalam gas buang. Dari sisi keamanan dan kualitas pembakaran, ekkses udara adalah dominan untuk menghindari timbulnya jelaga, asap banyak, resiko terjadi ledakan, dan kualitas bahan bakar yang tidak stabil

Persentase ekses udara (EA) dihitung dengan persamaan 2-8,

$$EA = \frac{\text{Aktual } A/F - \text{Stoikiometri } A/F}{\text{Stoikiometri } A/F} \times 100\% \quad \dots\dots\dots 2 - 8$$

dimana : EA = ekses udara (%), Stoikiometri A/F = 9,52

Dari persamaan 2-7, perbandingan komposisi gas dalam gas buang adalah 1 : 2 : 7,52 masing-masing untuk CO<sub>2</sub> : H<sub>2</sub>O : N<sub>2</sub>, tetapi karena dipengaruhi oleh ekses udara pada persamaan 2-8, maka persamaan 2-7 menjadi,



Dari persamaan 2-9, persentase masing-masing gas buang (hasil reaksi pada persamaan 2-9) dengan bahan bakar natural gas dapat dihitung dalam beberapa ekses udara seperti pada Tabel 2-3.

Tabel 2-3. Komposisi gas buang pembakaran dengan beberapa % ekses udara

Gas Buang (%)	Ekses Udara (EA) dalam %									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
CO <sub>2</sub> (%)	8,72	8,05	7,48	6,98	6,54	6,16	5,82	5,51	5,24	4,99
H <sub>2</sub> O (%)	17,43	16,10	14,95	13,96	13,09	12,32	11,64	11,03	10,48	9,98
N <sub>2</sub> (%)	72,11	72,63	73,09	73,48	73,82	74,13	74,40	74,64	74,86	75,05
O <sub>2</sub> (%)	1,74	3,22	4,48	5,58	6,54	7,39	8,14	8,82	9,43	9,98

Tabel 2-4. Panas spesifik gas buang dengan bahan bakar Natural Gas (Page, 2008)

SUBSTANCE	FORMULA	$C_p = a + bt + bt^2 + dt^3$				RANGE	% ERROR	
		(t in K, $C_p$ in kJ/kmol, K)					(K)	Max
		a	b	c	d			
Nitrogen	N2	28,9	-1,57E-03	8,08E-06	-2,87E-09	273-1800	0,59	0,34
Oxygen	O2	25,48	1,52E-02	-7,16E-06	1,31E-09	273-1800	1,19	0,28
Carbon Dioxide	CO2	22,26	5,98E-02	-3,50E-05	7,47E-09	273-1800	0,67	0,22
Water Vapour	H2O	32,24	1,92E-03	1,06E-05	-3,60E-09	273-1800	0,53	0,24
Sulfur Dioxide	SO2	25,78	5,80E-02	-3,81E-05	8,61E-09	273-1800	0,45	0,24

Jika massa jenis NG = 0,74016 , 1 NM3 NG = 1,0989M3, ekses udara EA %, stoikiometri A/F = 9,52, maka massa 1NM3 NG = 0,8134kG dan udara yang diperlukan dalam membakarnya sampai habis adalah,

$$V_{tot} = 1 + \frac{O_2 \text{ Stoik} \times 1,0989 \times (100 + \frac{EA}{A})}{100} \dots\dots\dots 2 - 10$$

dimana :  $V_{tot}$  = udara pembakaran (M3),

$EA$  = ekses udara (%)

$O_2$  Stoik = 9,52

Dengan mengetahui massa C, H dan senyawa lainnya dalam 0,8134kg NG, ekses udara pada Tabel 2-3, massa masing-masing molekul gas buang seperti CO2, H2O, N2, O2 dan lainnya dengan persamaan 2-9, maka dengan menggunakan persamaan 2-5 dan panas spesifik ( $C_p$ ) pada Tabel 2-4, akan diperoleh besar energi panas yang dihasilkan oleh senyawa gas buang.

Untuk beberapa jenis industri kaca, % bahan bakar yang menjadi rugi-rugi panas dalam gas buang adalah 29%, 30%, 57%, 53%, dan 56% masing-masing untuk jenis kaca lembaran, kontainer, press, insulation fibre, dan textile fibre (Page, 2008), seperti pada Tabel 2-5.

Dasar konversi energi panas menjadi listrik adalah dengan merubah panas menjadi uap dengan media cair dari air ataupun bahan cair organik lainnya dengan

suhu dan tekanan tertentu, diinjeksikan kedalam expander untuk memutar turbin yang di kopel dengan generator pembangkit listrik

Tabel 2-5. Kapasitas tungku dan gas buang beberapa jenis industri kaca (Page, 2008)

GLASS INDUSTRY SEGEMENT	FURNACE CAPACITY RANGE	TYPICAL FURNACE CAPACITY	NATURAL GAS CONSUMPTION	WASTE HEAT	% NATURAL GAS INPUT LOST to HEAT
	(ton)	(ton)	(TBtu/y)	(TBtu/Y)	(%)
Flat Glass	300 - 1000	550+	41.10	11.82	29
Container Glass	50 - 330	250	45.49	13.65	30
Pressed/Blown Glass	1 - 300	75	16.82	9.63	57
Insulation Fiber Glass	20 - 300	100	3.24	1.73	53
Textile Fiber Glass	100 - 150	100 - 150	11.05	6.14	56

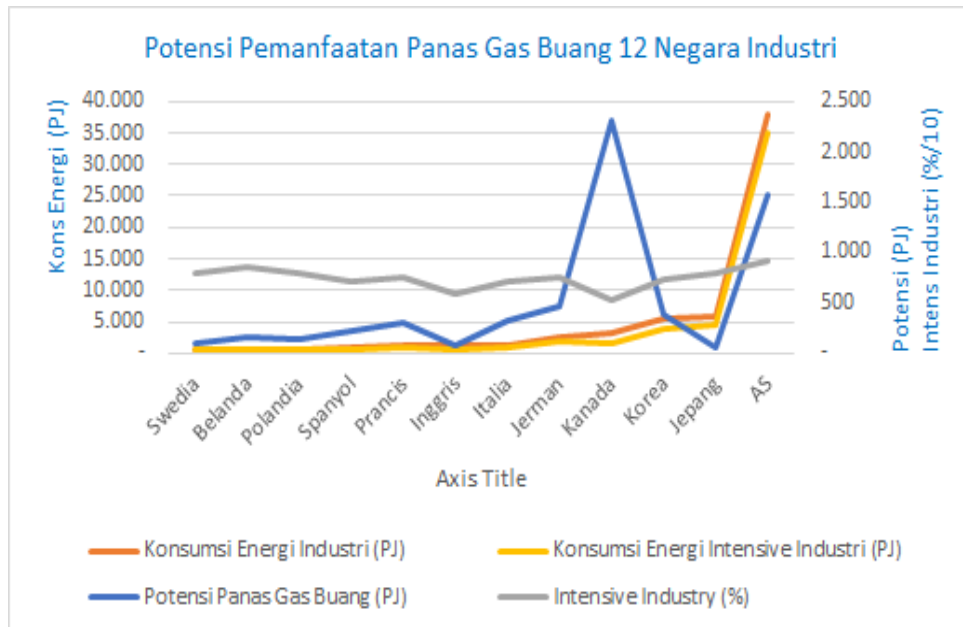
Steam Rankine Cycle (SRC) dan Organic Rankine Cycle (ORC) keduanya merupakan dua sistim yang mirip dalam hal merubah panas menjadi putaran mekanis, perbedaanya pada penggunaan jenis zat cair untuk dijadikan uap panas, SRC menggunakan air sedangkan ORC menggunakan hidrocarbon.

### 2.3.2 Pengurangan Emisi GRK dengan konversi Energi Panas Gas Buang menjadi Energi Listrik

Listrik yang diproduksi dalam sistem diasumsikan untuk menggantikan listrik dari sumber lain dan dengan demikian peningkatan produksi listrik akan menghasilkan emisi GRK yang lebih rendah (Broberg Viklund and Karlsson, 2015), artinya listrik yang dihasilkan dengan faktor emisi lebih rendah mensubsitusi pemakaian listrik publik dengan faktor emisi lebih tinggi dan penerapan teknologi limbah panas ke listrik (WHP) dapat meningkatkan efisiensi energi dan mengurangi emisi CO<sub>2</sub> (Olumayegun and Wang, 2019)

Industri sebagai pemakai energi fossil terbesar di dunia, dan nomor dua terbesar di Indonesia, sangat berpotensi menghasilkan energi listrik sendiri dengan memanfaatkan panas gas buang dan rugi-rugi panas lainnya

Penelitian pada 12 negara industri dalam kelompok EU, memetakan potensi konversi panas gas buang menjadi energi ditunjukkan pada gambar 2-4 (Miró, Brückner and Cabeza, 2015)



Gambar 2-4. Potensi Gas Buang 12 Negara Industri (Miró, Brückner and Cabeza, 2015)

Dari grafik pada gambar 2-4, tidak ada korelasi antara potensi pemanfaatan gas buang dengan jenis industri. Hal ini memberikan indikasi, semua jenis industri yang memiliki panas gas buang bisa dimanfaatkan, tidak terbatas hanya pada intensive industri (metal industry, chemical industry, food and drinks, pulp and paper and non-metal minerals including cement, glass, ceramic and lime), tetapi termasuk juga untuk non intensive industri (mining and quarrying, food and tobacco, textile and leather, transport equipment, machinery, wood and wood products, construction and non-specified industry)

Assessment beberapa suhu gas buang sektor industri, teknologi konversi dan biaya investasi per-kW listrik, ditunjukkan pada Tabel 2-6.

Tabel 2-6. Konversi gas buang menjadi listrik beberapa sektor industri (Amiri and Vaseghi, 2015)

INDUSTRI	TEMPERATUR	PROSES	TEKNOLOGI	EFISIENSI	COST RANGE
	( °C)			(%)	(\$/kW)
Kaca	230 - 480	Melting	SRC	20 - 43	600 - 1250
			ORC	8 - 12	2500 - 3500
			TEG	5	5000
			KC	15	2000 - 3000
Aluminium	790 - 1080	2nd Melting	SRC	20 - 43	600 - 1250
Baja	540 - 680	Roll Mill	SC-CO2-PC	13 - 17	2000 - 2300
Semen	760 - 980	Oxidizer	SC-CO2-PC	13 - 17	2000 - 2300
Kertas	82 - 140	Drier	ORC	8 - 12	2500 - 3500
Makanan	150 - 350	Boiler	ORC	8 - 12	2500 - 3500
Kimia	150 - 260	Preheater	ORC	8 - 12	2500 - 3500
SRC (Steam Rankine Cycle), ORC (Organic Rankine Cycle), KC (Kalina Cycle)					
(SC-CO2C) Super Critical CO2 Cycle, TEG (Thermo Electric Generator)					

Oleh Campana et al tahun 2013, secara khusus melakukan penelitian potensi aplikasi ORC untuk konversi panas gas buang menjadi energi listrik dari 4 sektor intensive industri di beberapa negara dalam EU 27, ditunjukkan dalam Tabel 2-7.

Tabel 2-7. Aplikasi ORC pada 4 sektor di beberapa negara EU27 (Campana et al., 2013)

INDUSTRI		KACA	SEMEN	BAJA	OIL&GAS
Proses		Melting	Clinker	EAF+Roll Mill	GCS dan GSF
Jumlah		58	241	399	
Kapasitas (Mt/y)		12	247	217	
ORC Power (MW)		79	574	748	
E Recovery (GWh/y)	5000h	383	2.870	3.740	6.520
	8000h	628	4.592	5.984	10.432
Emisi (10 <sup>3</sup> t CO <sub>2</sub> /y)	5000h	140	1.212	1.351	2.328
	8000h	225	1.940	2.162	3.724
Cost Saving (eu/y)	5000h	35	260	344	583
	8000h	56	416	550	933
Power Spesifik (rp)		2,7 kW/t/d	1,01kW/t/d	6,87kW/t/h	0,30

Dari Tabel 2-7, potensi energi listrik yang terbesar dihasilkan oleh Gas Compressor Station (GSC) dan Gas Storage Station (GSC) , walaupun tidak disebutkan kapasitas ORC Power yang digunakan. Power spesifik yang tertinggi

pada industri baja, artinya baja merupakan pemakai energi yang terbesar diantara 4 jenis industri tersebut, diikuti kaca lembaran dan semen. Penelitian ini juga menghitung potensi pengurangan emisi GRK dengan menggunakan listrik hasil konversi gas buang, walaupun tidak secara spesifik disebutkan metode penghitungannya.

Pengurangan emisi dengan pemanfaatan panas gas buang menjadi energi listrik, sudah dilakukan oleh beberapa industri semen di Indonesia. Pabrik Indarung V Semen Padang, memanfaatkan panas gas buang sebagai sumber tenaga listrik sebesar 8,4 MW. Generator tersebut telah beroperasi secara komersial sejak 2014 dan memberikan penghematan biaya operasional sebesar Rp33 miliar sekaligus mengurangi emisi GRK sebesar 43 ribu ton per tahun. Teknologi serupa juga telah diterapkan di Pabrik Tuban dengan kapasitas sampai 28,5 MW dan mengurangi emisi GRK sebesar 130 ribu ton per tahun.

