



Strategi Mitigasi Emisi Gas Rumah Kaca dari Instalasi Pengolahan Air Limbah Domestik Kota Surabaya

Mar'atusholihah¹, Ervin Nurhayati^{2*}

¹ Program Studi Magister Teknik Sanitasi Lingkungan, Departemen Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember
² Departemen Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Email Korespondensi: ervin@enviro.its.ac.id

Diterima: 03 April 2023
Disetujui: 20 April 2023
Diterbitkan: 28 April 2023

Kata Kunci:

Emisi Gas Rumah Kaca, IPCC, IPAL Permukiman, IPAL Rusunawa, IPAL SWK, Strategi.

ABSTRAK

Emisi Gas Rumah Kaca (GRK) dapat menyebabkan pemanasan global. Faktor penyebab meningkatkannya emisi GRK adalah aktivitas manusia. Disisi lain, aktivitas manusia juga dapat meningkatkan beban polutan di badan air. Sehingga pada penelitian ini dilakukan analisis strategi untuk menurunkan gas rumah kaca sekaligus mempertimbangkan beban polutan yang dibuang ke badan air. Metode yang digunakan yaitu membandingkan prediksi emisi GRK dan beban polutan di badan air sebelum dan setelah program pengelolaan limbah yang ditawarkan. Adapun metode perhitungan emisi GRK yang digunakan mengacu pada faktor emisi *default Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*, sedangkan data aktivitas berasal dari hasil studi lapangan. Dari analisis strategi yang dilakukan yaitu dengan optimalisasi IPAL dan mengolah air limbah non kakus dengan menggabungkannya dengan IPAL eksisting/ membangun IPAL baru jika tidak ada dapat menurunkan emisi GRK sebesar 345,024 Ton CO_{2eq}/tahun (IPAL rusunawa), 13,342 Ton CO_{2eq}/tahun (IPAL SWK), 21,844 Ton CO_{2eq}/tahun (IPAL permukiman) dan beban polutan *Biochemical Oxygen Demand (BOD)* dan Total Nitrogen (TN) masing-masing sebesar 23.344,498 kg BOD/tahun dan 13.872,442 kg TN/tahun (IPAL permukiman), 86.318,096 kg BOD/tahun dan 44.202,324 kg TN/tahun (IPAL rusunawa), serta 11.999,425 kg BOD/tahun dan 1.848,446 kg TN/tahun (IPAL SWK).

Received: 03 April 2023
Accepted: 20 April 2023
Published: 28 April 2023

Keywords:

Greenhouse Gas Emission (GHG), IPCC, Rusunawa WWTP, Settlement WWTP, Strategy, SWK WWTP,

ABSTRACT

Greenhouse Gas (GHG) emissions are affecting global warming. Factors causing the increase in GHG emissions are human activities. Furthermore, human activities can also increase the pollutant load in water bodies. The aim of this study was to analyse the strategies to reduce greenhouse gases carried out while still considering the pollutant load discharged into water bodies. The method used was to compare predicted GHG emissions and pollutant loads in water bodies before and after the recommended program. The GHG emission calculation method refers to the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) default emission factor, while the activity data obtained from the results of field studies. From the analysis of the strategy carried out, namely by optimizing WWTP and treating non-latrines wastewater by combining it with the existing WWTP/ building a new WWTP if there is none, it can reduce GHG emissions by 345,024 Ton CO_{2eq}/year (Rusunawa WWTP), 13,342 Ton CO_{2eq}/year (SWK WWTP), 21,844 Ton CO_{2eq}/year (Settlement WWTP) and pollutant load *Biochemical Oxygen Demand (BOD)* and Total Nitrogen (TN) respectively were 23,344.498 kg BOD/year and 13,872.442 kg TN/year (Settlement WWTP), 86,318.096 kg BOD/year and 44,202.324 kg TN/year (Rusunawa WWTP), as well as 11,999.425 kg BOD/year and 1,848.446 kg TN/year (SWK WWTP).

1. PENDAHULUAN

Emisi Gas Rumah Kaca (GRK) dapat berasal dari proses alami maupun kegiatan manusia. Emisi ini penting untuk keberlanjutan kehidupan manusia, dimana dengan adanya emisi GRK suhu bumi menjadi hangat. Namun jika emisi GRK melebihi dari yang dibutuhkan maka dapat menyebabkan meningkatnya rata-rata suhu bumi. Sehingga

menyebabkan pemanasan global yang kemudian dapat terjadinya perubahan iklim (Chang et al., 2014). Apabila hal tersebut terjadi maka resiko terjadi bencana alam juga akan meningkatkan.

