



Potensi Reduksi Gas Rumah Kaca di TPA Kawatuna melalui Proyek Pemulihan Gas Metana

Reduction of Greenhouse Gases in Kawatuna Landfill through Methane Gas Recovery Project

NURUL ANNISA R. NOCH, PINI WIJAYANTI*

Departemen Ekonomi Sumberdaya dan Lingkungan, Fakultas Ekonomi dan Manajemen, Institut Pertanian Bogor (IPB)
Gedung Fakultas Ekonomi dan Manajemen Jalan Agatis, Kampus Dramaga, Bogor
*pini_wijayanti@apps.ipb.ac.id

ARTICLE INFO

Article history:

Received 7 October 2021

Accepted 13 January 2022

Published 23 January 2022

Keywords:

CDM

CER

GHG emissions

Kawatuna

PLTBg

ABSTRACT

The Palu City Government plans to reactivate the biogas power plant (PLTBg) project in Kawatuna landfill, which was operated in 2013. Both economic and environmental benefits of the project are important for decision-makers. The environmental benefit includes the project's potential reduction of greenhouse gases (GHGs) emissions. The economic benefits are significant to estimate as to the financial attractiveness of the project, which include the electricity generated and revenue from Certified Emission Reduction (CER). This study aims to estimate the potential GHGs emissions produced by the Kawatuna landfill before the PLTBg project, estimate the potential GHGs emissions reduction due to the project, and calculate the potential CER obtained from the project. This study employs the Clean Development mechanism (CDM) AMS-III.G method to estimate the potential GHGs reduction and simple quantitative analysis to calculate the potential CER of the project. The results show that based on the BAU scenario in 2021, the estimated baseline GHGs emissions is 16,148.74 t CO_{2e}, the potential GHGs reduction after the project would reach 61,40% of the total GHGs emissions generated, and the range of potential CER would be from 28,595,318 IDR to 72,329,334 IDR. From 2021 to 2030, the total present value of CER would reach 563,358,389 IDR.

INFORMASI ARTIKEL

Histori artikel:

Diterima 7 Oktober 2021

Disetujui 13 Januari 2022

Diterbitkan 23 Januari 2022

Kata kunci:

CDM

CER

Emisi GRK

Kawatuna

PLTBg

ABSTRAK

Pemerintah Kota Palu berencana menghidupkan kembali proyek Pembangkit Listrik Tenaga Biogas (PLTBg) di TPA Kawatuna yang sempat beroperasi pada tahun 2013. Informasi mengenai manfaat yang akan diperoleh dari sudut pandang ekonomi dan lingkungan adalah penting bagi pengambil keputusan. Salah satu manfaat lingkungan yaitu potensi reduksi emisi Gas Rumah Kaca (GRK) oleh proyek PLTBg. Manfaat ekonomi penting untuk diestimasi sebagai daya tarik finansial dari proyek, di antaranya berasal dari nilai potensi energi listrik yang dihasilkan dan penerimaan proyek dari *Certified Emission Reduction* (CER). Tujuan penelitian ini adalah mengestimasi potensi emisi GRK yang dihasilkan oleh Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) Kawatuna sebelum implementasi proyek pemulihan gas metana, mengestimasi potensi reduksi GRK dari proyek tersebut, menghitung potensi nilai CER yang dapat dihasilkan dari proyek tersebut. Penelitian ini menggunakan metode CDM AMS-III.G untuk mengestimasi potensi reduksi GRK dan menggunakan kuantitatif sederhana untuk mengestimasi nilai CER proyek. Hasil penelitian menunjukkan melalui skenario BAU pada tahun 2021, potensi emisi GRK sebelum adanya proyek adalah 16.148,74 t CO_{2e} dan potensi reduksi GRK setelah adanya proyek mencapai 61,40% dari total emisi yang dihasilkan. Potensi penerimaan CER proyek pada tahun 2021 berkisar antara Rp 28.595.318 hingga Rp 72.329.334 dan *total present value* penerimaan CER pada tahun 2021-2030 mencapai Rp 563.358.389.

1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Peningkatan rata-rata temperatur global merupakan salah satu tanda telah terjadinya pemanasan global yang disebabkan perubahan iklim. Selama abad ke-20 peningkatan rata-rata temperatur mencapai 0,74 °C per tahun (Nasution, 2016). Hal ini disebabkan oleh emisi Gas Rumah Kaca (GRK) yang dapat menimbulkan efek pemanasan yang dikenal sebagai efek rumah kaca.

United Nation Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) diadopsi oleh sebagian besar negara di dunia pada Konferensi Tingkat Tinggi (KTT) Bumi di Rio de Janeiro, Brazil tahun 1992 sebagai bentuk kepedulian masyarakat global terhadap emisi GRK. UNFCCC bertujuan untuk menstabilkan konsentrasi GRK di atmosfer dengan mencegah perilaku manusia yang berbahaya bagi iklim. Dalam konvensi ini terdapat agenda *Conferences of the Parties* (COP) yang berfungsi untuk mempertemukan pihak-pihak yang menyepakati berbagai komitmen dan tindak lanjut UNFCCC. Melalui agenda COP ke-3 UNFCCC di Kyoto, Jepang pada tanggal 1–10 Desember 1997 disepakati lahirnya Protokol Kyoto (Pramudianto, 2016).

Protokol Kyoto mengidentifikasi enam GRK utama yaitu karbon dioksida (CO₂), metana (CH₄), nitrous oksida (N₂O), *hydrofluorocarbon* (HFC), *perfluorocarbon* (PFC), dan sulfur hexafluorida (SF₆) sebagai target penurunan GRK (Pramudianto, 2016). Guna mencapai targetnya, Protokol Kyoto mengembangkan tiga mekanisme fleksibel dalam rangka mencegah atau mengurangi emisi GRK yaitu *Joint Implementation* (JI), *Clean Development Mechanism* (CDM) dan *Emission Trading* (ET) yang dapat menyerap aliran dana yang diperuntukkan bagi mekanisme tersebut dan akan menarik lebih banyak negara untuk berpartisipasi (UNFCCC, 2008).

Indonesia merupakan salah satu negara yang meratifikasi Protokol Kyoto dan menargetkan penurunan GRK di tahun 2030 yaitu sebesar 29% dengan kemampuan sendiri dan mencapai 41% dengan bantuan internasional (KLHK, 2015). Mekanisme fleksibel yang diadopsi oleh Indonesia dalam usaha penurunan emisi GRK yaitu CDM. Penerapan mekanisme ini dapat membantu negara berkembang dalam mencapai pembangunan berkelanjutan dengan membantu negara industri atau *annex I* dalam memenuhi komitmennya dalam menurunkan emisi GRK.

Sektor limbah menjadi salah satu dari lima sektor sasaran dalam penurunan emisi GRK di Indonesia. Pada tahun 2030, emisi sektor ini diprediksi akan mencapai 296 juta t CO₂e (PKDOD, 2018). Indonesia menargetkan penurunan emisi sektor limbah sebesar 0,38% pada tahun 2030 (UNFCCC, 2020). Proyek pemulihan gas CH₄ di Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) merupakan salah satu proyek CDM yang potensial untuk dilakukan di Indonesia yang berfokus pada penurunan emisi GRK yaitu gas CH₄ yang sekaligus dapat menciptakan sumber energi alternatif dari pembakaran gas TPA. Selain itu, pemulihan gas CH₄ juga dapat menghasilkan pendapatan melalui CER.