### **2.3.3 Proses Produksi Industri Kaca Lembaran PT.XYZ**

PT.XYZ didirikan 07 Oktober 1971 dan mulai operasi secara komersial pada bulan April 1973 dengan proses Foucault, yaitu kaca cair (molten glass) kaca dibentuk yang keluar dari tungku ditarik secara vertikal melalui celah sampan refraktori (debitense). Tahun 1981 perusahaan mendirikan pabrik pertama (dalam tesis ini disebut Pabrik-1 dengan proses proses floating, dimana kaca cair yang keluar dari tungku ditarik diatas timah cair. Float ke dua (Pabrik-4) tahun 1985, float ke tiga (Pabrik-2) tahun 1993 dan float ke empat (Pabrik-5) tahun 1996. Secara bertahap, Pabrik-1 dan Pabrik-2 direlokasi dari Kawasan Industri Ancol ke Kawasan Industri di Cikampek bertahap mulai tahun 2017 dan 2019, dalam tesis ini selanjutnya disebut Pabrik-3A dan 3B seperti pada gambar 2-5



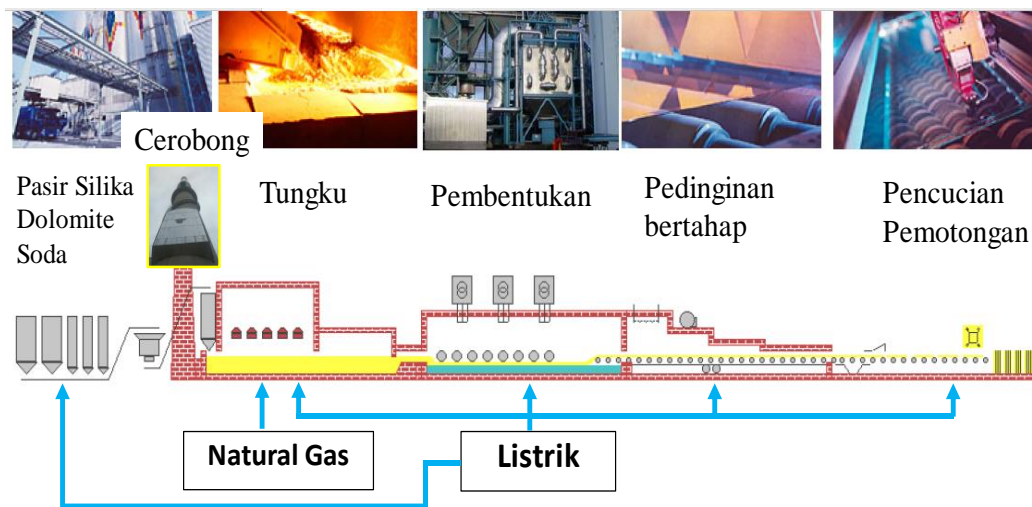
Gambar 2-5. Gambar tampak atas Industri Kaca Lembaran Pabrik-3A, 3B (Sumber : Industri Kaca Lembaran PT.XYZ)

Proses produksi kaca lembaran dimulai dengan persiapan bahan baku pasir silika, dolomit, cullet dan bahan baku pendukung lainnya yang dicampur (mixing) menjadi satu bahan baku (mixed batch), selanjutnya dimasukkan secara bertahap kedalam tungku berkapasitas 500-700 Ton per hari dengan suhu  $1500^{\circ}\text{C}$ , dan beroperasi selama 24 jam, 365 hari, 15 tahun terus menerus

Dalam proses produksi, penggunaan energi paling besar adalah natural gas (NG) dalam peleburan bahan baku dan energi listrik dalam proses pembentukan, pendinginan dan pemotongan. Gambar 2-6 menunjukkan diagram proses produksi kaca lembaran, penggunaan energi dan gas buang yang dihasilkan

Bahan baku yang sudah dilebur (molten glass) dialirkan di atas timah dengan suhu  $600 - 800^{\circ}\text{C}$  untuk pembentukan ketebalan dan dimensi, dan secara bertahap didinginkan (annealing) dengan blower. Proses akhir adalah pencucian, pemotongan (washing & cutting).

Dalam proses produksi, emisi GRK akan timbul saat proses peleburan sebagai emisi langsung dan penggunaan listrik dalam proses pembentukan, pendinginan dan pemotongan sebagai emisi tidak langsung



Gambar 2-6. Diagram proses produksi kaca lembaran, penggunaan energi dan gas buang yang dihasilkan (Sector and Division, 2010)

## 2.4 Pasar Karbon

Pasar karbon adalah perdagangan hak atas emisi GRK dalam satuan setara-ton-CO<sub>2</sub>, dapat berupa hak untuk melepaskan hak atas penurunan emisi. Dalam Protokol Kyoto, jenis gas rumah kaca yang dapat diperdagangkan meliputi karbon dioksida (CO<sub>2</sub>), metana (CH<sub>4</sub>), nitrat oksida (N<sub>2</sub>O), hidrofluorokarbon (HFCs), perfluorokarbon (PFCs), dan sulfur heksafluorida (SF<sub>6</sub>). Dari ke enam gas-gas tersebut, CO<sub>2</sub> mempunyai potensi terendah penyebab pemanasan global, sehingga menjadi acuan indeks pemanasan global yang disebut Global Warming Potential (GWP) seperti pada Tabel 2-8

Tabel 2-8. Jenis-jenis GRK utama dalam Protokol Kyoto dan Laporan IPCC ke-5 (Hindarto, Samyanugraha and Nathalia, 2018)

Jenis	Potensi Pemanasan Global Protokol Kyoto	Potensi Pemanasan Global Laporan IPCC ke-5
Karbon dioksida (CO <sub>2</sub> )	1	1
Metana (CH <sub>4</sub> )	21	28
Nitrat oksida (N <sub>2</sub> O)	310	265
Perfluorokarbon (PFCs)	6.500-9.200	6.630
Hidrofluorokarbon (HFCs)	140-11.700	138
Sulfur heksafluorida (SF <sub>6</sub> )	23.900	

Dari Tabel 2-8, 1 GWP sama dengan 1 tonCO<sub>2</sub>, 1 GWP gas CH<sub>4</sub> sama dengan 28 ton CO<sub>2</sub>, dan seterusnya.

Pasar Karbon terdapat dua bentuk yaitu sukarela dan wajib, sementara model atau cara berdagang dengan Kredit dan Trading (ETS=Emission Trading System), masing-masing dengan kekurangan dan kelebihan. CDM menganut sistim perdagangan trading dan bentuk wajib, mengikuti standard Protocol Kyoto yang kaku dan metode yang sulit diikuti, selain harga karbon kreditnya mahal.

VCS (Veryfied Carbon Standard) menganut sistim Kredit dan bentuk sukarela, pengembangan metodologi CDM dan lebih fleksibel.

JCM (Joint Credit Mechanism), berbasis Kredit dan sukarela tetapi dilakukan secara bilateral antar negara Jepang dengan negara mitra dagang emisinya, organisasinya terstruktur berdasarkan ISO 14065.

Skema Karbon Nusantara yang dibentuk oleh Dewan Nasional Perubahan Iklim (DNPI) dan tidak terikat kewajiban dengan Protocol Kyoto atau lembaga manapun, belakangan aktifitasnya berhenti sehubungan dengan dibubarkannya DNPI

## **BAB 3**

# **Metodologi Penelitian**

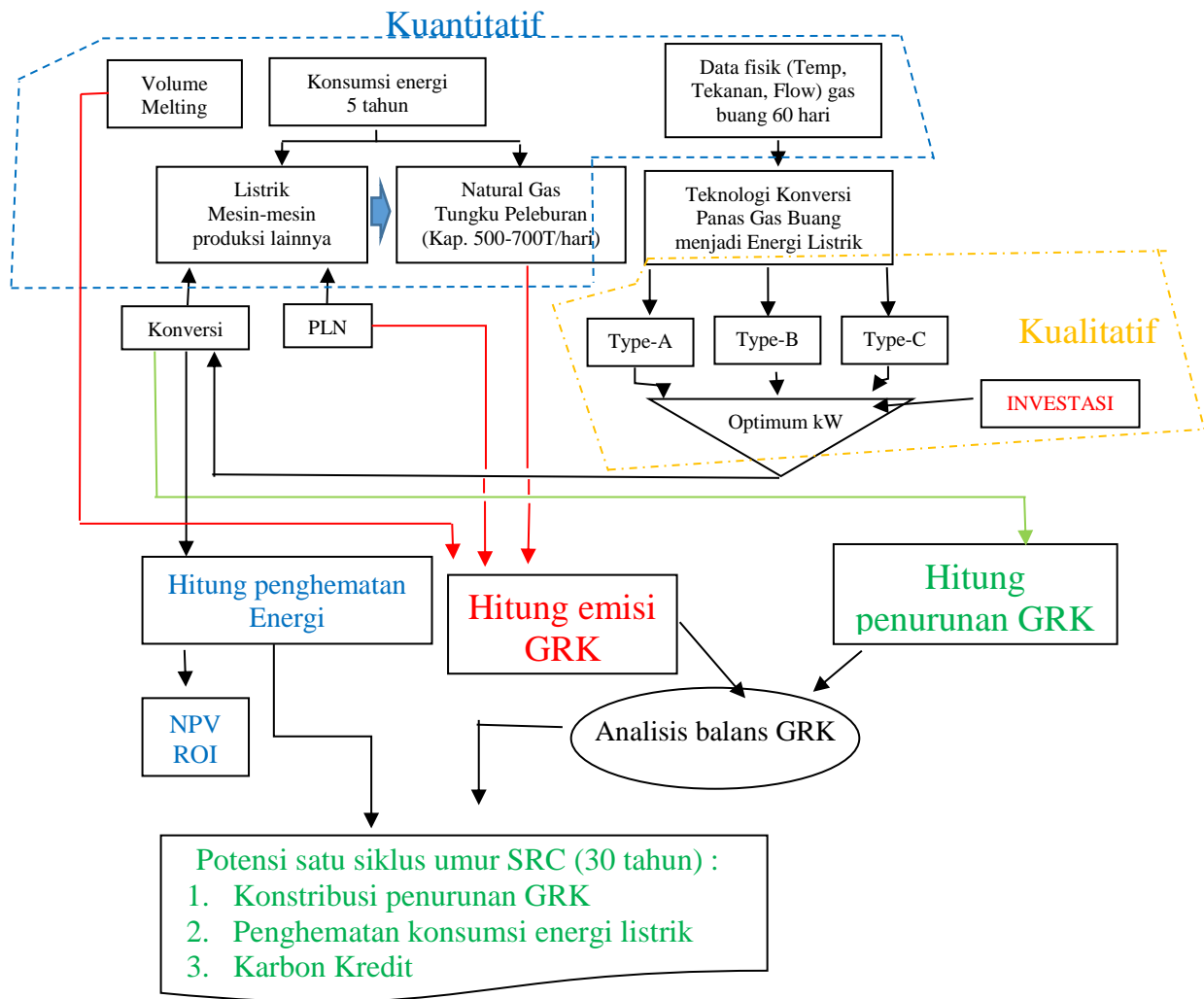
Metodologi penelitian memakai metode kualitatif dan kuantitatif. Kuantitatif dengan menggunakan data selama 2014 – 2018 dari 5 (lima) pabrik berbeda baik untuk data konsumsi energi, bahan baku, dan volume produksi. Data-data selama 5 tahun tersebut dirata-ratakan, selanjutnya dihitung emisi GRK dengan menggunakan metode IPPC 2006 untuk sektor energi dan IPPU.

Potensi pengurangan GRK menggunakan kombinasi kuantitatif dan kualitatif, dimana data fisik gas buang selama 60 hari dari salah satu pabrik digunakan sebagai acuan untuk menentukan kualitas fisik panas gas buang.

Dalam analisis, selain menggunakan data fisik/teknis penelitian juga akan menggunakan metode kualitatif, yaitu hitung stoikiometri kimia gas buang untuk memperoleh data persentase oksigen dalam gas buang sebagai dasar perhitungan masas gas buang yang dihasilkan

Data kuantitatif juga dilakukan dengan studi literatur beberapa penelitian sebelumnya mengenai teknologi konversi panas gas buang menjadi energi listrik, untuk menghasilkan konversi dengan efisiensi lebih baik. Listrik dari hasil konversi gas buang digunakan dalam proses produksi dan dihitung sebagai pengurang GRK, peluang kredit karbon dan penghematan dari pengurangan pembelian listrik PLN, Gambar 3-1 Menunjukkan tahapan kajian dan penelitian

Potensi pengurangan GRK menggunakan kombinasi kuantitatif dan kualitatif, dimana data fisik gas buang selama 60 hari dari salah satu pabrik (Pabrik-2) digunakan sebagai acuan untuk menentukan kualitas fisik panas gas buang.



Gambar 3-1 Tahapan kajian dan penelitian

### 3.1 Pengumpulan Data

Sumber data sekunder yang diperoleh dari perusahaan industri kaca lembaran XYZ, dimana penulis masih bekerja sampai dengan tesis ini ditulis, data yang digunakan adalah dalam 5 (lima) tahun terakhir, yaitu 2014 - 2018, baik untuk data konsumsi natural gas (NG), listrik dan volume kaca total yang dihasilkan (= pull) dari 5 (lima) pabrik yang berbeda, yaitu pabrik-1 sampai 5. Data fisika dan kimia gas buang masing-masing menggunakan sumber data dari Distributed Control System (DCS) dalam 60 hari dan laboratorium (on site sampling)

Data konsumsi energi listrik, natural gas dan pull ditunjukkan masing-masing pada Tabel 3-1, 3-2 dan 3-3.