Emisi GRK yang paling di dominan di atmosfer yaitu emisi karbon dioksida (CO₂) diikuti oleh *methane (CH₄)*, *Nitrous oxide (N₂O)*, dan gas berfluorinasi (*Hydrofluorocarbons, perfluorocarbons, sulfur hexafluoride*, dan *nitrogen*

trifluoride) (EPA, 2023). Berdasarkan IPCC (2019), kegiatan antropologis/ kegiatan manusia yang menyebabkan emisi GRK dibagi menjadi 4 sektor, yaitu: sektor energi, *Industrial Processes and Product Use* (IPPU), *Agriculture, Forestry, and Other Land Use* (AFOLU), dan limbah. Pada tahun 2020 sektor limbah berkontribusi sebesar 12% dari total emisi GRK yang dihasilkan di Indonesia (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2022). Kontribusi sektor limbah tersebut meningkat dari tahun 2018 (7%) dan 2019 (6%). Berdasarkan UU no 16 tahun 2016 dalam kesepakatan paris, Negara Indonesia wajib menurunkan emisi GRK sehingga dapat menekan suhu bumi rata-rata 2°C. Salah satu caranya yaitu melakukan mitigasi emisi GRK (Wahyudi, 2018; Yang et al., 2023). Disisi lain Indonesia juga mendukung *Sustainable Development Goals* (SDGs) dimana terdapat tujuan 6 yaitu air bersih dan sanitasi yang layak. Sehingga disamping menurunkan emisi tetap harus mempertimbangkan akses sanitasi yang layak.

Emisi GRK yang dihasilkan dari aktivitas manusia berkaitan erat dengan jumlah penduduk dan pertumbuhan ekonomi. Kota Surabaya merupakan ibu kota Jawa Timur dimana rasio kepadatan penduduk mencapai 8.612 jiwa/m² serta laju pertumbuhan ekonomi sebesar 4,29% pada tahun 2021 (BPS, 2022). Adapun emisi GRK yang berasal dari pengelolaan air limbah yaitu emisi CH₄, N₂O, dan CO₂ (Campos et al., 2016; Johnson et al., 2022; Reid et al., 2014; Somlai-Haase et al., 2017; Somlai et al., 2019). Emisi tersebut berasal dari penggunaan energi di IPAL (Negi et al., 2021; Singh et al., 2012), penguraian lumpur di instalasi pengolahan lumpur tinja (Nayola et al., 2018; Nadhifatin, 2019; Maulana & Juliardi, 2022), produk samping dari penguraian TN (Bao et al., 2016; Parravicini et al., 2016), serta penguraian bahan organik lainnya (Parravicini et al., 2016; Nayola et al., 2018). Sehingga dilakukan penelitian untuk analisis strategi dari pengelolaan air limbah domestik di kota Surabaya untuk mitigasi emisi GRK dan mengurangi beban pencemar di lingkungan.

2. METODE

2.1 Batas kajian

Kajian strategi mitigasi emisi GRK dari pengelolaan air limbah domestik dilakukan di Kota Surabaya tahun 2022. Pengelolaan air limbah tersebut terdiri dari pengelolaan setempat dan pengelolaan terpusat. IPAL yang dikaji yaitu 289 IPAL yang terdiri dari 97 IPAL rumah susun sewa (rusunawa), 50 IPAL sentra wisata kuliner, dan 142 IPAL permukiman.

Ruang lingkup emisi yang dikaji yaitu emisi langsung yang berasal dari IPAL dan discharge IPAL serta emisi tidak langsung yang berasal dari transportasi pengangkutan lumpur dan operasional pompa.

Strategi yang digunakan yaitu optimalisasi IPAL existing yang ada dilapangan pada tahun 2022, sehingga dapat mengetahui perkiraan penurunan emisi dan beban air limbah yang dihasilkan.