1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah mengestimasi emisi GRK (CH₄) sebelum adanya proyek pemulihan gas CH₄ dan potensi reduksi emisi GRK yang dihasilkan oleh proyek pemulihan gas CH₄, serta menghitung potensi penerimaan CER yang dapat dihasilkan dari proyek pemulihan gas CH₄.

2. METODE

Penelitian dilakukan di TPA Kawatuna, Kecamatan Mantikulore, Kota Palu, Sulawesi Tengah. Penelitian ini dimulai sejak bulan Juli 2020 hingga Maret 2021. Penelitian ini menggunakan dua metode analisis, sebagai berikut:

2.1 Potensi Penurunan Emisi GRK

Metode analisis yang digunakan untuk mengestimasi potensi reduksi emisi GRK adalah CDM untuk proyek skala kecil dari UNFCCC. Pengurangan emisi GRK diestimasi menggunakan metode AMS-III.G (UNFCCC, 2020). Pengurangan emisi (*ER_y*) dapat diformulasikan sebagai berikut:

$$ER_y = BE_y - PE_y \dots \dots \dots (1)$$

- Keterangan:
- ER_y* : Reduksi emisi GRK di tahun *y* (t CO₂e),
- BE_y* : Emisi GRK *baseline* di tahun *y* (t CO₂e),
- PE_y* : Emisi GRK proyek di tahun *y* (t CO₂e).

Batasan proyek (*project boundary*) mencakup jumlah timbunan sampah yang berasal dari sampah masyarakat Kota Palu dan dibuang di TPA Kawatuna. Dinas Lingkungan Hidup (DLH) Kota Palu mengestimasi jumlah sampah yang terangkut ke TPA pada tahun 2020 mencapai 227.136 m³ yang berasal dari delapan kecamatan di Kota Palu. Jumlah penduduk Kota Palu pada tahun 2020 yaitu 373.218 jiwa dengan rata-rata laju pertumbuhan penduduk yaitu 1,04% (BPS, 2021).

Emisi Baseline

Emisi *baseline* (BE) merupakan emisi yang terjadi tanpa adanya proyek pemulihan gas CH₄ atau *business as usual* (BAU). Sumber emisi *baseline* dari proyek ini yaitu gas CH₄ yang dihasilkan oleh tumpukan sampah di TPA Kawatuna yang dibiarkan membusuk dan tanpa perlakuan apapun. *BE_y* diformulasikan sebagai berikut:

$$BE.MSWL_{CH_4,y} = \phi_y \times (1 - f_y) \times GWP_{CH_4} \times \sum_{x=1}^y Default_x \times W_x \dots \dots (2)$$

- Keterangan:
- BE.MSWL_{CH₄,y}*: emisi gas CH₄ pada *baseline* yang terjadi pada tahun *y* yang dihasilkan dari pembuangan sampah di TPA Kawatuna selama periode waktu yang berakhir pada tahun *y* (t CO₂e),
- φ_y* : faktor koreksi model untuk memperhitungkan ketidakpastian model untuk tahun *y*,
- f_y* : sebagian gas CH₄ ditangkap di TPA dan dibakar, atau digunakan dengan cara lain

- yang mencegah emisi gas CH₄ ke atmosfer pada tahun *y*,
- GWP_{CH_4} : potensi pemanasan global untuk CH₄ (t CO₂e / t CH₄),
- $Default_x$: nilai standar di tahun *x* yang tergantung pada properti sampah dan zona iklim,
- W_x : jumlah sampah padat yang dibuang di TPA Kawatuna pada tahun *x* (t).

Emisi *baseline* diestimasi dengan mengembangkan tiga skenario yaitu skenario BAU, skenario I, dan skenario II. Skenario BAU mengestimasi emisi *baseline* tanpa memperhitungkan laju pertumbuhan penduduk, skenario I diestimasi dengan memperhitungkan laju pertumbuhan penduduk, sedangkan skenario II diestimasi dengan memperhitungkan laju pertumbuhan penduduk dan diperlambat dengan upaya pengurangan jumlah sampah ke TPA. Laju pertumbuhan tersebut diestimasi melalui persamaan berikut:

$$r = \left(\frac{P_t}{P_0}\right)^{\frac{1}{t}} - 1 \dots\dots\dots(3)$$

Keterangan:

- r* : laju pertumbuhan penduduk (%),
- P_t* : jumlah penduduk pada tahun *t* (jiwa),
- P₀* : jumlah penduduk pada tahun awal (jiwa),
- t* : selisih periode waktu antara tahun awal dan tahun *t* (dalam tahun).

Emisi Proyek

Emisi proyek mengacu pada emisi yang berpotensi dihasilkan ketika proses pengolahan gas CH₄. Proses pemulihan gas CH₄ menjadi energi listrik dapat menghasilkan emisi proyek yang terdiri dari emisi gas CO₂ dari bahan bakar fosil atau listrik yang digunakan oleh fasilitas proyek, *flaring* atau pembakaran aliran gas, dan dari proses peningkatan gas TPA. Emisi proyek mengikuti metodologi dari CDM-UNFCCC untuk "Pemulihan Gas CH₄ TPA versi 10.0", sebagai berikut (UNFCCC, 2020):

$$PE_y = PE_{power_y} + PE_{flare_y} + PE_{process_y} \dots\dots(4)$$

Keterangan:

- PE_y : emisi proyek pada tahun *y* (t CO₂e),
- PE_{power_y} : emisi dari penggunaan bahan bakar fosil atau listrik untuk pengoperasiannya dari fasilitas terpasang di tahun *y* (t CO₂e),
- PE_{flare_y} : emisi dari pembakaran aliran gas TPA masuk tahun *y* (t CO₂e),
- $PE_{process_y}$: emisi dari proses peningkatan gas TPA pada tahun *y* (t CO₂e).

Emisi proyek dari penggunaan bahan bakar fosil/listrik dalam pengoperasian proyek, digunakan metodologi CDM-UNFCCC untuk "emisi dasar, proyek dan/atau kebocoran dari konsumsi listrik dan pemantauan pembangkit listrik (*Baseline, project and/or leakage emissions from electricity*

consumption and monitoring of electricity generation) versi 03.0" sebagai berikut:

$$PE_{power,y} = \sum EC_{PJ,j,y} \times EF_{EF,j,y} \times (1 + TDL_{j,y}) \dots\dots\dots(5)$$

Keterangan:

- $EC_{PJ,j,y}$: kuantitas listrik yang dikonsumsi oleh proyek sumber *j* pada tahun *y* (MWh/tahun),
- $EF_{EF,j,y}$: faktor emisi untuk pembangkit listrik sumber *j* pada tahun *y* (t CO₂/MWh),
- $TDL_{j,y}$: kerugian transmisi dan distribusi teknis rata-rata untuk penyediaan listrik untuk sumber *j* di tahun *y*.