Tabel 3-1. Konsumsi Energi Listrik tahun 2014 – 2018 (Sumber : Industri Kaca Lembaran PT.XYZ)

URAIAN	UNIT	2014	2015	2016	2017	2018
Pabrik 1	MWH	20.244	18.677	20.947	23.118	25.162
Pabrik 2	MWH	22.801	22.042	16.995		
Pabrik 3	MWH				29.336	30.850
Pabrik 4	MWH	24.064	23.023	24.295	19.178	18.088
Pabrik 5	MWH	21.865	21.009	20.292	22.628	22.469
<b>Konsumsi L-PLN rata2</b>	MWH	<b>22.244</b>	<b>21.188</b>	<b>20.632</b>	<b>23.565</b>	<b>24.142</b>
<b>Konsumsi L-PLN akumulasi</b>	MWH	<b>22.244</b>	<b>43.431</b>	<b>64.063</b>	<b>87.628</b>	<b>111.771</b>

Table 3-2. Konsumsi Natural Gas (NG) dan Minyak Residu (MR) tahun 2014-2018. (Sumber : Industri Kaca Lembaran PT.XYZ)

URAIAN	UNIT	2014	2015	2016	2017	2018	
Pabrik 1	Natural Gas	TJ	1.064	1.084	992	1.193	1.179
	Minyak Residu	TJ	-	4	181	-	24
Pabrik 2	Natural Gas	TJ	1.183	1.189	518	stop	stop
	Minyak Residu	TJ	-	5	500	-	-
Pabrik 3	Natural Gas	TJ	-	-	start	1.440	1.371
	Minyak Residu	TJ	-	-	-	-	-
Pabrik 4	Natural Gas	TJ	1.138	1.155	1.123	1.128	1.141
	Minyak Residu	TJ	-	3	31	76	71
Pabrik 5	Natural Gas	TJ	1.217	1.211	1.126	1.118	1.175
	Minyak Residu	TJ	-	8	114	55	2

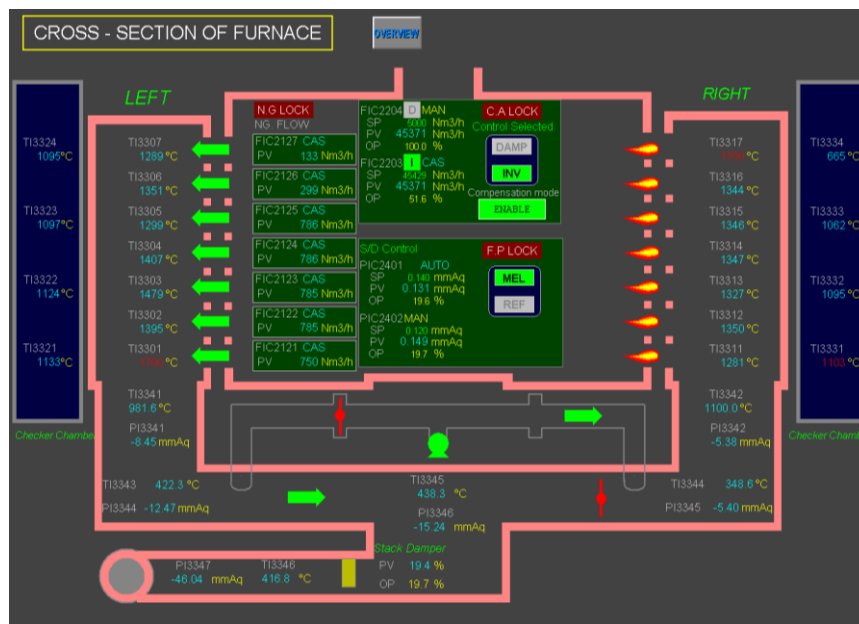
Perhitungan emisi GRK dari pemakaian energi akan dihitung berdasarkan data pada Tabel 3-1, 3-2 dengan menggunakan persamaan 2-1 dan Tabel 2-1 dan 2-2 masing-masing untuk koefisien emisi natural gas dan listrik

Table 3-3. Pull 2014 – 2018 (Sumber : Industri Kaca Lembaran PT.XYZ)

URAIAN		UNIT	2014	2015	2016	2017	2018
Pabrik 1	Melting Volume (Pull)	Ton	135.988	131.938	138.799	149.269	146.372
	Cullet Ratio	%	37%	46%	36%	25%	27%
Pabrik 2	Melting Volume (Pull)	Ton	152.116	158.607	122.409	-	-
	Cullet Ratio	%	36%	35%	40%	-	-
Pabrik 3	Melting Volume (Pull)	Ton	-	-	-	202.316	206.017
	Cullet Ratio	%	-	-	-	33%	35%
Pabrik 4	Melting Volume (Pull)	Ton	159.518	164.184	160.935	175.369	174.936
	Cullet Ratio	%	36%	32%	43%	40%	47%
Pabrik 5	Melting Volume (Pull)	Ton	164.458	155.442	162.895	166.597	158.577
	Cullet Ratio	%	32%	32%	39%	43%	36%

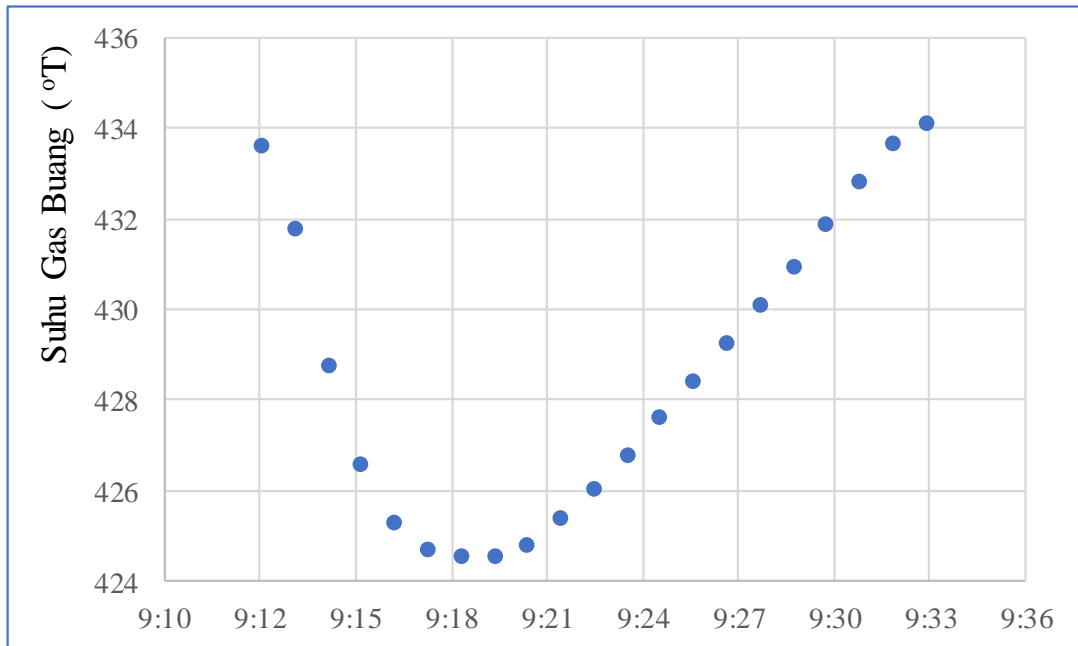
Perhitungan emisi GRK dari kalsinasi bahan baku, menggunakan data pull pada Tabel 3-3, artinya emisi akan timbul untuk setiap hasil proses peleburan, tidak terbatas hanya pada jumlah produksi yang bisa digunakan/dijual. Dengan menggunakan persamaan 2-2, dan faktor emisi adalah 0,21 (Hanle *et al.*, 2006) akan diperoleh emisi GRK dari proses kalsinasi.

Foto layar DCS (Distributed Control System) proses pembakaran, data Fisika dan Kimia Gas Buang ditunjukkan masing-masing pada Gambar 3-2, 3-3 dan Tabel 3-4



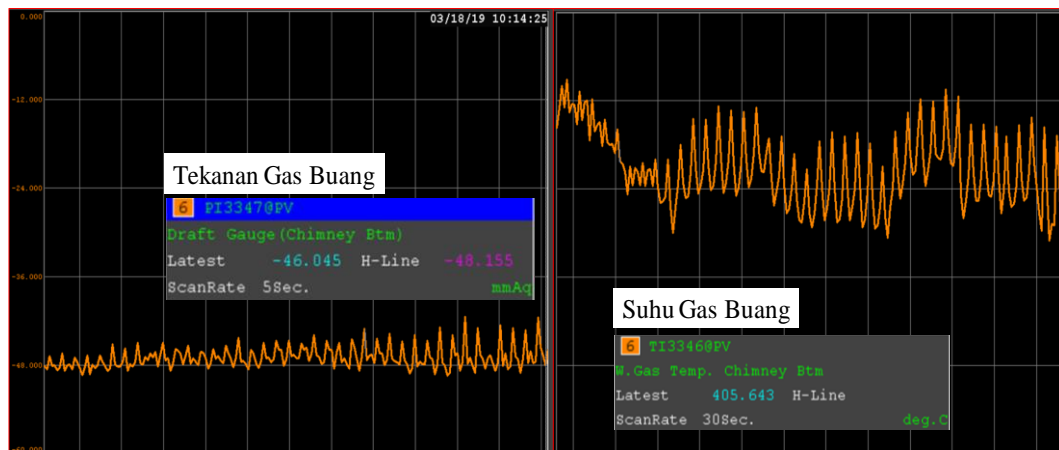
Gambar 3-2. Diagram alir (foto layar DCS) pembakaran (Sumber : Industri Kaca Lembaran PT.XYZ)

Dari gambar 3-2 sedang berlangsung pembakaran dari arah kanan dan bergantian setiap 20 menit. Selama proses pembakaran, natural gas dicampur dengan udara tambahan dari sumber udara buatan (kipas) dengan perbandingan tertentu (volume udara > natural gas) untuk menghasilkan kualitas pembakaran yang baik, dan hal ini menyebabkan timbul eksese udara yang seperti pada Tabel 2-1, semakin besar volume eksese udara, maka pembakaran semakin tidak efisien.



Gambar 3-3. Data suhu gas buang dari cerobong asap 1 siklus bakar (Sumber : Industri Kaca Lembaran PT.XYZ)

Gambar 3-3 adalah data suhu gas buang yang diperoleh dari proses sistem informasi (PI system) dalam satu siklus bakar, dan gambar 3-4 dari foto layar monitor (screen shoot) DCS. Dari kedua gambar tersebut, range suhu dari 398 – 420°C, tekanan -43 ~ -49 mmAq (vakum) dan ini akan dikontrol stabil oleh DCS.



Gambar 3-4. Grafik fisika gas buang (suhu dan tekanan) dari cerobong asap selama 60 hari (Sumber : Industri Kaca Lembaran PT.XYZ)

Table 3-4. Komposisi Kimia Gas Buang  
(Sumber : Industri Kaca Lembaran PT.XYZ)

No.	Parameter	Satuan	Hasil
1	Amonia (NH <sub>3</sub> )	mg/m <sup>3</sup>	0,2
2	Klorin (Cl <sub>2</sub> )	mg/m <sup>3</sup>	<0.05
3	Hidrogen Klorida (HCl)	mg/m <sup>3</sup>	0,8
4	Hidrogen Fluorida (HF)	mg/m <sup>3</sup>	0,4
5	Nitrogen Oksida (NO <sub>2</sub> )	mg/m <sup>3</sup>	29
6	Partikel	mg/m <sup>3</sup>	11
7	Sulfur dioksida (SO <sub>2</sub> )	mg/m <sup>3</sup>	<1
8	Total reduced sulphur (sebagai H <sub>2</sub> S)	mg/m <sup>3</sup>	5
9	Merkuri (Hg)	mg/m <sup>3</sup>	0,02
10	Arsen (As)	mg/m <sup>3</sup>	<0.01
11	Antimon (Sb)	mg/m <sup>3</sup>	<0.04
12	Kadmium (Cd)	mg/m <sup>3</sup>	<0.02
13	Seng (Zn)	mg/m <sup>3</sup>	0,05
14	Timbal (Pb)	mg/m <sup>3</sup>	0,04
15	Oksigen (O <sub>2</sub> )	%	19,3

Berdasarkan uraian teoritis pada sub bab 2.3.1, data fisik dan kimia gas buang masing-masing pada Gambar 3-3 dan Tabel 3-4 dapat dihitung massa gas buang, selanjutnya dengan memasukkan hasil perhitungan massa kedalam persamaan 2-5, akan diperoleh besar kalor gas buang per satuan waktu.

### 3.2 Perhitungan Panas Gas Buang

Persamaan 2-5 digunakan untuk menghitung besar energi panas yang bisa dihasilkan. Karena panas yang dihitung adalah sisa panas dari pembakaran natural gas, maka harus diperoleh massa total dalam bentuk gas yang mengandung unsur C, H, O<sub>2</sub> dan N<sub>2</sub> dengan mengikuti reaksi kimia pembakaran pada persamaan 2-9, yaitu persamaan dengan eksese udara

Menggunakan persamaan 2-8, 2-9, dan 2-10 dengan laju konsumsi natural gas sebesar 3.880 NM<sup>3</sup>/jam, dan diketahui massa masing-masing unsur dalam natural gas (dianggap gas metan CH<sub>4</sub>), diperoleh perhitungan massa molekul gas buang pada Tabel 3-5

Tabel 3-5. Massa molekul gas buang dalam 1NM<sup>3</sup> Natural Gas

Komposisi	Massa (kg)	%	Cp (kcal/kg)	Unit
CO <sub>2</sub>	2,219	10,8	0,2007	kcal/kg
H <sub>2</sub> O	1,762	8,57	0,4800	kcal/kg
N <sub>2</sub>	15	72,99	0,2482	kcal/kg
O <sub>2</sub>	1,399	6,81	0,2197	kcal/kg
Lain <sup>2</sup>	0,169	0,82	0,2300	kcal/kg
<b>Total</b>	<b>20,55</b>	<b>100</b>	<b>0,2619</b>	<b>kcal.kg</b>

Dari tabel 3-5, nilai massa total 20,55kg, panas jenis 0,2619(kcal/kg), suhu keluaran gas buang 475°C (*T<sub>in</sub>*) sebagai suhu masuk evaporator, dan suhu keluaran

evaporator 120°C ( $T_{out}$ ) dimasukkan dalam persamaan 2-5 maka akan diperoleh besar energi panas gas buang seperti pada gambar 3-5

Konversi NG :				
Massa Jenis $\rho$ NG			0,74016	
1NM3	a	M3	1,0989	
	b	MJ	37	
	c	TJ	0,000037	
	d	kg	0,813361824	
1 kCalH	e	kWH	0,001163	
Uraian	Kode	Unit	Hitung	Keterangan
Kandungan O2 dalam udara pembakaran	A	%	6,40	Pengukuran
Kandungan O2 Maksimum	B	%	21,00	O2 : N2 = 21 : 79
Ekses Udara dalam udara pembakaran	C	%	43,84	100 * A/(B-A) (= Persamaan 2-8)
Stoikiometri A/F (Air to Fuel Ratio)	S		9,52	ideal = 9,52
Volume udara dg ekses C	D	M3	15,05	s * a *(100 + C)/100 (= Persamaan 2-10)
Massa gas buang dengan % volume udara pembakaran D	E	kg	20,55	Persamaan 2-9
Panas Jenis gas buang ( $C_p$ ) dengan massa E	F		0,2689	
Konsumsi NG per-Jam	H	NM3/H	3.880	Flowmeter
Total Mass gas yg jadi panas	I	kg	79.734	E * H
Temperatur gas buang	J	degC	475	$T_{in}$
Temperatur output evaporator	J	degC	140	$T_{out}$
<b>Total Gas Buang jadi energi panas</b>	L	Mcal.H	<b>7.183</b>	$[Q = m \times C_p \times (T_{in} - T_{out})]$
		kWH	<b>8.353</b>	
		kWH/NM3	<b>2,153</b>	
		kWH/TJ	<b>58.186,928</b>	