2.2. Metode perhitungan emisi baseline dan program

Metode perhitungan emisi GRK baseline maupun setelah program menggunakan rumus dari pedoman perhitungan IPCC (2006a, b, c) dan IPCC (2019), seperti dibawah ini.

$$\text{Emisi CH}_4 = [(TOW_j - S_j) \times EF_j - R_j] \times GWP \times [10^{-3}] \dots\dots (1)$$

$$\text{Emisi N}_2\text{O} = \left(\left(TN_{ef,j} \times EF_{ef} \times \frac{44}{28} \right) - N_2\text{O di IPAL} \right) \times GWP \times [10^{-3}] \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{Emisi CO}_2/\text{CH}_4/\text{N}_2\text{O} = \text{Konsumsi bahan bakar}_j \times EF_j \dots\dots (3)$$

Dimana:

- Emisi CH₄: emisi CH₄ yang dihasilkan (Ton CO_{2eq})
- Emisi N₂O: emisi N₂O yang dihasilkan (Ton CO_{2eq})
- TOW : Total organik di air limbah (kg BOD/tahun)
- S : total organik di lumpur (kg BOD/tahun)
- R : gas CH₄ yang di *recovery* (kg CH₄)
- GWP : potensi pemanasan global (21 untuk CH₄, dan 310 untuk N₂O)
- TN_{ef} : Total nitrogen (kg TN/tahun)
- EF : faktor emisi CH₄ / N₂O / CO₂
- j : jenis pengolahan
- 10⁻³ : konversi kg ke ton

Faktor emisi yang digunakan 0,021 kg CH₄/kg BOD (drainase terdapat aliran), 0,3 kg CH₄/kg BOD (saluran tanpa aliran/tangki septik), 0,48 kg CH₄/kg BOD (reaktor anaerobik/ *anaerobic baffled reactor*/ kombinasi ABR dan biofiltrasi), 0,005 kg N₂O-N/ kg N (drainase terdapat aliran), 0,019 kg N₂O-N/ kg N (saluran tanpa aliran), dan 0,01 kg N₂O-N/ kg N (sumur resapan). Sedangkan data aktivitas (TOW, TN_{ef}) baseline yang digunakan berasal dari hasil monitoring dan evaluasi dari masing-masing IPAL. Adapun data aktivitas program yaitu menggunakan jumlah polutan *inlet* yang sama namun efisiensi penyisihan BOD dan TN menggunakan yang paling efektif diantara kondisi eksisting.

2.3. Metode perhitungan beban baseline dan program

Selain emisi GRK yang dihasilkan, dalam penentuan strategi juga mempertimbangkan beban BOD dan COD yang dihasilkan dari *discharge* IPAL. Adapun metode untuk menghitung beban di *discharge* IPAL yaitu sebagai berikut:

$$TN_{ef} = [TN_{ef}] \times Q_{ef} \times P \times 365 \times 10^{-6} \dots\dots\dots (4)$$

$$BOD_{ef} = [BOD_{ef}] \times Q_{ef} \times P \times 365 \times 10^{-6} \dots\dots\dots (5)$$

Dimana:

- TN_{ef} : Beban total nitrogen di *discharge* IPAL (Kg TN/tahun)
- BOD_{ef} : Beban total nitrogen di *discharge* IPAL (Kg BOD/tahun)
- Q_{ef} : Debit efluen air limbah (L/orang/hari)
- P : jumlah penduduk yang terlayani IPAL (orang)
- 365 : jumlah hari dalam setahun
- [TN_{ef}] : konsentrasi total nitrogen di efluen IPAL (mg/L)
- [BOD_{ef}] : konsentrasi BOD di efluen IPAL (mg/L)
- 10⁻⁶ : faktor konversi mg ke kg

2.4 Metode perhitungan absolut program

Strategi pengurangan emisi GRK yang digunakan yaitu optimalisasi IPAL yang ada serta melakukan pengolahan air limbah non kakus ke IPAL eksisting maupun IPAL baru. Adapun metode untuk menghitung absolut penurunan emisi dan absolut penurunan beban yaitu sebagai berikut:

$$\text{Absolut emisi} = \sum \text{emisi GRK}_b - \sum \text{emisi GRK}_p \dots\dots\dots (6)$$

$$\text{Absolut beban TN} = \sum \text{beban TN}_b - \sum \text{beban TN}_p \dots\dots\dots (7)$$

$$\text{Absolut beban BOD} = \sum \text{beban BOD}_b - \sum \text{beban BOD}_p \dots\dots\dots (8)$$

Dimana b yaitu baseline dan p yaitu setelah program berjalan 1 tahun.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Jenis IPAL domestik di Kota Surabaya

Jenis IPAL eksisting yaitu sebanyak 289 unit dengan yang berjalan 187 unit, dan 102 unit tidak berfungsi/ dilakukan *bypass* ke badan air. IPAL komunal domestik berdasarkan lokasinya dibagi menjadi 3, yaitu: IPAL SWK, IPAL rusunawa, dan IPAL permukiman. Dari lokasi IPAL tersebut dibagi menjadi beberapa jenis berdasarkan tipe pengolahan dan jenis air limbah yang masuk ke dalam IPAL, seperti yang terdapat pada sub bab berikut.