Emisi proyek dari pembakaran aliran gas pada proyek, digunakan metodologi CDM- UNFCCC untuk "emisi proyek dari pembakaran (*project emissions from flaring*) versi 03.0" sebagai berikut:

$$PE_{flare,y} = GWP_{CH_4} \times \sum_{m=1}^{525600} F_{CH_4,RG,m} \times (1 - \eta_{flare,m}) \times 10^{-3} \dots\dots(6)$$

Keterangan:

- GWP_{CH_4} : pemanasan global untuk gas CH₄ (t CO₂e / t CH₄),
- $F_{CH_4,RG,m}$: aliran massa CH₄ dalam gas sisa dalam menit. *m*.(kg),
- $\eta_{flare,m}$: efisiensi *flare* dalam menit. *m*.

2.2 Perhitungan Penerimaan CER Proyek

Proyek PLTBg merupakan proyek *multi-output* yang berpotensi menghasilkan penerimaan dari penjualan listrik yang dihasilkan dan penerimaan CER melalui mekanisme CDM. Namun, penelitian ini hanya memperhitungkan sebagian dari potensi penerimaan yaitu penerimaan CER. Proyek CDM dapat menghasilkan penerimaan dari setiap t CO₂e yang berhasil direduksi melalui penjualan karbon atau CER. Penerimaan CER proyek pemulihan gas CH₄ di TPA Kawatuna diperoleh dengan mengalikan jumlah reduksi GRK dari proyek pemulihan gas CH₄ dengan nilai jual kredit karbon. Nilai CER tahun *y* (CER_y) dihitung dengan formula berikut:

$$CER_y = ER_y \times HK \dots\dots\dots(7)$$

Keterangan:

- ER_y : jumlah reduksi GRK pada tahun *y* (t CO₂e),
- HK : nilai jual kredit karbon (Rupiah/ t CO₂e).

CER_y dihitung dalam kurun waktu 2021-2030 dan nilai akumulasinya dapat menunjukkan rasio penerimaan CER terhadap biaya implementasi proyek. Pada penelitian ini biaya implemetasi yang diperhitungkan terbatas pada biaya investasi awal pelaksanaan proyek pada tahun 2013. CER_y yang akan diperoleh dihitung dalam *present value*, dengan teknik *discounting* sebagai berikut.

$$PV\ CER = \frac{FV\ CER}{(1+r)^n} \dots\dots\dots(8)$$

Keterangan:

- PVCER : *present value* CER (rupiah),
- FVCER : *future value* CER (rupiah),
- r : *discount rate* (%),
- n : selisih tahun sekarang dan tahun *t*.

Sementara itu, *compounding* digunakan untuk mengestimasi *present value* dari biaya investasi proyek pada tahun 2013, sebagai berikut:

$$FVI = PVI (1 + r)^n \dots\dots\dots(9)$$

Keterangan:

- PVI : *present value* investasi (rupiah),
- FVI : *future value* investasi (rupiah),

Discount rate menggunakan suku bunga obligasi negara yang merupakan salah satu Surat Utang Negara (SUN) yang bebas risiko. Berdasarkan seri SBR007, suku bunga obligasi Pemerintah Indonesia yaitu sebesar 7,5% (UNFCCC, 2020). *Present value* yang diperoleh kemudian dikonversi ke dalam besaran rupiah. Nilai kurs Euro terhadap Rupiah yang digunakan yaitu sebesar Rp 16.964,9876 per 29 maret 2021 (Valutafx, 2021).

Proyek PLTBg merupakan proyek *multi-output* yang berpotensi menghasilkan manfaat ekonomi berupa penghematan pembelian listrik ataupun penerimaan dari penjualan listrik. Gas CH₄ yang dihasilkan akan diolah menjadi energi listrik terbarukan untuk dibagikan secara gratis ke masyarakat ataupun dijual kepada pihak Perusahaan Listrik Negara (PLN) sesuai dengan harga per kWh yang berlaku untuk masing-masing kapasitas listrik yang dihasilkan. Estimasi potensi penerimaan dari penjualan listrik diestimasi dengan mengalikan potensi listrik yang dihasilkan dengan nilai jual listrik per kWh yang berlaku. Potensi penerimaan dari penjualan listrik pada tahun *y*, *PL_y*, diestimasi sebagai berikut:

$$PL_y = KL_y \times HL \dots\dots\dots(10)$$

Keterangan:

- KL_y : kuantitas listrik yang dihasilkan pada tahun *y* (kWh),
- HL : harga jual listrik (Rp/kWh).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Potensi Emisi GRK Sebelum Adanya Proyek Pemulihan Gas CH₄

3.1.1 Tumpukan Sampah di TPA Kawatuna

Jumlah tumpukan sampah di TPA Kawatuna sejak tahun 2011 hingga 2020 diperkirakan mencapai 561.200 ton. Nilai ini diestimasi berdasarkan jumlah sampah yang berhasil terangkut ke TPA Kawatuna dalam setiap tahunnya pada kurun waktu tersebut. Pada tahun 2030, akumulasi jumlah tumpukan sampah di TPA Kawatuna diperkirakan mencapai 1,12 juta ton. Rincian estimasi jumlah sampah di TPA Kawatuna pada tahun 2011 sampai dengan tahun 2030 dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Estimasi jumlah sampah terangkut tahun 2011–2030

Tahun	Jumlah armada (unit)	Total sampah terangkut (ton)
2011	28	32.425
2012	28	48.833
2013	29	55.011
2014	36	60.004
2015	39	62.705
2016	39	63.125
2017	39	69.894
2018	38	55.480
2019	39	56.940
2020	39	56.784
2021	38	55.480*
2022	38	55.480*
2023	38	55.480*
2024	38	55.328*
2025	38	55.480*
2026	38	55.480*
2027	38	55.480*
2028	38	55.328*
2029	38	55.480*
2030	38	55.480*

Keterangan: *: data proyeksi

Sumber: Data primer BPS Kota Palu (2014, 2017) dan hasil perhitungan (2021)

Jumlah tumpukan sampah di TPA Kawatuna untuk tahun 2018 hingga 2030 sangat bergantung pada jumlah truk pengangkut sampah, kapasitas truk (sampah terangkut), dan jumlah perjalanan. Berdasarkan hasil survei, setiap truk pengangkut sampah mampu mengangkut sampah sebanyak 4 rit/hari dengan kapasitas 4 m³ dalam sekali angkut. Sehingga setiap truk mengangkut sampah sebanyak 16 m³ atau setara dengan empat ton dalam setiap harinya. Hal ini didasarkan pada asumsi nilai konversi 1 m³ sampah yaitu setara dengan 0,25 ton (Ardiagarini *et al.*, 2013).

Jumlah sampah dari 373.218 penduduk Kota Palu yang berhasil terangkut ke TPA Kawatuna pada tahun 2020 diestimasi mencapai 56.784 ton sampah. Hal ini menunjukkan bahwa rata-rata sampah yang berhasil terangkut dari setiap individu adalah 0,15 ton dalam setiap tahun. Berdasarkan Standar Nasional Indonesia (SNI), estimasi timbunan sampah per kapita untuk kota sedang yaitu 0,5 kg/orang/hari atau setara dengan 0,18 ton sampah dalam setahun (BAPPENAS, 2014).