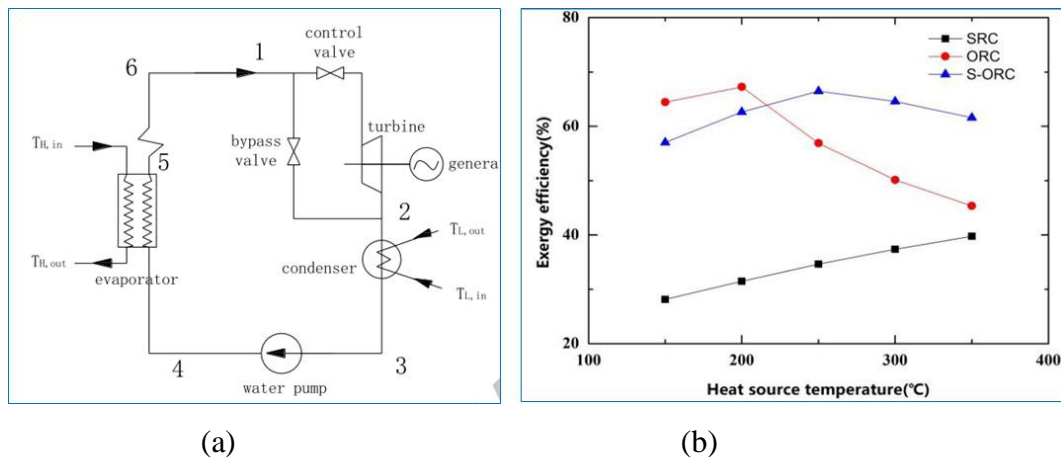
Gambar 3-5. Perhitungan energi panas dari konsumsi Natural Gas dalam satu jam

Dari gambar 3-5, energi panas yang dihasilkan dalam bentuk uap adalah 8.353kWh atau setara dengan 58.185.928kWh/TJ natural gas

### 3.3 Teknologi dan ke Ekonomian Konversi Panas ke Energi Listrik

Sistim konversi panas menjadi listrik (Waste Heat to Power/WHP) diklasifikasikan dalam siklus daya mekanis (berbasis Rankine), konversi daya langsung (turbo-compounding) dan yang lebih maju misalnya TEG (Thermoelectric Generator), Steam Rankine Cycle (SRC) dan Organic Rankine Cycle (ORC)

Prinsip dasar dan proses sistem ORC dan sistem SRC tradisional sama, perbedaannya terletak pada sistem ORC yang bekerja pada suhu rendah sumber panas sampai menengah dengan media organik sementara SRC menggunakan media cairan air pada suhu menengah sampai tinggi . Gambar 3-6 menunjukkan siklus dan grafik efisiensi eksergi (exergy efficiency) SRC / ORC.



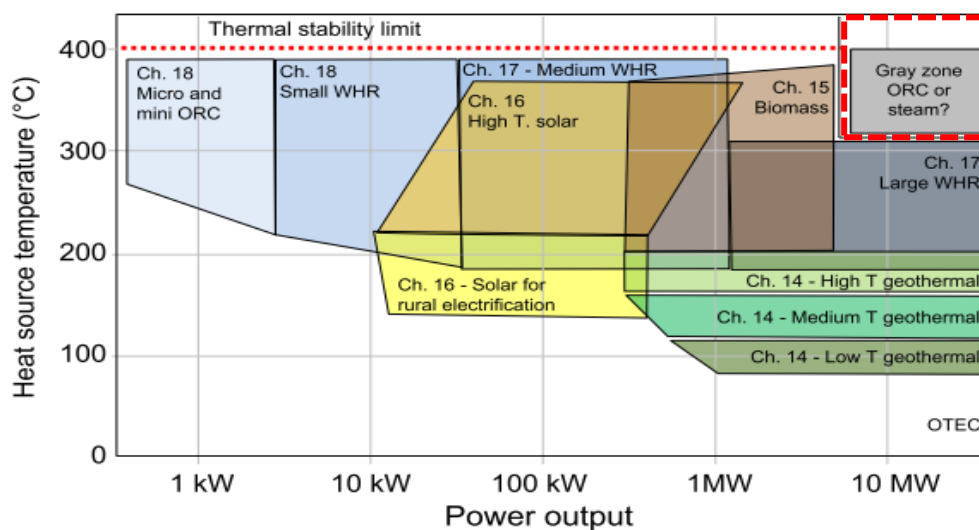
Gambar 3-6. SRC atau ORC. (a) Siklus, (b) Efisiensi exergy (Oak Ridge National Laboratory, 2015)

Dari gambar 3-6 (a), Proses 1 sampai 2 merupakan proses ekspansi adiabatik, suhu dan tekanan tinggi menggerakkan turbin untuk menghasilkan energi mekanis yang dikopel dengan generator dalam menghasilkan listrik. Proses 2 sampai 3 adalah proses isobarik eksotermik, dimana uap yang keluar dari turbin melepaskan panas pada proses mendinginan (kondensasi) di kondensor, pada

tekanan dan suhu konstan. Proses 3 sampai 4 merupakan proses kompresi adiabatik, dimana cairan hasil kondensasi di pompa kembali kedalam evaporator.. Siklus 4 - 1 mewakili proses endotermik isobarik dimana cairan dingin (4) masuk ke evaporator dan terjadi pertukaran panas pada tekanan konstan. Cairan kerja mengalami tiga tahap: pemanasan, penguapan, panas berlebih (over heat), dan proses penyerapan panas pada tekanan konstan. (Oak Ridge National Laboratory, 2015)

Pengembangan dari Siklus Rankine konvensional adalah Siklus Rankine Supercritical (SCRC), di mana penambahan panas terjadi pada tekanan superkritis, karena dilakukan 2 tahap siklus. (Zhang *et al.*, 2016)

Pada gambar 3-6 (b), menunjukkan efisiensi eksergi ORC akan turun diatas suhu 200°C, efisiensi eksergi SRC cenderung naik linear, dan efisiensi eksergi SORC mulai turun diatas 350°C



Gambar 3-7. Grafik keluaran (Output) Daya Listrik (kW) dengan suhu sumber panas (Macchi, 2016)

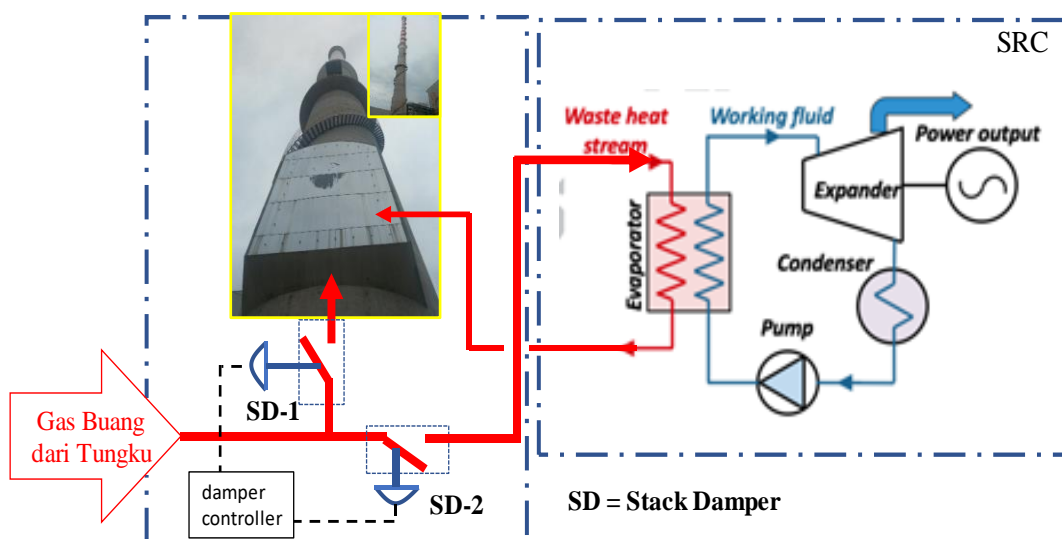
Penelitian teknologi konversi panas menjadi energi listrik sudah banyak dilakukan, dan secara teknis menggunakan parameter suhu sumber panas sebagai acuan utama, selain efisiensi dan biaya investasi

Tabel 3-6. Teknologi konversi panas menjadi daya listrik (Amiri and Vaseghi, 2015)(Thekdi and Nimbalkar, 2015)

TEKNOLOGI	TEMPERATUR	LIQUID	KARAKTERISTIK LIQUID	EFISIENSI	COST
	(C)			(%)	(\$/kW)
ORC	50 - 300	R32 - Toluene	Mudah terbakar, Tidak stabil pada temperatur tinggi Lebih mahal	8 - 12	2500 - 3500
SRC	300 - 1000	Air	Harus ada chemical treatment Korosif Murah	20 - 43	600 - 1250
KC	90 - 430	Air + Amoniak	Korosif Mahal	15 - 20	2000 - 3000
SC-CO <sub>2</sub> -PC	200 - 600	CO <sub>2</sub>	Korosif Stabil Tidak beracun	13 - 17	2000 - 2500
SRC (Steam Rankine Cycle), ORC (Organic Rankine Cycle), KC (Kalina Cycle)					
(SC-CO <sub>2</sub> C) Super Critical CO <sub>2</sub> Cycle					

Dari Gambar 3-6 (b), 3-7 dan Tabel 3-6, SRC lebih layak dari sisi teknis, efisiensi, keamanan dan biaya investasi dibandingkan dengan teknologi lainnya karena sumber panas yang digunakan dalam penelitian ini antara 398 – 416°C seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3-3 sebelumnya

Gas buang yang diumpankan kedalam evaporator SRC diambil dari keluaran tungku sebelum dibuang melalui cerobong, melalui mekanisme pengatur aliran yang disebut Stack Damper, diagram ditunjukkan pada gambar 3-8.



Gambar 3-8. Mekanisme aliran panas gas buang kedalam SRC

Secara umum, sistem berbasis uap terdiri dari boiler, turbin uap, gearbox, generator listrik, kondensor, kondensat, sistem pelumasan dan pendinginan, sistem pengolahan air, peralatan dan sistem pengaturan. Total biaya pemasangan, yang meliputi desain, teknik, konstruksi, dan commissioning, dapat sangat bervariasi tergantung pada ruang lingkup peralatan pabrik, negara, area geografis di suatu negara, kondisi pasar kompetitif, persyaratan lokasi khusus, dan ketersediaan tenaga kerja terlatih dan tarif tenaga kerja yang berlaku..(Installations and Potential, no date), umur kerja (lifetime) Boiler, Turbin, transformer dan peralatan pendukung lainnya adalah 25 – 30 tahun (Unfccc, no date)(Desai and Bandyopadhyay, 2016)

Di wilayah Asia, biaya investasi gas buang menjadi energi listrik dengan SRC per-kW adalah \$1600 – \$2200/kW, wilayah Eropa \$2000 - \$3000/kW (Installations and Potential, no date) dan wilayah USA \$1800 - \$2000/kW ((Oak Ridge National Laboratory, 2015). PT.Semen Indarung Rp44.352.981/kW dengan kapasitas 8,5MW, di PT.Semen Tuban Rp52.912.281/kW dengan kapasitas 28,5MW yang masing-masing sudah beroperasi sejak 2013 dan 2017 (Semen and Persero, 2015). Dengan nilai tukar Rp14.300/USD maka dari ke-empat data diatas, rata-rata investasi adalah Rp40.000,000/kW. Jika menggunakan suku bunga diatas SUN (SUN = 7 %, July 2019), misalnya 8% maka NPV positif pada tahun ke-23 sehingga tidak layak karena umur pakai SRC ditargetkan 30 tahun.

Dengan alasan tersebut diatas, perhitungan investasi menggunakan data NAICS (North American Industry Classification System) 327 (Oak Ridge National Laboratory, 2015) yaitu untuk kategori industri mineral non metal (termasuk kaca), investasi adalah \$1800/kW (ditambah faktor aman nilai tukar mata uang rupiah 10%) sementara biaya O & M adalah 3% dari investasi (Installations and Potential, no date)

Selain perhitungan keekonomian dari energi listrik hasil konversi (WHP) juga ada potensi pendapatan dari perdagangan karbon penurunan emisi GRK, sehingga perhitungan keekonomian dibagi dalam tiga bagian sebagai berikut :

- 3.3.1 Perhitungan NPV (Net Present Value) disimulasikan pada 3 kondisi bunga pinjaman, BEP, dan penghematan biaya yang diperoleh dari penggunaan listrik hasil konversi jika investasi dilakukan sendiri oleh

PT.XYZ. Dalam perhitungan NPV, biaya produksi listrik menggunakan 80% dari BPP-Jawa Barat atau Rp.729/kWH dan ini hampir mendekati dengan data literatur untuk kapasitas \$2 – 2,5MW yaitu sekitar USD50/MWH atau Rp.715/kWH. Perhitungan lengkap NPV untuk 3 kondisi bunga pinjaman tertera pada Lampiran-1

3.3.2 Penghematan biaya penggunaan listrik hasil konversi jika investasi dilakukan langsung oleh perusahaan WHP, ditunjukkan pada gambar 3-9. Dalam kondisi ini, PT.XYZ membeli listrik dengan harga BPP-Jawa Barat, yaitu Rp.911/kWH, penghematan yang dihasilkan adalah Rp.151.615.179.186 dalam 30 tahun

Listrik yg disupply oleh WHP	B	$C*335*24$	16.790.164	Kap. WHP*335D*24H (30 hari untuk perawatan)
Kapasitas WHP	C		2.088	kW (eff. SRC = 25%)
Umur Pakai SRC	D		30	Tahun
Tarif PLN I3 Silver	E		1.212	Rp/kWH (termasuk pajak)
BPP-JB (Tari Listrik WHP)	F		911	Rp/kWH
Selisih Tarif Listrik PLN-WHP	G	$E - F$	301	Rp/kWH
Penghematan	H	$B*G$	5.053.839.306	Rp/Tahun
	I	$D*H$	151.615.179.186	Rp/30 Tahun

Gambar 3-9. Penghematan biaya listrik, investasi oleh perusahaan WHP

3.3.3 Potensi pendapatan lainnya dari perdagangan karbon senilai \$30/tonCO<sub>2</sub>. (<https://beyond-ratings.com/publications/carbon-price-landscape-2019>) jika penurunan emisi GRK dari listrik hasil konversi diperdagangkan, ditunjukkan pada gambar 3-10.

Nilai Tukar Rupiah	A		14.300	Rp/USD
Penurunan Emisi Rata-Rata	B		12.515	tonCO2/Tahun
Harga Kredit Karbon	C		429.000	Rp/ton CO <sub>2</sub> , 30 USD/tonCO <sub>2</sub>
	D	B*C	5.369.062.545	Rp/Tahun
	E		161.071.876.347	Rp/30 Tahun

Gambar 3-10. Potensi pendapatan dari perdagangan karbon

Potensi pendapatan dari perdagangan karbon adalah Rp.5.369.062.545 dalam satu tahun atau Rp.161.071.876.347 dalam 30 tahun usia pakai SRC

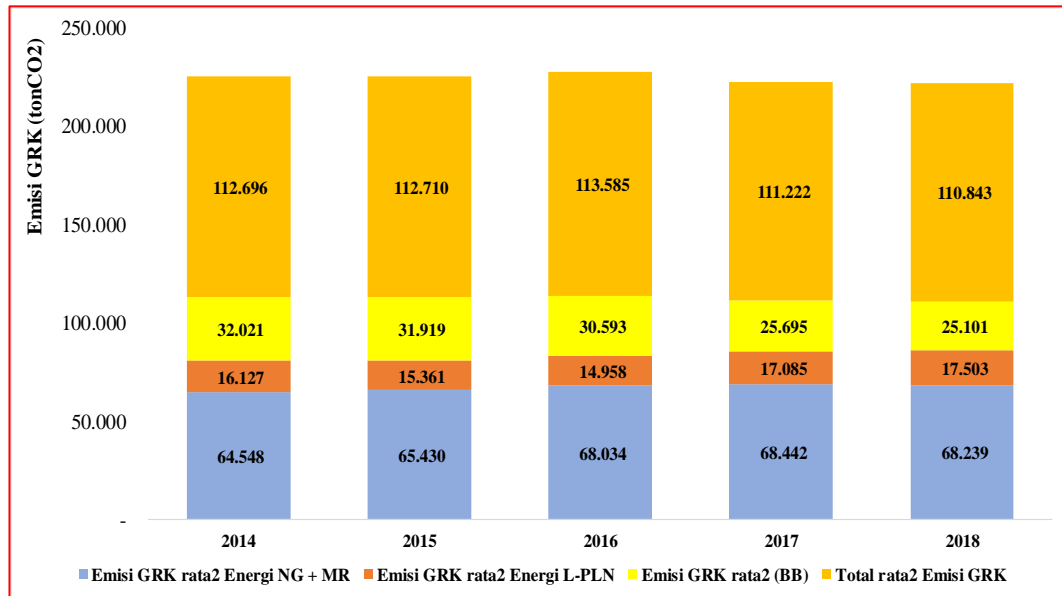
## **BAB 4**

# **Hasil dan Pembahasan**

Bab ini akan menyajikan hasil perhitungan dalam bentuk tabel dan grafik secara berurutan dengan basis data-data pada metodologi dan untuk setiap grafik akan dijelaskan pengertiannya dan analisisnya

1. Emisi GRK dari penggunaan energi dan proses produksi (IPPU), dan volume melting/pull tahun 2014 – 2018, pada gambar 4-1, 4-2
2. Emisi per volume melting/pull dalam tonCO<sub>2</sub>/ton pull, selanjutnya disebut efisiensi faktor kaca lembaran (EFkl) sebelum ada konversi, pada gambar 4-3
3. Potensi energi listrik yang dihasilkan dalam satu tahun dari konversi gas buang sebesar 8.353kW-H per NM<sup>3</sup> natural gas, pada gambar 4-4
4. Potensi pengurangan emisi per-tahun dari listrik hasil konversi pada gambar 4-5
5. Emisi final sebelum dan sesudah penggunaan listrik hasil konversi, pada gambar 4-6
6. Emisi per-ton pull (FEkl) sebelum dan setelah penggunaan listrik hasil konversi, pada gambar 4-7
7. Potensi kontribusi (dalam %) penurunan emisi oleh 4 pabrik PT.XYZ terhadap target emisi NDC tahun 2030, pada gambar 4-9
8. Keekonomian dan penghematan dari penggunaan energi hasil konversi dengan simple ROI, pada gambar 4-10

9. Potensi penghematan biaya energi listrik dan pendapatan dari kredit karbon, pada gambar 4-11

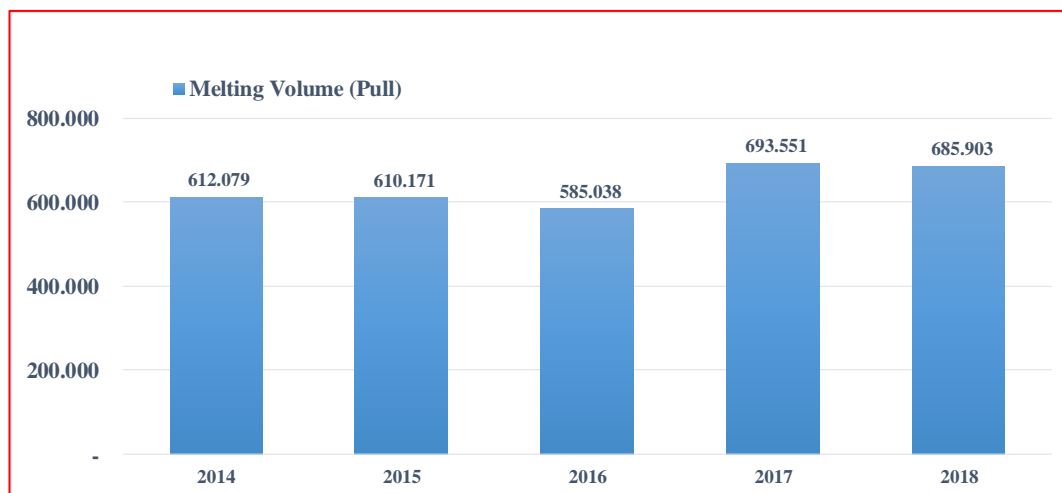


Gambar 4-1. Emisi GRK dari Energi dan Proses Peleburan

Dari gambar 4-1, rata-rata emisi tahun 2014 – 2018 dari 5 pabrik adalah 112.211 tonCO<sub>2</sub>, dan penyumbang emisi paling besar dari energi natural gas dan minyak residu 60%, diikuti oleh proses peleburan bahan baku 26% dan energi listrik sebesar 14%. Jika dibandingkan emisi dari energi listrik dengan natural gas dan minyak residu terhadap emisi total dari energi, persentasinya adalah 20% : 80%.

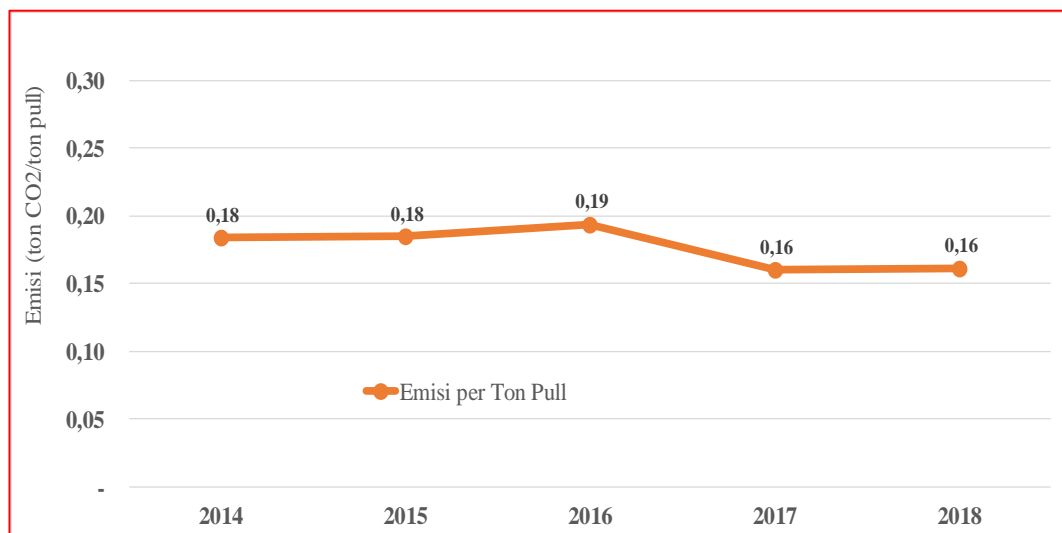
Dari sisi konsumsi energi, dalam satuan TJ, konsumsi natural gas sebesar 4.764TJ sementara konsumsi listrik hanya 80TJ atau konsumsi listrik hanya 1,6%, tetapi emisi yang ditimbulkan konsumsi listrik mencapai 20%. Hal ini disebabkan faktor emisi energi listrik 207 kali lebih besar dari faktor emisi natural gas (faktor emisi listrik PLN = 207CO<sub>2</sub>/TJ=0,725kg/kWH)

Besar emisi GRK hasil perhitungan hanya setengah dari data penelitian sebelumnya pada Tabel 2-4 yaitu sebesar 225KtonCO<sub>2</sub>/tahun karena tabel tersebut didasarkan pada semua proses termasuk transportasi raw material, hasil dan lainnya didalam pabrik



Gambar 4-2. Pull (ton)

Dari gambar 4-2, pull terendah terjadi pada 2016 karena pabrik 2 berproduksi hanya sampai bulan Juli 2017. Tahun 2017 dan 2018 merupakan pull tertinggi karena pabrik yang baru berproduksi tahun 2017, memiliki kapasitas tungku 700 ton, 200 ton lebih tinggi dari plan 1, 2, 4 dan pabrik 5 yang masing-masing dengan kapasitas 500 ton.

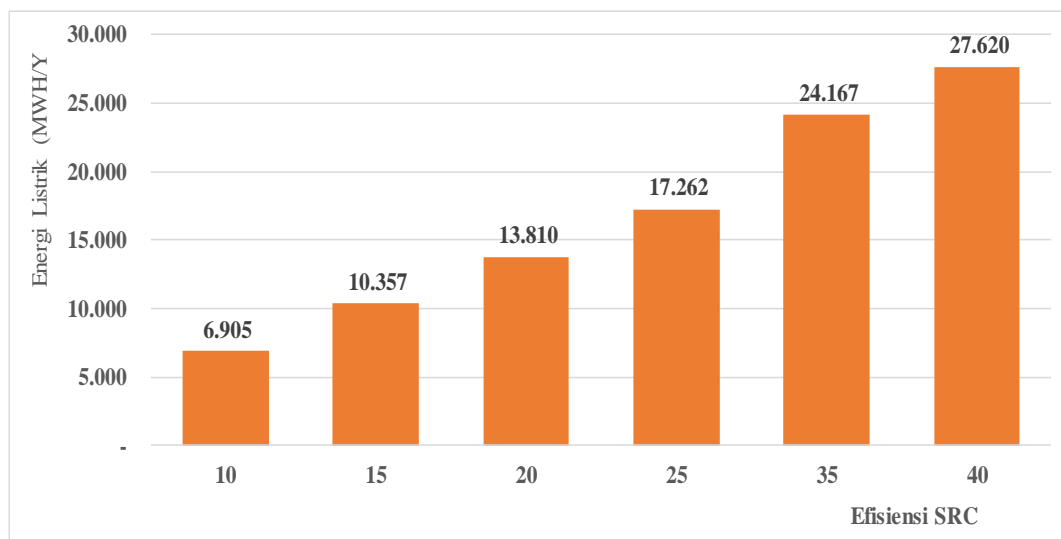


Gambar 4-3. Emisi GRK (tonCO<sub>2</sub>) per-ton pull

Dengan membagi emisi GRK total pada gambar 4-1 terhadap pull pada gambar 4-2, diperoleh emisi terhadap ton pull yang selanjutnya disebut FEkl (FEkl=Faktor Emisi Kaca Lembaran) seperti pada gambar 4-3. FEkl tertinggi terjadi pada tahun 2016 karena pabrik-2 yang berproduksi hanya sampai bulan Juli

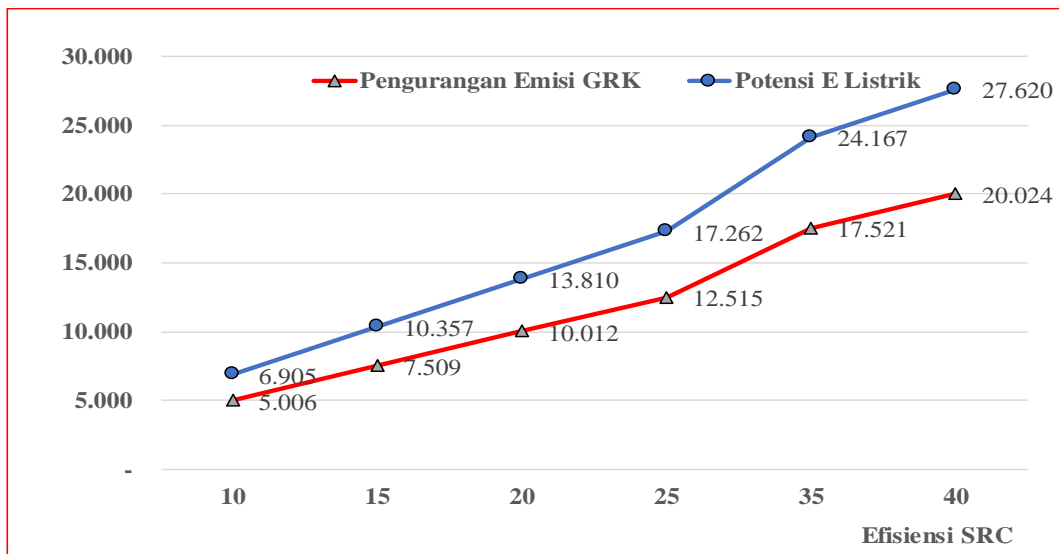
2017 menggunakan minyak residu 500TJ, hampir sama dengan natural gas sebesar 518TJ sementara faktor emisi minyak residu 32% lebih tinggi dari natural gas. FEkl turun dari 0,19 menjadi 0,16 mulai tahun 2017 dan 2018 karena pabrik 3 yang sudah berproduksi sejak awal 2017 memiliki tungku baru dan kapasitas yang lebih besar artinya efisiensi pembakaran tungku baru lebih baik.