3.1.2 Emisi Sebelum Ada Proyek

Perhitungan emisi *baseline* diestimasi pada kondisi tidak dilakukan monitoring terhadap komposisi sampah di TPA Kawatuna. Perhitungan emisi ini diestimasi dengan mempertimbangkan tiga skenario yaitu: (1) skenario business as usual (BAU); (2) skenario I, dan; (3) skenario II. Skenario BAU mengestimasi tingkat emisi baseline dengan skenario tanpa adanya intervensi kebijakan dan teknologi mitigasi dalam kurun waktu yang telah disepakati. Skenario ini berpotensi menghasilkan emisi GRK sebesar 16.148,74 t CO₂e pada tahun 2021 dan mencapai 167.625,53 t CO₂e pada tahun 2021 hingga 2030. Emisi yang timbul berasal dari total timbunan sampah di TPA Kawatuna pada tahun 2011 hingga 2030 yang diestimasi mencapai 1,12 juta ton sampah.

Peningkatan jumlah penduduk dalam setiap tahunnya memiliki hubungan positif terhadap produksi sampah. Pada

skenario I, emisi *baseline* yang dihasilkan oleh TPA Kawatuna dipengaruhi oleh laju pertumbuhan penduduk Kota Palu. Laju pertumbuhan penduduk Kota Palu selama tahun 2010 sampai dengan 2020 yaitu sebesar 1,04% per tahun. Perhitungan didasarkan pada data hasil sensus tahun 2010 dengan jumlah penduduk yaitu, 336.532 jiwa data hasil sensus tahun 2020 dengan jumlah penduduk, yaitu 373.218 jiwa (Wahyono, 2014). Berdasarkan hal tersebut, skenario I berpotensi menghasilkan emisi *baseline* mencapai 167.719,50 t CO₂e pada tahun 2021 hingga 2030.

Terjadi perubahan emisi baseline dari 167.625,53 t CO₂e pada skenario BAU menjadi 167.719,50 t CO₂e pada skenario I. Hal ini menunjukkan bahwa terjadi peningkatan emisi sebesar 93,37 t CO₂e dari skenario BAU. Peningkatan emisi ini disebabkan oleh peningkatan jumlah timbunan sampah di TPA Kawatuna sebesar 6.224 ton dari total timbunan sampah pada skenario BAU.

Guna mengatasi masalah peningkatan jumlah sampah akibat peningkatan jumlah penduduk, Pemerintah Indonesia melalui Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Nomor: 21/PRT/M/2006 tentang Kebijakan dan Strategi Nasional Pengembangan Sistem Pengelolaan Persampahan (KSNP-SPP) telah menetapkan target dalam upaya pengurangan jumlah sampah ke TPA, yaitu sebesar 20%. Target ini dapat dicapai melalui pengelolaan dan pengolahan sampah di tingkat individu hingga skala kecamatan melalui program TPS *Reduce, Reuse, Recycle* (3R) atau disebut TPS3R, sebagaimana yang sedang dicanangkan oleh pemerintah Kota Palu. Pengurangan ini perlu dilakukan mengingat keterbatasan kapasitas TPA Kawatuna dalam menampung sampah.

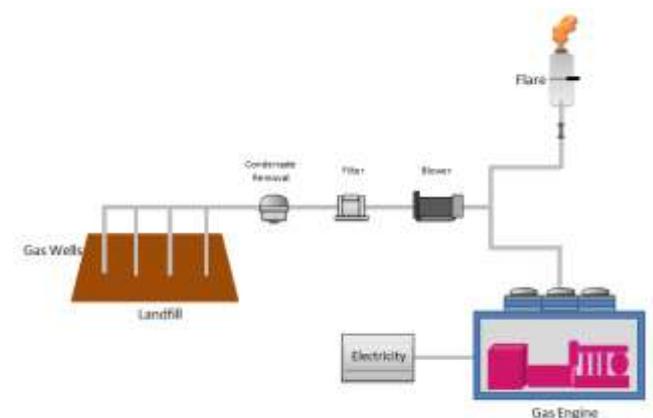
Bila target pengurangan sampah ke TPA tercapai, maka emisi baseline melalui skenario II pada tahun 2021 hingga 2030 adalah 165.983,37 t CO₂e. Hal ini menunjukkan bahwa skenario II menghasilkan emisi baseline yang lebih kecil dibandingkan dengan skenario BAU dan skenario I. Penurunan emisi baseline pada skenario II terhadap skenario BAU dan skenario I berturut-turut adalah 1642,16 t CO₂e. dan 1736,14 t CO₂e. Penurunan emisi ini disebabkan oleh penurunan jumlah timbunan sampah di TPA Kawatuna sebesar 106.072 ton dari skenario I dan 112.296 ton dari skenario II.

Merujuk metode CDM tool 04.0 versi 08.0, emisi baseline yang dihasilkan oleh TPA Kawatuna dipengaruhi oleh jumlah timbunan sampah dan lama waktu timbunan sampah tersebut. Semakin lama sampah tertimbun di TPA maka akan semakin besar potensi jumlah gas CH₄ yang dihasilkan dan efek buruk terhadap lingkungan yang ditimbulkan.

3.2 Potensi Reduksi Emisi GRK Setelah Adanya Proyek

Pengembangan proyek pemulihan gas CH₄ di TPA melalui pemanfaatan gas CH₄ menjadi energi listrik atau dikenal dengan PLTBg merupakan salah satu cara efektif untuk mengurangi emisi GRK. Proyek PLTBg di TPA Kawatuna terdiri dari stasiun biogas dan *gas engine*. Perusahaan Swedia Biogas System AB menjadi penanggung jawab dalam menyuplai dan menginstalasi teknologi PLTBg di TPA Kawatuna. Stasiun biogas memungkinkan pengumpulan gas CH₄ yang timbul secara spontan dari proses dekomposisi sampah di TPA Kawatuna. Sedangkan

gas engine digunakan dalam proses perubahan gas CH₄ menjadi energi listrik. Melalui proyek ini, Pemerintah Kota Palu berharap dapat mengurangi emisi gas CH₄ ke atmosfer dan menciptakan energi listrik terbarukan yang ramah lingkungan.



Gambar 1. Skematisasi proyek PLTBg di TPA Kawatuna

Proses pemulihan gas CH₄ di TPA Kawatuna dimulai dengan mengumpulkan gas CH₄ yang dihasilkan oleh tumpukan sampah di TPA melalui pipa vertikal dan horizontal yang telah terpasang. Gas tersebut sebelumnya akan diproses untuk menghilangkan kondensat, partikulat, dan pengotor lainnya. Pemulihan gas CH₄ di TPA Kawatuna dilakukan melalui dua cara yaitu diolah menjadi energi listrik melalui *gas engine* dan dibakar untuk diubah menjadi emisi terendah berbentuk CO₂. Skematisasi proyek PLTBg di TPA Kawatuna disajikan pada Gambar 1.