Dengan rata-rata konsumsi natural gas 1.187TJ/tahun dan potensi panas gas buang sebesar 8.353kWh/NM3 atau 58.187kWh/TJ maka diperoleh potensi energi listrik per tahun per satu tungku adalah 6.905MWh sampai dengan 27.620MWh, pada gambar 4-4. Energi listrik yang dihasilkan konversi ini sangat tergantung pada efisiensi SRC (Steam Rankine Cycle), semakin tinggi efisiensi maka energi listrik yang dihasilkan juga semakin besar.



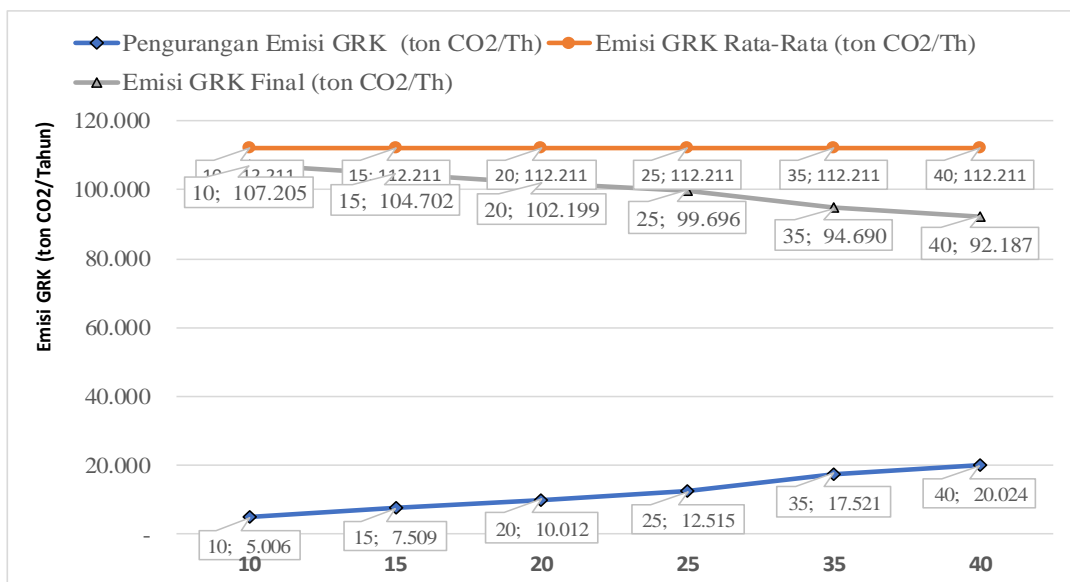
Gambar 4-4. Potensi Energi Listrik (1 tahun) dari Konversi Gas Buang 8.353kW-h per-NM3 natural gas pada efisiensi SRC 10-40%

Penghitungan potensi pengurangan emisi GRK dari penggunaan listrik hasil konversi, menggunakan persamaan dan faktor emisi pembangkit listrik dari sumber PLN sebesar 0,725tonCO<sub>2</sub>/MWh seperti ditunjukkan pada gambar 4-5 karena masuk ke sistim grid PLN, sehingga pengurang emisi GRK lebih rendah dibandingkan dengan potensi listrik yang dihasilkan.



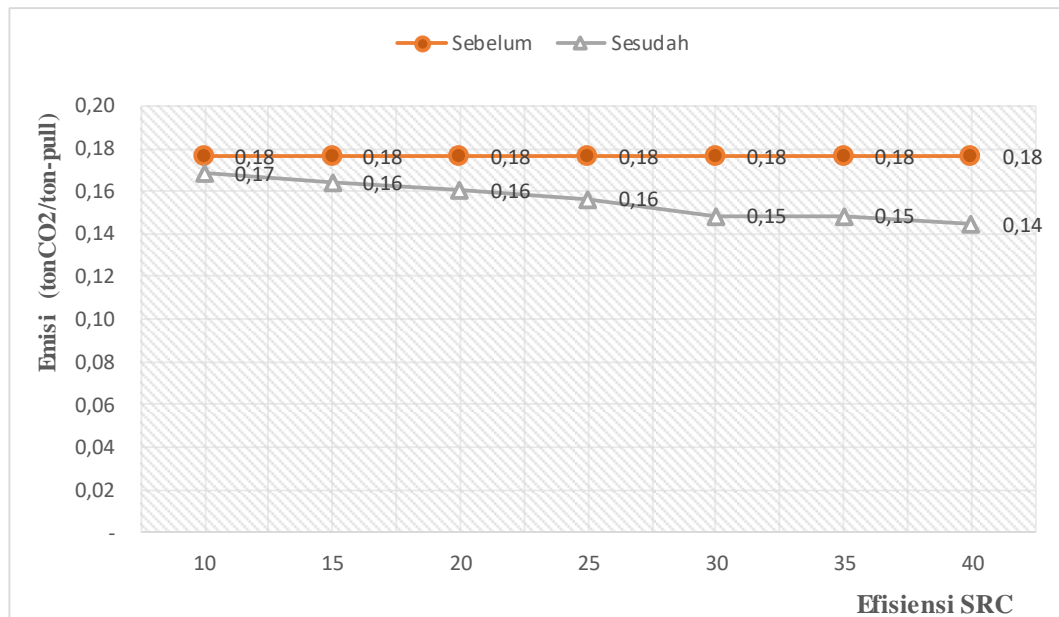
Gambar 4-5. Potensi Pengurangan Emisi GRK per-tahun dari Listrik hasil Konversi

Kombinasi dari gambar 4-4 dan 4-5 diperoleh gambar 4-6. Gambar ini menjelaskan, emisi GRK rata-rata dalam setahun adalah 112.211 tonCO<sub>2</sub> dan dengan potensi pengurangan emisi dari listrik konversi gas buang sebesar 5.006 tonCO<sub>2</sub> sampai 20.024 tonCO<sub>2</sub> dapat mengurangi emisi 4,4% sampai 17,8% sehingga emisi GRK bisa dikurangi dari 107.205 ton CO<sub>2</sub> sampai dengan 92.187 ton CO<sub>2</sub>



Gambar 4-6. Emisi GRK (1 tahun) sebelum dan sesudah penggunaan listrik hasil konversi

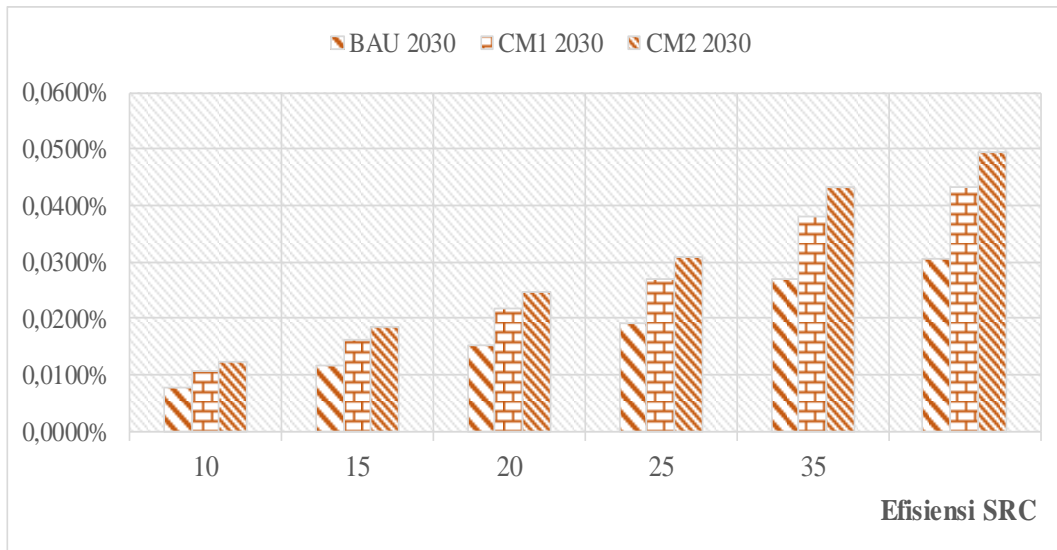
Rata-rata FEkl dari gambar 4-3 adalah sebesar 0,18 tonCO<sub>2</sub>/ton-pull, dan angka ini turun menjadi 0,17 tonCO<sub>2</sub>/ton-pull (5,5%) sampai terendah 0,14 tonCO<sub>2</sub>/ton-pull (22%) seperti gambar 4-7, artinya FEkl rata-rata turun sebesar 11%. Secara teknis, semua industri kaca sama dalam hal proses dan penggunaan energi, oleh karena itu FEkl ini bisa jadi acuan bagi industri kaca lembaran di Indonesia



Gambar 4-7. Emisi GRK per-ton pull (FEkl) sebelum dan setelah penggunaan listrik hasil konversi

Berdasarkan FEkl ini, pelaku industri kaca lembaran khususnya di Indonesia sangat mudah memperkirakan penurunan emisi yang dihasilkan jika mereka melakukan studi kelayakan dalam perencanaan pemanfaatan gas buang menjadi listrik.

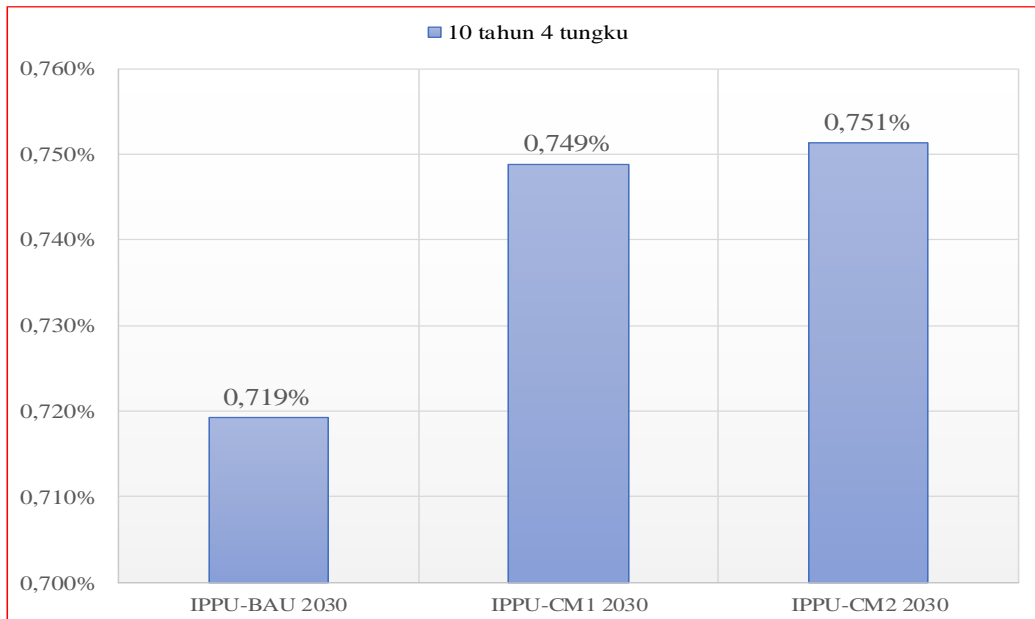
Dari data National Determined Contribution (NDC) Indonesia pertama, target emisi dari semua sektor tahun 2030 adalah 2,829 tonCO<sub>2</sub>, 2.034 tonCO<sub>2</sub>, 1.787 tonCO<sub>2</sub> masing-masing dengan skenario BAU, CM1 (unconditional) dan CM2 (conditional). (Hindarto, Samyanugraha and Nathalia, 2018). Dengan melakukan konversi gas buang menjadi energi listrik, 4 pabrik industri kaca lembaran PT.XYZ yang beroperasi bisa berkontribusi menurunkan emisi GRK



Gambar 4-8. Potensi kontribusi pengurangan emisi oleh 4 pabrik sampai tahun 2030 dengan efisiensi SRC 10 – 40%

0,00766-0,0307% ; 0,01 – 0,04% ; 0,012 – 0,049% masing-masing terhadap target skenario BAU, CM1 dan CM2 seperti ditunjukkan pada gambar 4-8.

Jika kontribusi masing-masing skenario dihitung rata-rata akan diperoleh gambar 4-9, dengan asumsi efisiensi SRC adalah 25%. Dari gambar ini, kontribusi



Gambar 4-9. Potensi persentasi kontribusi pengurangan emisi terhadap sektor industri (IPPU) tahun 2030 dengan tiga skenario

pengurangan emisi oleh 4 (empat) pabrik industri kaca lembaran PT.XYZ terhadap target emisi GRK sektor Industri (IPPU) adalah 0,791%, 0,824%, 0,826%, masing-masing dengan skenario BAU, CM1 dan CM2 tahun 2030

Gambar 4-9 menunjukkan, target emisi GRK sektor industri (IPPU) tahun 2030 akan bisa dicapai jika pemerintah memasukkan program konversi gas buang menjadi energi dalam industri kaca lembaran sebagai mitigasi ditambah lagi industri lainnya seperti industri semen dan baja sebagai pemakai energi yang besar pada tungku proses nya masing-masing.

Dari hasil dan pembahasan diatas, emisi GRK final setelah dilakukan konversi gas buang menjadi energi listrik dituliskan pada persamaan 4-1

$$\text{Emisi GRK}_{kv} = \text{EG}_{klo} - \text{EG}_{kl1} \dots\dots\dots 4 - 1$$

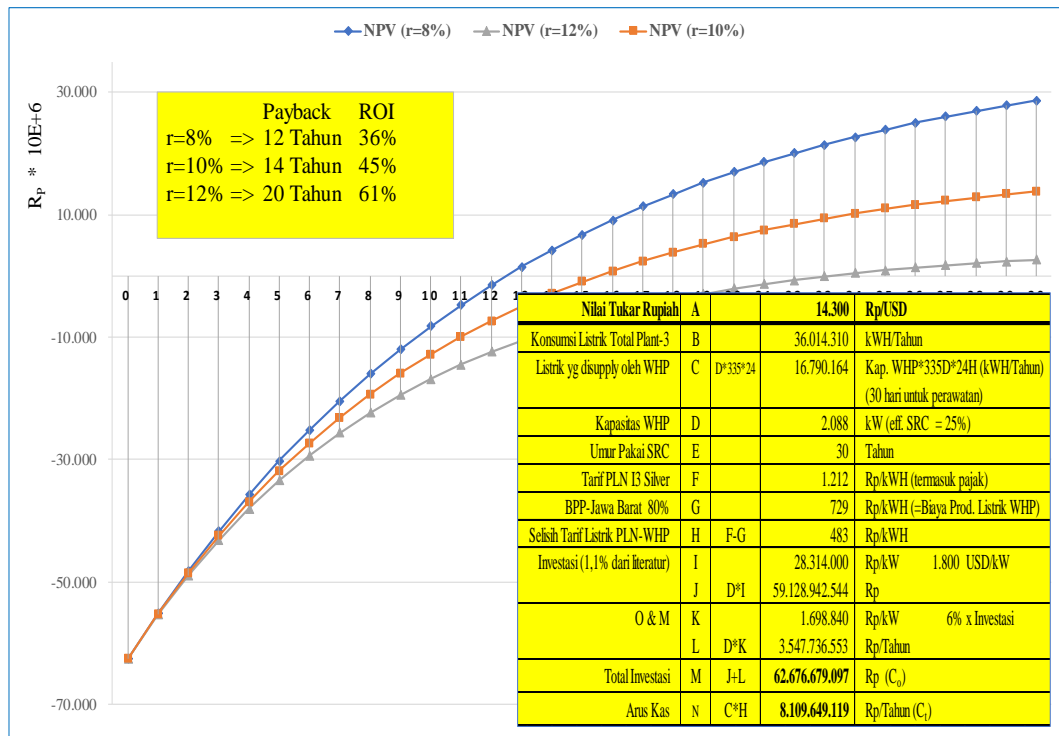
dimana :

Emisi GRK<sub>kv</sub> = emisi GRK final hasil konversi (tonCO<sub>2</sub>),

EF<sub>klo</sub> = faktor emisi sebelum konversi = 0,18tonCO<sub>2</sub>/ton pull,

EF<sub>kl1</sub> = faktor emisi setelah konversi = 0,16tonCO<sub>2</sub>/ton pull

Listrik hasil konversi mensupply pabrik dengan cara on-grid sehingga konsumsi listrik dalam perhitungan NPV, akan dihitung berdasarkan kapasitas listrik hasil konversi yang dibangkitkan sebesar 2.088kWH (pada efisiensi 25%). Dengan asumsi 30 hari per tahun digunakan untuk perawatan, jam operasi dalam setahun adalah sebesar 335 x 24 jam, atau sama dengan 16.790.163kWH per tahun.. Dari bagian 3.3.1. dan Lampiran-1. digambarkan NPV untuk 3 suku bunga pinjaman diatas SUN, yaitu 8%, 10% , 12 % seperti gambar 4-10



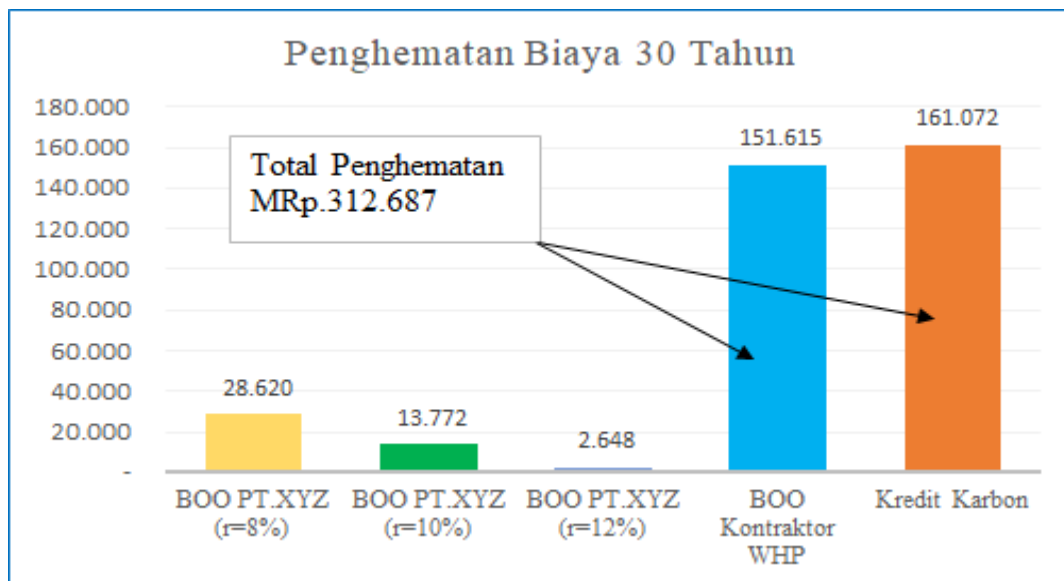
Gambar 4-10. Analisa Net Present Value (NPV) & ROI

Gambar 4-10, menunjukkan pengembalian investasi (payback) atau NPV positif akan terjadi mulai tahun ke 12, 14 dan 20 masing-masing untuk suku bunga pinjaman 8%, 10%, dan 12%. Arus kas (pendapatan dari penghematan biaya listrik) sebesar Rp.8Mil pertahun diperoleh dari selisih harga produksi listrik yaitu sebesar Rp.483/kWh (Lampiran-1) dari harga produksi Rp.729/kWh dengan harga listrik PLN sebesar Rp.1.212/kWh

Dari ke tiga suku bunga tersebut, secara teori investasi berdasarkan NPV, bagi investor dan PT.XYZ sama-sama menguntungkan. Dengan masa umur pakai SRC 30 tahun, suku bunga 8% paling aman untuk investor dengan pertimbangan keamanan investasi dari sisi teknologi, ROI sudah mencapai 35%, dan kesinambungan usaha PT.XYZ. Sementara untuk PT.XYZ, dengan suku bunga 8% juga lebih menguntungkan karena masih memperoleh pendapatan Rp.28Mil sampai umur pakai SRC berakhir.

Penghematan lebih banyak diperoleh PT.XYZ adalah jika membeli listrik dari kontraktor WHP, artinya investasi dilakukan oleh kontraktor WHP. Dengan harga BPP-Jawa Barat sebesar Rp.911/kWH, akan memperoleh penghematan selama 30 tahun sebesar Rp.151Mil, seperti dijelaskan pada bagian bagian 3.3.3. dan gambar 3-9. Penghematan diperoleh dari selisih sebesar Rp.301/kWH antara BPP-Jawa Barat dengan harga listrik PLN sebesar Rp.1.212/kWH.

Sebagaimana sudah disebutkan pada sub bab 2.4 tentang pasar karbon, potensi pendapatan lainnya diperoleh dengan menawarkan pengurangan emisi GRK yang dihasilkan ke sistim perdagangan karbon. Potensi tambahan pendapatan dengan penurunan rata-rata emisi 12.515 tonCO<sub>2</sub>/tahun/pabrik adalah sebesar Rp.5,3Mil/tahun atau Rp.161Mil selama 30 tahun dengan asumsi semua emisi GRK hasil pengurangan bisa diperdagangkan



Gambar 4-11. Potensi Penghematan biaya Energi Listrik dan Pendapatan dari Kredit Karbon per Pabrik

Dengan mengacu pada gambar 4-11, dan memilih opsi tanpa investasi, PT.XYZ berpotensi memperoleh penghematan dari biaya listrik sebesar Rp.151Mil

dan pendapatan perdagangan karbon sebesar Rp.161Mil selama 30 tahun umur operasi SRC.

Tipikal industri kaca lembaran adalah sangat bergantung pada sirkulasi air untuk mendinginkan mesin-mesin pada proses pembentukan (forming), dan udara yang dihasilkan oleh sumber udara (kipas) berkapasitas tinggi untuk mendinginkan dinding batu tungku dan udara bantu pembakaran (ekses udara). Semua proses tersebut digerakkan oleh energi listrik, artinya proses produksi pada industri kaca lembaran sangat tergantung pada energi listrik, tanpa pasokan listrik selama 20 menit, tungku akan sulit digunakan kembali karena akan terjadi kerusakan struktur akibat suhu dan tekanan tidak stabil dan molten glass yang membeku. Dengan alasan diatas, tingkat kehati-hatian pengusaha dalam industri kaca lembaran sangat tinggi dalam menggunakan pasokan listrik selain PLN dan pembangkit sendiri

Berdasarkan uraian dan analisa potensi pengurangan emisi GRK dan keekonomiannya, konversi panas gas buang menjadi energi listrik (WHP) menguntungkan bagi investor, pelaku industri dan pemerintah dalam mencapai target emisi GRK IPPU 2030

Upaya utama yang harus dilakukan pemerintah sebagai pemilik regulasi untuk meyakinkan pengusaha adalah mengundang dan memfasilitasi pemilik teknologi konversi dan investor mengadakan seminar, pameran dengan demikian bisai pengusaha bisa diyakinkan mengenai kehandalan teknologi dan keuntungan yang akan diperoleh. Dengan diyakinkannya pengusaha untuk melakukan konversi gas buang menjadi energi listrik, maka pengusaha, investor, pemilik teknologi dan sekaligus karyawan akan mendapat keuntungan secara simbiosis mutualisma.

## BAB 5

# Kesimpulan dan Saran

### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan data, perhitungan, studi literatur dan hasil penelitian yang sudah dilakukan dalam hubungannya dengan tujuan penulisan, didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Data konsumsi energi dan volume melting (pull) didasarkan pada total data baku/campuran yang diperoleh dari bagian keuangan PT.XYZ untuk kebutuhan penghitungan COGM, sehingga diperlukan pemilahan data untuk mendapatkan konsumsi energi yang khusus digunakan dalam tungku pembakaran
2. Energi panas gas buang per satuan laju aliran natural gas adalah sebesar 2.153kWH/NM3, nilai ini berlaku dengan acuan massa oksigen yang dianalisa dari gas buang sebesar 6,6%, sehingga energi panas sangat dipengaruhi oleh eksek udara dalam pembakaran
3. Pada efisiensi SRC 15%, energi yang dihasilkan adalah 10.357MWH/tahun dan ini hampir sama dengan penelitian di negara EU27 (Campana *et al.*, 2013) pada Tabel 2-4 untuk industri kaca, tetapi penurunan emisi lebih besar yaitu 7.509tonCO2 berbanding 3.879tonCO2 pada EU27. Perbedaan penurunan ini disebabkan faktor emisi grid Jawa Bali lebih besar dari negara-negara EU27
4. Dengan konversi ini, penurunan emisi per-ton volume melting bisa dicapai sampai 5,5%, penghematan biaya energi listrik sampai dengan Rp.151Mil. dalam satu masa pakai umur SRC (30 tahun)

5. Target NDC pengurangan emisi GRK sektor industri 2030 bisa dicapai sampai dengan 0,749% terhadap skenario CM1 dengan melakukan konversi gas buang menjadi energi listrik
6. Potensi pengurangan emisi GRK yang dihasilkan dimasukkan dalam skema pasar karbon bisa menghasilkan pendapatan yang hampir setara dengan penghematan dari pemakaian listrik hasil konversi.

## **5.2 Saran**

Berdasarkan umur rata-rata satu tungku adalah 15 tahun, dan potensi penghematan biaya energi sampai dengan Rp.151Mil untuk umur pakai SRC 30 tahun dan juga didukung dengan PP No.70 Tahun 2009 tentang konservasi energi, beberapa saran sebagai berikut

1. Pemerintah proaktif memfasilitasi pertemuan pelaku industri kaca lembaran, pemilik modal dan pemilik teknologi konversi, sehingga pencapaian target pengurangan emisi sektor IPPU tahun 2030 bisa dicapai
2. Program konversi gas buang menjadi energi listrik (koogenerasi) hendaknya dimasukkan sebagai program mitigasi bukan sukarela
3. Pemerintah memberikan kemudahan ijin dan penurunan bea masuk import teknologi konversi
4. Pemberian insentif kepada pemilik teknologi yang mau mendirikan industri manufaktur peralatan konversi
5. Kementrian ESDM dan Perindustrian sebaiknya membentuk tim khusus untuk bekerjasama dengan industri dalam percepatan pembangunan konversi koogenerasi

**DAFTAR PUSTAKA**

- Amiri, A. and Vaseghi, M. R. (2015) 'Waste heat recovery power generation systems for cement production process', *IEEE Transactions on Industry Applications*, 51(1), pp. 13–19. doi: 10.1109/TIA.2014.2347196.
- Broberg Viklund, S. and Karlsson, M. (2015) 'Industrial excess heat use: Systems analysis and CO<sub>2</sub> emissions reduction', *Applied Energy*. Elsevier Ltd, 152, pp. 189–197. doi: 10.1016/j.apenergy.2014.12.023.
- Campana, F. *et al.* (2013) 'ORC waste heat recovery in European energy intensive industries: Energy and GHG savings', *Energy Conversion and Management*. Elsevier Ltd, 76, pp. 244–252. doi: 10.1016/j.enconman.2013.07.041.
- Combustion, S. *et al.* (2006) 'Chapter 2 stationary combustion 2006', *Energy*.
- Desai, N. B. and Bandyopadhyay, S. (2016) 'Thermo-economic comparisons between solar steam Rankine and organic Rankine cycles', *Applied Thermal Engineering*. Elsevier Ltd, 105, pp. 862–875. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.04.055.
- Hanle, L. *et al.* (2006) 'Mineral Industry Emission', *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, pp. 1–40.
- Hindarto, D. E., Samyanugraha, A. and Nathalia, D. (2018) 'Pengantar Pasar Karbon untuk Pengendalian Perubahan Iklim', p. 119.
- Indonesia, R. (2014) 'PEDOMAN TEKNIS PERHITUNGAN BASELINE EMISI GAS RUMAH KACA'.
- Installations, E. and Potential, R. (no date) 'Waste Heat Recovery in Turkish Cement Industry Review of Existing Installations and'.
- International Energy Agency (2019) 'Global Energy and CO<sub>2</sub> Status Report. The latest trends in energy and emissions in 2018.', *World Energy Outlook*, p. 29. Available at: <https://www.iea.org/geco/>.
- Laporan Inventarisasi GRK dan Monitoring, Pelaporan dan Verifikasi 2017.
- Lingkungan, M., Dan, H. and Republik, K. (2018) 'BERITA NEGARA', (163).
- Macchi, E. (2016) 'Organic Rankine Cycle (ORC) Power Systems', *Organic Rankine Cycle (ORC) Power Systems*. doi: 10.1016/c2014-0-04239-6.
- Miró, L., Brückner, S. and Cabeza, L. F. (2015) 'Mapping and discussing Industrial Waste Heat (IWH) potentials for different countries', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier, 51, pp. 847–855. doi: 10.1016/j.rser.2015.06.035.
- Oak Ridge National Laboratory (2015) *Waste Heat to Power Market Assessment (Report No. ORNL/TM-2014/620)*. Available at: <http://info.ornl.gov/sites/publications/files/Pub52953.pdf>.
- Olumayegun, O. and Wang, M. (2019) 'Dynamic modelling and control of supercritical CO<sub>2</sub> power cycle using waste heat from industrial processes', *Fuel*.