Emisi Setelah Adanya Proyek

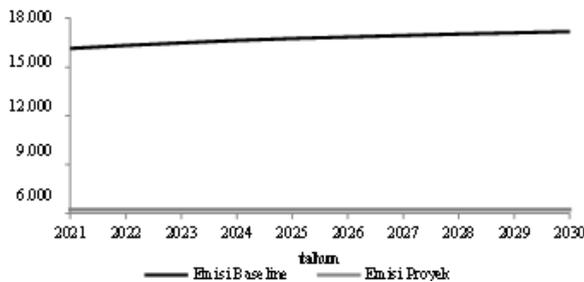
Emisi Proyek (PE) terdiri atas emisi GRK yang dihasilkan saat proyek pemulihan gas CH₄ di TPA Kawatuna berlangsung. Pada penelitian ini, emisi yang diperhitungkan berasal dari penggunaan listrik untuk pengoperasian mesin PLTBg dan pembakaran aliran gas TPA. Emisi yang dihasilkan dari penggunaan bahan bakar dan listrik dari proyek (*PEpower*) PLTBg di TPA Kawatuna bernilai nol.

Emisi proyek dari pembakaran aliran gas TPA (*PE flare*) diestimasi mencapai 62.389 t CO₂e pada tahun 2021 hingga 2030. Emisi ini dipengaruhi oleh aliran massa CH₄ dalam gas sisa. Berdasarkan hasil perhitungan, diketahui bahwa aliran massa CH₄ dalam gas sisa yang dihasilkan di TPA Kawatuna yaitu sebesar 445.267 kg/tahun dengan lama waktu pengoperasian mesin *flare* di TPA Kawatuna yaitu 8 jam/hari kerja atau 240 jam dalam setiap tahunnya.

Potensi Reduksi Emisi GRK

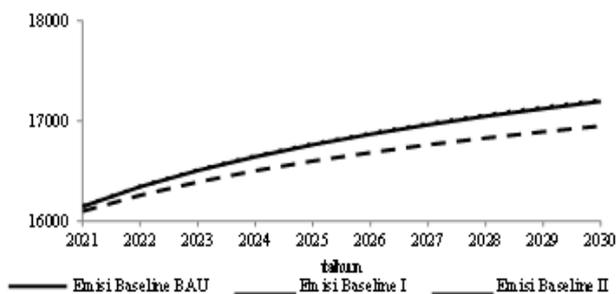
Potensi reduksi emisi GRK diestimasi dengan pengurangan emisi *baseline* dengan emisi proyek secara tahunan. Potensi reduksi emisi GRK melalui skenario BAU yaitu mencapai 9.914,99 t CO₂e pada tahun 2021. Melalui skenario ini, diketahui bahwa proyek PLTBg di TPA Kawatuna berpotensi menurunkan emisi GRK mencapai 105.236,18 t CO₂e atau 63% dari emisi yang dihasilkan pada kondisi BAU pada tahun 2021 hingga 2030. Nilai reduksi emisi GRK meningkat secara bertahap dalam setiap tahunnya

yaitu sebesar 9.914,99 t CO₂e pada tahun 2021 menjadi 10.964,28 t CO₂e pada tahun 2030. Hal ini disebabkan oleh peningkatan emisi *baseline* dari 16.148,74 t CO₂e pada tahun 2021 menjadi 17.198,02 t CO₂e pada tahun 2030. Berbeda dengan emisi *baseline*, emisi proyek pada tahun 2021 dan 2030 menunjukkan angka yang tetap yaitu sebesar 6.233,74 t CO₂e. Nilai potensi reduksi emisi GRK dengan skenario BAU diilustrasikan pada Gambar 2.



Gambar 2 Potensi reduksi GRK skenario BAU

Penerapan skenario I dan II memungkinkan terjadinya potensi reduksi emisi GRK yang masing-masing mencapai 9.917,62 t CO₂e dan 9.868,12 t CO₂e pada tahun 2021. Karena jumlah listrik yang digunakan dan pengoperasian mesin *flare* pada ketiga skenario diasumsikan sama, maka besar emisi proyek pada skenario BAU, skenario I, dan skenario II juga sama. Sehingga, perbedaan ketiga skenario tersebut hanya terletak pada emisi *baseline*. Oleh karena itu, untuk melihat lebih detail perbedaan dari ketiga skenario tersebut, emisi *baseline* dari skenario BAU, skenario I, dan skenario II (lihat Gambar 3).



Gambar 3. Emisi *baseline* dari skenario BAU, skenario I, dan skenario II

Gambar 3 menunjukkan bahwa garis *baseline* untuk skenario BAU dan skenario I berhimpitan yang menunjukkan bahwa kedua skenario tersebut hanya memiliki sedikit perbedaan nilai. Reduksi emisi yang dihasilkan skenario I lebih tinggi dari skenario BAU dengan selisih 97,37 t CO₂e. Hal ini mengindikasikan bahwa pertumbuhan penduduk Kota Palu tidak memiliki pengaruh besar dalam peningkatan emisi GRK di TPA Kawatuna. Perbedaan reduksi yang kecil ini karena asumsi laju pertumbuhan penduduk yang kecil dalam setiap tahunnya, yaitu 1,04%. Laju pertumbuhan penduduk juga diasumsikan konstan hingga tahun 2030, namun masih ada kemungkinan terjadi pertumbuhan penduduk yang lebih tinggi dibandingkan asumsi tersebut.

Terkait skenario II, garis *baseline*nya berada di bawah garis skenario BAU dan skenario I. Artinya, terjadi penurunan nilai reduksi emisi GRK yaitu sebesar 1.642,16 t CO₂e terhadap

skenario BAU dan 1.736 t CO₂e terhadap skenario I. Hal ini menunjukkan bahwa upaya pengurangan sampah ke TPA Kawatuna sebesar 20% mampu menekan jumlah emisi yang disebabkan oleh pertumbuhan penduduk dan memiliki dampak positif terhadap pengurangan emisi GRK yang dihasilkan oleh TPA Kawatuna.

Skenario BAU, skenario I, maupun skenario II masing-masing memiliki potensi dalam mereduksi emisi GRK yang timbul di TPA Kawatuna. Besar kecilnya reduksi emisi GRK dari ketiga skenario dipengaruhi oleh emisi *baseline* dan emisi proyek yang dihasilkan. Potensi reduksi emisi GRK dari ketiga skenario pada tahun dasar, yaitu tahun 2021 disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Ringkasan potensi reduksi GRK dari tiga skenario pada tahun 2021

Skenario Proyek	t CO ₂ e			Persen reduksi emisi (PER) (%)
	Emisi <i>baseline</i>	Emisi proyek	Reduksi emisi	
Skenario BAU	16.148,74	6.233,74	9.914,99	61,40
Skenario I	16.151,36	6.233,74	9.917,62	61,40
Skenario II	16.101,86	6.233,74	9.868,12	61,29

Proyek PLTBg berpotensi mereduksi emisi GRK mencapai 61,40% dari total emisi yang dihasilkan oleh TPA Kawatuna. Pelaksanaan proyek mampu memberikan kontribusi pengurang emisi GRK mencapai 80% dari target sektor pengelolaan limbah atau sebesar 0,28% dari target RAD-GRK Provinsi Sulawesi Tengah. Tidak sampai disitu, proyek PLTBg ini juga mendukung terciptanya kehidupan yang berkelanjutan dengan terpenuhinya tujuan SDGs nomor 12 dalam pengelolaan limbah khususnya yang berasal dari TPA. Hasil penelitian sejalan dengan hasil penelitian Wahyono (2014) di mana proyek pemulihan gas CH₄ melalui sistem pembakaran gas TPA (*flaring*) di empat TPA yaitu TPA Sumur Batu (Bekasi), TPA Tamangapa (Makassar), TPA Batu Layang (Pontianak), dan TPA Sukawintan (Palembang) memiliki potensi dalam menurunkan emisi GRK (Wahyono, 2014). Namun, potensi reduksi GRK dari TPA Kawatuna lebih kecil jika dibandingkan reduksi dari empat TPA tersebut, di mana masing-masing TPA memiliki potensi reduksi GRK berkisar antara 59–68% dalam setiap tahunnya. Hal ini dikarenakan adanya perbedaan skala proyek dan jenis teknologi yang digunakan dalam mereduksi emisi GRK. Sementara dengan teknologi aerasi *in situ*, salah satu TPA di Jerman Utara berpotensi mereduksi emisi GRK yang mencapai 83–95% (Ritskowski & Steghmann, 2010).

3.3 Perhitungan Penerimaan CER dari Proyek Pemulihan Gas CH₄

Perhitungan total penerimaan CER dari proyek PLTBg di TPA Kawatuna dilakukan dengan menggunakan dua kemungkinan nilai jual CER di pasaran dunia, yaitu nilai maksimum dan minimum dalam skenario BAU, skenario I, dan skenario II. Hal ini dilakukan untuk memberikan kisaran nilai penerimaan CER proyek. Berdasarkan data ICE *Futures Europe* (2021), tren nilai jual CER pada tahun 2019 hingga tahun 2021 menunjukkan nilai yang berfluktuatif namun cenderung meningkat. Nilai jual minimum CER adalah €0,17/t CO₂e yang terjadi pada 13 November 2019 dan nilai

jual maksimum CER adalah €0,43/t CO₂e yang terjadi pada 19 Maret 2021 (ICE, 2021). Berdasarkan kedua nilai tersebut, nilai *present value* dari total penerimaan CER dalam setiap

tahunnya yang dihasilkan oleh tiga skenario disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Nilai total penerimaan CER dihitung pada tahun 2021

Tahun	<i>Present Value (PV) (juta rupiah)</i>					
	Skenario BAU		Skenario I		Skenario II	
	minimum	maksimum	minimum	maksimum	minimum	maksimum
2021	28,60	72,33	28,60	72,35	28,46	71,99
2022	27,13	68,62	27,14	68,65	26,90	68,04
2023	25,64	64,86	25,66	64,90	25,35	64,13
2024	24,23	61,30	24,25	61,35	23,90	60,46
2025	22,74	57,53	22,76	57,58	22,39	56,63
2026	21,37	54,05	21,39	54,11	21,00	53,11
2027	20,05	50,72	20,08	50,78	19,67	49,77
2028	18,85	47,67	18,87	47,73	18,47	46,71
2029	17,62	44,56	17,64	44,61	17,24	43,60
2030	16,49	41,72	16,51	41,77	16,12	40,78
Total	222,72	563,36	222,91	563,82	219,50	555,22

Keterangan: minimum: €0,17/t CO₂e, maksimum: €0,43/t CO₂e

Penerimaan CER terendah diperoleh melalui skenario BAU dalam kondisi minimum dan penerimaan CER tertinggi diperoleh melalui skenario I dalam kondisi maksimum. Penerimaan CER dari skenario BAU, skenario I, dan skenario II terus menurun dalam setiap tahunnya karena peningkatan emisi *baseline*. Penelitian ini sejalan dengan hasil penelitian di PKS Pinang Tinggi dan PKS Tanjung Lebar dimana pelaksanaan proyek pemulihan gas CH₄ dari limbah cair dengan mekanisme CDM dapat menghasilkan penerimaan dari CER (Febijanto, 2010). Namun, potensi penerimaan CER yang dihasilkan dari proyek PLTBg di TPA Kawatuna lebih kecil jika dibandingkan proyek PLTBg di PKS Pinang Tinggi dan PKS Tanjung Lebar karena adanya perbedaan jumlah potensi reduksi emisi GRK. Selain itu, perbedaan dalam penetapan harga jual karbon menjadi alasan lain dalam besaran penerimaan CER yang dihasilkan. Nilai jual CER pada penelitian ini mengacu pada data ICE, sedangkan penelitian Febijanto (2010) menggunakan nilai asumsi, yaitu 10 Euro untuk setiap pengurangan t CO₂e.

Proyek PLTBg di TPA Kawatuna pernah beroperasi pada tahun 2013 dan membutuhkan biaya investasi awal sebesar SEK 5.400.000 (Rp 8,95 Milyar) (SIDA, 2013). Apabila pada tahun 2021 proyek tersebut akan dioperasikan kembali, maka estimasi biaya untuk re-investasi adalah sebesar Rp 15,97 Milyar. Hal ini didasarkan pada nilai kurs SEK terhadap Rupiah yaitu sebesar Rp 1.658,11 per 29 Maret 2021. Selain biaya investasi di awal proyek, pengoperasian kembali

proyek tersebut membutuhkan biaya operasional yang dikeluarkan dalam setiap tahunnya berupa biaya *spare part* yang diasumsikan sebesar 2,80% dari biaya investasi awal, dan biaya pemeliharaan diasumsikan sebesar 0,15% dari biaya investasi awal (Astha *et al.*, 2018). Upah tenaga kerja mencakup gaji manajer, gaji staf proyek, dan gaji teknisi proyek didasarkan pada UMR Kota Palu pada tahun 2021. Kenaikan gaji diasumsikan sebesar 7,10% dalam setiap tahun berdasarkan rata-rata peningkatan UMR dalam kurun waktu lima tahun terakhir. Rician biaya operasional proyek disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Rician biaya operasional proyek tahunan

No	Komponen biaya	Volume	Biaya/tahun (Rp)
1.	Biaya <i>spare part</i>	1 unit	447.128.844
2.	Biaya pemeliharaan	1 unit	23.953.331
3.	Gaji manajer	1 orang	67.567.884
4.	Gaji staf	2 orang	81.789.600
5.	Gaji teknisi	3 orang	96.241.968

Biaya total proyek yang dibutuhkan dalam pelaksanaan proyek hingga sepuluh tahun ke depan diestimasi mencapai Rp 22,25 Milyar. Biaya total proyek mencakup biaya investasi awal sebesar Rp 15,97 Milyar dan biaya operasional proyek yang dibutuhkan sejak tahun 2021-2030 sebesar Rp 6,28 Milyar. Rasio penerimaan CER dari tiga skenario terhadap biaya total proyek disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Ringkasan PVCER dan persentase PVCER terhadap biaya total proyek pada tahun 2021 untuk tiga skenario

Skenario	PVCERmaks (juta Rp)	PVCERmaks (juta Rp)	Persentase PVCERmin terhadap biaya total proyek (%)	Persentase PVCERmax terhadap biaya total proyek (%)
Skenario BAU	222,72	563,36	1,00	2,53
Skenario I	222,91	563,82	1,00	2,53
Skenario II	219,50	555,22	0,99	2,50