- Elsevier, 249(October 2018), pp. 89–102. doi: 10.1016/j.fuel.2019.03.078.
- Page, I. B. (2008) ‘Waste Heat Recovery: Technology Opportunities in the US Industry - prepared by Bcs, Incorporated’, *US Department of Energy - Industrial Technologies Program*, pp. 1–112.
- Sector, I. and Division, I. A. (2010) ‘Waste Heat Recovery Glass Industry’.
- Semen, P. T. and Persero, I. (2015) ““ Programs for Emission Reductions & Green Industry ””, (April).
- Thekdi, A. and Nimbalkar, S. U. (2015) *Industrial Waste Heat Recovery - Potential Applications, Available Technologies and Crosscutting R&D Opportunities*. doi: 10.2172/1185778.
- Unfccc (no date) ‘UNFCCC/CCNUCC CDM-Executive Board EB 50 Report Annex 15 Methodological Tool “Tool to determine the remaining lifetime of equipment” (Version 01)’.
- Zhang, X. *et al.* (2016) ‘Comparative study of waste heat steam SRC, ORC and S-ORC power generation systems in medium-low suhu’, *Applied Thermal Engineering*, 106, pp. 1427–1439. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.06.108.
- <https://beyond-ratings.com/publications/carbon-price-landscape-2019/>

## LAMPIRAN

Lampiran-1,

Perhitungan Emisi GRK dari Konsumsi Natural Gas dan Minyak Residu,

URAIAN		UNIT	2014	2015	2016	2017	2018
Pabrik 1	Natural Gas	TJ	1.064	1.084	992	1.193	1.179
	Minyak Residu	TJ	-	4	181	-	24
Pabrik 2	Natural Gas	TJ	1.183	1.189	518	stop	stop
	Minyak Residu	TJ	-	5	500	-	-
Pabrik 3	Natural Gas	TJ	-	-	start	1.440	1.371
	Minyak Residu	TJ	-	-	-	-	-
Pabrik 4	Natural Gas	TJ	1.138	1.155	1.123	1.128	1.141
	Minyak Residu	TJ	-	3	31	76	71
Pabrik 5	Natural Gas	TJ	1.217	1.211	1.126	1.118	1.175
	Minyak Residu	TJ	-	8	114	55	2
Faktor Emisi NG		tonCO <sub>2</sub> /TJ	56,1	56,1	56,1	56,1	56,1
Faktor Emisi MR		tonCO <sub>2</sub> /TJ	74,1	74,1	74,1	74,1	74,1
Emisi GRK rata2 NG		tonCO <sub>2</sub>	64.548	65.065	52.726	68.442	68.239
Emisi GRK rata2 MR		tonCO <sub>2</sub>		365	15.308		
<b>Emisi GRK rata2 NG+MR</b>		tonCO <sub>2</sub>	<b>64.548</b>	<b>65.430</b>	<b>68.034</b>	<b>68.442</b>	<b>68.239</b>
<b>Emisi GRK akumulasi NG+MR</b>		tonCO <sub>2</sub>	<b>64.548</b>	<b>129.978</b>	<b>198.012</b>	<b>266.454</b>	<b>334.693</b>

Lampiran-2,

Perhitungan Emisi GRK dari Konsumsi Listrik PLN,

URAIAN	UNIT	2014	2015	2016	2017	2018
Pabrik 1	MWH	20.244	18.677	20.947	23.118	25.162
Pabrik 2	MWH	22.801	22.042	16.995		
Pabrik 3	MWH				29.336	30.850
Pabrik 4	MWH	24.064	23.023	24.295	19.178	18.088
Pabrik 5	MWH	21.865	21.009	20.292	22.628	22.469
<b>Konsumsi L-PLN rata2</b>	MWH	<b>22.244</b>	<b>21.188</b>	<b>20.632</b>	<b>23.565</b>	<b>24.142</b>
<b>Konsumsi L-PLN akumulasi</b>	MWH	<b>22.244</b>	<b>43.431</b>	<b>64.063</b>	<b>87.628</b>	<b>111.771</b>
Faktor Emisi	kgCO <sub>2</sub> /kWH	0,725	0,725	0,725	0,725	0,725
<b>Emisi GRK L-PLN rata2</b>	tonCO <sub>2</sub>	<b>16.127</b>	<b>15.361</b>	<b>14.958</b>	<b>17.085</b>	<b>17.503</b>
<b>Emisi GRK L-PLN akumulasi</b>	tonCO <sub>2</sub>	<b>16.127</b>	<b>31.488</b>	<b>46.446</b>	<b>63.531</b>	<b>81.034</b>

Lampiran-3,

Perhitungan Emisi GRK dari Proses Peleburan Bahan Baku (IPPU),

URAIAN		UNIT	2014	2015	2016	2017	2018
Pabrik 1	Melting Volume (Pull)	Ton	135.988	131.938	138.799	149.269	146.372
	Cullet Ratio	%	37%	46%	36%	25%	27%
Pabrik 2	Melting Volume (Pull)	Ton	152.116	158.607	122.409	-	-
	Cullet Ratio	%	36%	35%	40%	-	-
Pabrik 3	Melting Volume (Pull)	Ton	-	-	-	202.316	206.017
	Cullet Ratio	%	-	-	-	33%	35%
Pabrik 4	Melting Volume (Pull)	Ton	159.518	164.184	160.935	175.369	174.936
	Cullet Ratio	%	36%	32%	43%	40%	47%
Pabrik 5	Melting Volume (Pull)	Ton	164.458	155.442	162.895	166.597	158.577
	Cullet Ratio	%	32%	32%	39%	43%	36%
Faktor Emisi FG		kgCO <sub>2</sub> /kg Vol	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21
<b>Emisi GRK rata2 BB</b>		tonCO <sub>2</sub>	<b>32.021</b>	<b>31.919</b>	<b>30.593</b>	<b>25.695</b>	<b>25.101</b>
<b>Emisi GRK akumulasi BB</b>		tonCO <sub>2</sub>	<b>32.021</b>	<b>63.940</b>	<b>94.533</b>	<b>120.228</b>	<b>145.329</b>

Lampiran-4,

Perhitungan NPV dan ROI,

Penghematan Biaya dari Listrik Hasil Konversi (WHP)				
(Investasi oleh PT.XYZ)				
Nilai Tukar Rupiah	A		14.300	Rp/USD
Konsumsi Listrik Total Plant-3	B		36.014.310	kWH/Tahun
Listrik yg disupply oleh WHP	C	D*335*24	16.790.164	Kap. WHP*335D*24H (kWH/Tahun) (30 hari untuk perawatan)
Kapasitas WHP	D		2.088	kW (eff. SRC = 25%)
Umur Pakai SRC	E		30	Tahun
Tarif PLN I3 Silver	F		1.212	Rp/kWH (termasuk pajak)
BPP-Jawa Barat 80%	G		729	Rp/kWH (=Biaya Prod. Listrik WHP)
Selisih Tarif Listrik PLN-WHP	H	F-G	483	Rp/kWH
Investasi (1,1% dari literatur)	I		28.314.000	Rp/kW 1.800 USD/kW
	J	D*I	59.128.942.544	Rp
O & M	K		1.698.840	Rp/kW 6% x Investasi
	L	D*K	3.547.736.553	Rp/Tahun
Total Investasi	M	J+L	62.676.679.097	Rp (C <sub>0</sub> )
Arus Kas	N	C*H	8.109.649.119	Rp/Tahun (C <sub>t</sub> )

$$NPV = -C_0 + \sum_{t=0}^{\tau} \frac{C_t}{(1+r)^t}$$

$t = 0, 1, 2, \dots, 30$

Tahun (t)	Arus Kas (Rp $\times 10^6$ )	DF		PV (Rp $\times 10^6$ )	NPV (r=8%) (Rp $\times 10^6$ )		DF	PV (Rp $\times 10^6$ )	NPV (r=10%) (Rp $\times 10^6$ )		DF	PV (Rp $\times 10^6$ )	NPV (r=12%) (Rp $\times 10^6$ )	
		r	8%		r	10%			r	12%				
0	-62.677	1		-62.677	-62.677	1	-62.677	-62.677	1	-62.677	-62.677	-62.677	-62.677	
1	8.110	0,92593		7.509	-55.168	0,9091	7.372	-55.304	0,8929	7.241	-55.436	7.241	-55.436	
2	8.110	0,85734		6.953	-48.215	0,8264	6.702	-48.602	0,7972	6.465	-48.971	6.465	-48.971	
3	8.110	0,79383		6.438	-41.777	0,7513	6.093	-42.509	0,7118	5.772	-43.199	5.772	-43.199	
4	8.110	0,73503		5.961	-35.816	0,6830	5.539	-36.970	0,6355	5.154	-38.045	5.154	-38.045	
5	8.110	0,68058		5.519	-30.297	0,6209	5.035	-31.935	0,5674	4.602	-33.443	4.602	-33.443	
6	8.110	0,63017		5.110	-25.187	0,5645	4.578	-27.357	0,5066	4.109	-29.335	4.109	-29.335	
7	8.110	0,58349		4.732	-20.455	0,5132	4.162	-23.196	0,4523	3.668	-25.666	3.668	-25.666	
8	8.110	0,54027		4.381	-16.073	0,4665	3.783	-19.412	0,4039	3.275	-22.391	3.275	-22.391	
9	8.110	0,50025		4.057	-12.017	0,4241	3.439	-15.973	0,3606	2.924	-19.466	2.924	-19.466	
10	8.110	0,46319		3.756	-8.260	0,3855	3.127	-12.846	0,3220	2.611	-16.855	2.611	-16.855	
11	8.110	0,42888		3.478	-4.782	0,3505	2.842	-10.004	0,2875	2.331	-14.524	2.331	-14.524	
12	8.110	0,39711		3.220	-1.562	0,3186	2.584	-7.420	0,2567	2.082	-12.442	2.082	-12.442	
13	8.110	0,36770		2.982	1.420	0,2897	2.349	-5.071	0,2292	1.859	-10.584	1.859	-10.584	
14	8.110	0,34046		2.761	4.181	0,2633	2.136	-2.935	0,2046	1.659	-8.925	1.659	-8.925	
15	8.110	0,31524		2.556	6.738	0,2394	1.941	-994	0,1827	1.482	-7.443	1.482	-7.443	
16	8.110	0,29189		2.367	9.105	0,2176	1.765	771	0,1631	1.323	-6.120	1.323	-6.120	
17	8.110	0,27027		2.192	11.297	0,1978	1.604	2.375	0,1456	1.181	-4.939	1.181	-4.939	
18	8.110	0,25025		2.029	13.326	0,1799	1.459	3.834	0,1300	1.055	-3.884	1.055	-3.884	
19	8.110	0,23171		1.879	15.205	0,1635	1.326	5.160	0,1161	942	-2.943	942	-2.943	
20	8.110	0,21455		1.740	16.945	0,1486	1.205	6.365	0,1037	841	-2.102	841	-2.102	
21	8.110	0,19866		1.611	18.556	0,1351	1.096	7.461	0,0926	751	-1.351	751	-1.351	
22	8.110	0,18394		1.492	20.048	0,1228	996	8.457	0,0826	670	-681	670	-681	
23	8.110	0,17032		1.381	21.429	0,1117	906	9.363	0,0738	598	-83	598	-83	
24	8.110	0,15770		1.279	22.708	0,1015	823	10.186	0,0659	534	451	534	451	
25	8.110	0,14602		1.184	23.892	0,0923	748	10.935	0,0588	477	928	477	928	
26	8.110	0,13520		1.096	24.988	0,0839	680	11.615	0,0525	426	1.354	426	1.354	
27	8.110	0,12519		1.015	26.004	0,0763	619	12.234	0,0469	380	1.735	380	1.735	
28	8.110	0,11591		940	26.944	0,0693	562	12.796	0,0419	340	2.074	340	2.074	
29	8.110	0,10733		870	27.814	0,0630	511	13.308	0,0374	303	2.377	303	2.377	
30	8.110	0,09938		806	28.620	0,0573	465	13.772	0,0334	271	2.648	271	2.648	

$$ROI = \left( 1 - \left( \frac{Co}{(Ct * t)} \right) \right) * 100\%$$

$Co$         62.676.679.097

$Ct$         8.109.649.119

$t$         Tahun ke NPV positif

$r$	8%	10%	12%
$t$	t=12	t=14	t=16
<b>ROI</b>	<b>36%</b>	<b>45%</b>	<b>61%</b>