Tabel 5 menunjukkan CER hanya mampu menutupi 0,99% sampai 2,53% dari biaya awal investasi proyek. Hal ini menunjukkan bahwa biaya implementasi proyek jauh lebih besar dibandingkan dengan potensi penerimaan CER jika proyek PLTBg di TPA Kawatuna dihidupkan kembali maka pendapatan dari CER hingga 2030 tidak akan menutupi biaya yang dikeluarkan untuk pelaksanaan proyek. Namun demikian, penerimaan CER hanya merupakan bagian kecil dari manfaat yang akan diperoleh. Salah satu manfaat tersebut ialah nilai finansial dari energi listrik yang dihasilkan oleh proyek. Potensi volume gas CH₄ dan daya

listrik yang dapat dihasilkan melalui proyek PLTBg di TPA Kawatuna pada tahun 2021 disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6 menunjukkan gambaran rasional dari potensi energi listrik yang dihasilkan melalui proyek PLTBg di TPA Kawatuna, di mana hanya mampu mengalirkan listrik dengan kapasitas 184,69 kW/rumah untuk 20 rumah pemulung yang berada di area TPA Kawatuna. Sehingga, manfaat ekonomi dari penghematan listrik diestimasi sebesar Rp 59.927.186/tahun dengan asumsi harga listrik per 1 kWh listrik sebesar Rp 1.352 untuk kapasitas 450–900 watt dengan penggunaan rata-rata listrik 12 jam per hari (pukul 6 petang-pagi).

Tabel 6. Potensi volume gas CH₄ dan daya listrik yang dihasilkan TPA Kawatuna tahun 2021

No	Keterangan	Jumlah	Satuan	Sumber informasi
1.	Jumlah gas CH ₄ yang dibutuhkan	27,77	m ³ /jam	Biogass System AB (2021)
2.	Akumulasi emisi baseline	132.275,97	t CO ₂ e/tahun	Estimasi
3.	Volume CH ₄ (3)=((2)/28*1000)/massa jenis CH ₄	7.190.474,35	CH ₄ m ³ /tahun	Hasil Perhitungan
4.	Potensi daya listrik yang dihasilkan (4)=((3)/8760)*4,50	3.693,74	kW/jam	

Estimasi potensi listrik dari penelitian ini jauh lebih kecil jika dibandingkan dengan estimasi Astha *et al.* (2018) dimana proyek PLTBg di TPA Kawatuna pada tahun 2013 berpotensi melayani 2.500 rumah dengan kapasitas masing-masing 1.300 watt (Astha *et al.*, 2018). Pemerintah Kota Palu juga memproyeksikan bahwa melalui proyek PLTBg di TPA Kawatuna berpotensi mengaliri listrik ke 2.780 rumah dengan kapasitas masing-masing 900-1.300 watt (UNFCCC, 2016). Potensi listrik yang terbatas dapat dikatakan rasional mengingat masih kecilnya kapasitas mesin pembangkit listrik yang terinstalasi di TPA Kawatuna.

Potensi listrik dari PLTBg juga telah banyak diulas pada beberapa kajian. Salah satunya oleh Slamet *et al.* (2020) yang mengestimasi potensi penjualan listrik TPA Manggar, di Balikpapan sebesar Rp 164,55 Milyar pada tahun 2020 (Slamet *et al.*, 2020). Berdasarkan kalkulasi tersebut diketahui bahwa proyek gas TPA berpotensi memberikan manfaat ekonomi dari energi listrik yang dihasilkan selain dengan mengandalkan penerimaan CER. Hal ini dipertegas oleh Plochl *et al.* (2008) yang mengemukakan bahwa penjualan energi listrik yang dihasilkan oleh proyek gas TPA melalui ACM0001 ke institusi privat akan lebih menarik secara finansial bahkan tanpa penerimaan CER (Plochl, 2008). Rahman *et al.* (2015) juga telah memperjelas bahwa proyek CDM *multi-output* memiliki biaya proyek yang lebih besar dari penerimaan CER yang dihasilkan, sehingga proyek berbasis sumber energi terbarukan penerimaan CERnya tidak dapat dipisahkan dari penerimaan produk sampingannya (Rahman & Kirkman, 2015).

Selain itu, manfaat lain PLTBg Kawatuna yang belum diestimasi adalah perbaikan kualitas lingkungan dan berkurangnya penyakit akibat perbaikan tersebut. Tidak hanya itu, pelaksanaan proyek PLTBg di TPA Kawatuna akan membantu pencapaian target SDGs nomor 12.4 mengenai pengolahan limbah dan bahan kimia melalui pemulihan gas CH₄ yang timbul akibat tumpukan sampah di TPA Kawatuna. Untuk itu, pengembangan proyek PLTBg di TPA Kawatuna

perlu dipertimbangkan oleh Pemerintah Kota Palu sebagai salah satu program dalam pencapaian target RAD-GRK. Berdasarkan hal tersebut, ide pemerintah Kota Palu untuk menghidupkan kembali proyek PLTBg di TPA Kawatuna masih menjadi hal yang perlu dipertimbangkan karena masih memungkinkan untuk dilakukan dan masih memberikan manfaat positif dari aspek lingkungan, sosial, dan ekonomi.

Pengaktifan kembali proyek PLTBg akan mendukung tercapainya visi Kota Palu, yaitu “Membangun Kota Palu yang mandiri, aman dan nyaman, tangguh, serta profesional dalam konteks pembangunan berkelanjutan berbasis kearifan lokal dan keagamaan” melalui penciptaan lingkungan yang bersih dan nyaman. Hal ini sejalan dengan misi nomor ke dua, yaitu “Membangun kembali tatanan lingkungan yang aman dan nyaman dengan dukungan infrastruktur yang berketahanan terhadap bencana.

Pengaktifan kembali proyek PLTBg di TPA Kawatuna perlu memperhatikan aspek-aspek yang akan mendukung keberhasilan proyek antara lain, yaitu aspek pendanaan proyek dan aspek kelembagaan proyek. Proyek PLTBg merupakan proyek yang membutuhkan dana dengan jumlah besar yang secara keseluruhan tidak dapat dipenuhi oleh dana APBD Kota Palu. Untuk itu diperlukan upaya dalam membangun kerjasama dengan pihak lain salah satunya melalui mekanisme CDM. Mekanisme ini memungkinkan tersedianya bantuan teknologi dan insentif dari penerimaan dari reduksi emisi GRK yang dihasilkan oleh proyek. Pelaksanaan proyek juga perlu didukung dengan sistem kelembagaan yang baik. Kepastian mengenai pihak yang bertanggung jawab dalam pelaksanaan proyek diperlukan untuk menghindari tumpang tindih kekuasaan dalam pelaksanaan proyek.

Berkaca pada pelaksanaan proyek pada tahun 2013, ketika dipelajari kembali tidak ada kepastian mengenai penanggung jawab utama proyek. Proyek PLTBg di TPA Kawatuna sebelumnya berada di bawah koordinasi tiga instansi pemerintah, yaitu Bappeda Kota Palu sebagai

fasilitator dalam pengembangan kerjasama dengan pemerintah Swedia dan memiliki peran dalam pelaksanaan proyek melalui penempatan manajer proyek yang merupakan salah satu pegawai instansi tersebut, DLH Kota Palu sebagai pihak yang mengatur pengangkutan dan pengolahan sampah di TPA Kawatuna yang dilimpahkan tanggungjawab mengenai operasional proyek, dan Dinas Pekerjaan Umum sebagai pihak yang bertanggung jawab mengenai infrastruktur TPA Kawatuna. Untuk itu, dalam mendukung keberhasilan proyek PLTBg di TPA Kawatuna, diperlukan penguatan dan pemisahan institusi regulator, dalam hal ini DLH Kota Palu dan institusi operator pelayanan proyek PLTBg berupa Unit Pelaksana Teknis Daerah (UPTD).

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan penelitian diperoleh tiga simpulan. Pertama, potensi emisi GRK yang dihasilkan oleh TPA Kawatuna tanpa proyek pemulihan gas CH₄ tahun 2021 adalah 16.148,74 t CO₂e (skenario BAU). Pada kurun waktu 2021-2030, emisi *baseline* dalam setiap tahunnya terus mengalami peningkatan hingga mencapai 17.198,02 t CO₂e melalui skenario BAU pada tahun 2030. Kedua, potensi reduksi emisi GRK dari proyek pemulihan gas CH₄ di TPA Kawatuna pada tahun 2021 adalah 9.914,99 t CO₂e (skenario BAU). Pada kurun waktu 2021-2030 persentase reduksi emisi GRK melalui tiga skenario berada pada kisaran 61,29% hingga 63,78%. Ketiga, potensi penerimaan CER dari proyek pemulihan gas CH₄ di TPA Kawatuna pada tahun 2021 adalah Rp 28.595.318 (asumsi nilai jual CER minimum) dan Rp 72.329.334 (asumsi nilai jual CER maksimum) pada skenario BAU. Pada rentang tahun 2021-2030, total *present value* penerimaan CER proyek diestimasi berada pada kisaran Rp 219.504.785 hingga Rp 563.823.327.

PERSANTUNAN

Terimakasih kepada Pemerintah Kota Palu, khususnya DLH Kota Palu yang telah mendukung kegiatan ini, sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Ardiagarini, S. P., Riman, A., & Kristina, H. J. (2013). Perhitungan harga pokok produk compressed natural gas dari landfill gas sebagai energi alternatif pada TPST Bantar Gebang, Bekasi. *Jurnal Teknik Industri*, 8(2), 107-116.
- Astha, Y., Altim, A., Saiful, & Malik, S. M. (2018). Waste Management in the kawatuna landfill site of Palu City. *Arcade*, (2)1: 1-11.
- Bank Indonesia. (2021). Suku bunga obligasi Pemerintah RI. <https://www.bi.go.id/id/publikasi/ruang-media/news-release/Pages/Suku-Bunga-Obligasi-Pemerintah-RI-Seri-SBR007-Periode-11-Januari-2021-s.d.-10-April-2021.aspx>. Diakses 29 Maret 2021.
- BAPPENAS. (2014). Pedoman teknis perhitungan baseline emisi gas rumah kaca sektor pengelolaan limbah. Badan Perencanaan Pembangunan Nasional (BAPPENAS), Jakarta.
- BPS. (2021). Hasil sensus penduduk 2020 Kota Palu. Badan Pusat Statistik Kota Palu (BPS), Palu.
- Febijanto, I. (2010). Potensi penangkapan gas metana dan pemanfaatannya sebagai bahan bakar pembangkit listrik di PTPN VI Jambi. *Jurnal ilmiah Tek. Energi*, 1 (10), 30-47.
- ICE. (2021). CER Daily Futures. theice.com/products/26238355/CER-Daily-Futures/data?marketid=1240279&span=3. Inter-Continental Exchange (ICE). Diakses 21 Maret 2021.
- KLHK. (2015). Statistik Direktorat Jenderal Pengendalian Perubahan Iklim. Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK), Jakarta.
- Nasution, L. C. (2016). Peran Australia dalam bidang pendidikan untuk mendukung kebijakan migration with dignity oleh Pemerintahan Kiribati (2006-2014). *Jurnal JOM FISIP*, 3(2), 1-15.
- PKDOD. (2018). Kajian strategi pemerintah daerah dalam menghadapi agenda perubahan iklim. Pusat Kajian dan Desentralisasi Otonomi Daerah (PKDOD).
- Plochl, C., & Wetzler W. (2008). Clean development mechanism: an incentive for waste management projects?. *Jurnal Waste Management & Research*, 26, 104-110.
- Pramudianto, A. (2016). Dari Kyoto Protocol 1997 hingga Paris Agreement 2015: Dinamika Diplomasi Perubahan Iklim Global dan ASEAN Menuju 2020. *Global*, 18(1), 76-94.
- Rahman, S. M., & Kirkman, G. A. (2015). Costs of certified emission reduction under the clean development mechanism of the Kyoto Protocol. *E-Jurnal Energy Economics*, 47, 129-14.
- Ritzkowski, M., & Steghmann, R. (2010). Generating CO₂-credits through landfill in situ aeration. *E- Jurnal Waste Management*, 30, 702-706.
- SIDA. (2013). Making waste valuable: landfill gas in Palu. Indonesia. https://www.sida.se/contentassets/2707a2d0e40341759eb8e7b85fcdc159/making-waste-valuable-landfill-gas-in-palu_3696.pdf
- Slamet, Kusuma, V. A., & Hasanah, B. (2020). Forecasting potensi energi gas metana menggunakan pembangkit listrik tenaga sampah pada TPA Manggar Balikpapan. *Jurnal JEECAE*, 5(2), 17-23.
- UNFCCC. (2008). Kyoto protocol reference manual on counting of emissions and assigned amount.
- UNFCCC. (2016). First nationally determined contribution Republic of Indonesia.
- UNFCCC. (2020). AMS-III.G.: Landfill methane recovery --- Version 10.0. <https://cdm.unfccc.int/methodologies/DB/0KHNES8D09H134V3TZDQ47C3LQL3H2>.
- UNFCCC. (2020). Methodological tools 04: Emission from

- solid waste disposal site. Retrieved from <https://cdm.unfccc.int/methodologies/PAmethodologies/tools/am-tool-04-v8.0.pdf>
- UNFCCC. (2020). Methodological tools 05. Baseline, project and/or leakage emissions from electricity consumption and monitoring of electricity generation. Version 03.0. <https://cdm.unfccc.int/methodologies/PAmethodologies/tools>
- UNFCCC. (2020). Tool 06. Project emissions from flaring. Version 03.0. <https://cdm.unfccc.int/methodologies/PAmethodologies/tools/am-tool-06-v3.0.pdf>
- Valutafx. (2021). Nilai tukar rupiah. <https://id.valutafx.com/> Diakses 29 Maret 2021.
- Wahyono, S. (2014). Proyek pengurangan emisi GRK dengan proses pembakaran (flaring) terhadap gas TPA studi kasus di TPA Kota Bekasi, Pontianak, Makasar dan Palembang. *Jurnal BPPT*, 58-65