3.1.1 IPAL SWK

IPAL SWK berjumlah 50, dimana terdapat 45 IPAL yang berfungsi dan sisanya tidak berfungsi. Adapun detailnya jumlah IPAL SWK yang berfungsi setiap jenis IPAL dan air limbah yang diolah terdapat pada Tabel 1.

Tabel 1. Jumlah IPAL SWK yang berfungsi berdasarkan tipe IPAL dan influen air limbah tahun 2022.

Jenis Air limbah	Jenis IPAL			Total
	Tangki Septik	ABR + biofilter	ABR + biofilter + Greasetrap	
Air limbah kakus	27	0	0	27
Air limbah dapur	0	11	7	18
Total	27	11	7	45

Di Kota Surabaya terdapat 45 SWK, dimana masing masing SWK memiliki tangki septik apabila memiliki toilet. Namun hanya 18 lokasi SWK yang memiliki IPAL untuk mengolah air limbah dapur. Sedangkan sisanya tidak memiliki IPAL. Hal ini dikarenakan SWK tersebut direncanakan untuk pedagang yang tidak menjual makanan berat. Akan tetapi dalam realisasinya terdapat SWK yang menjual makanan berat seperti mie, dan lainnya. Sehingga SWK tersebut menghasilkan air limbah yang langsung dibuang ke badan air.

Disisi lain terdapat lokasi SWK yang memiliki IPAL namun tidak dilengkapi dengan *greasetrap*. Hal ini menyebabkan IPAL cepat penuh, dan terkadang saluran tersumbat karena minyak dan lemak.

3.1.2 IPAL rusunawa

IPAL rusunawa berjumlah 97, dimana terdapat 65 IPAL yang berfungsi dan sisanya tidak berfungsi. IPAL tersebut terdapat yang mengolahn air limbah kakus saja (48 unit), maupun campuran mengolah air limbah kakus dan non kakus (17 unit). Adapun detailnya jumlah IPAL rusunawa yang berfungsi berdasarkan jenis IPAL terdapat pada Tabel 2.

Jenis pengolahan IPAL rusunawa yaitu terdapat IPAL ABR, biofiltrasi, tangki septik, dan kombinasi antara ABR dan

tangki septik. Sistem pengolahan dengan sistem kombinasi ini terdapat di rusunawa yang memiliki usia tua.

Tabel 2. Jumlah IPAL rusunawa yang berfungsi berdasarkan tipe IPAL dan influen air limbah tahun 2022.

Jenis Air limbah	Jenis IPAL			ABR dan TS	Total
	ABR	Biofiltrasi	TS		
Air limbah kakus	19	0	27	2	48
Air limbah non kakus	0	0	0	0	0
Air limbah non kakus & Air limbah kakus	12	0	0	5	17
Total	31	0	27	7	65

Keterangan: - TS: Tangki Septik
- ABR: *Anaerobic Baffled Reactor*

3.1.3 IPAL permukiman

IPAL permukiman berjumlah 142, dimana terdapat 77 IPAL yang berfungsi dan sisanya tidak berfungsi. Adapun detailnya jumlah IPAL permukiman yang berfungsi berdasarkan jenis IPAL terdapat pada Tabel 3.

Tabel 3. Jumlah IPAL permukiman yang berfungsi berdasarkan tipe IPAL dan influen air limbah tahun 2022.

Jenis Air limbah	Jenis IPAL				Total
	Filtrasi	ABR	AFBR	TS komunal	
Air limbah kakus	0	19	3	11	33
Air limbah non kakus	6	4	1	0	11
Air limbah non kakus & Air limbah kakus	0	15	17	1	33
Total	6	38	21	12	77

Keterangan:
ABR: *anaerobic baffled reactor*
AFBR: *anaerobic filter baffled reactor*
TS: Tangki septik

3.2 Strategi untuk IPAL SWK

Program di IPAL SA dimana hanya terdapat tangki septik saja, maka perlu dibangun IPAL untuk mengolah air limbah dapur (KW). Program IPAL SB yaitu meningkatkan efisiensi penyisihan TN sebesar 11,5%, dan IPAL SC yaitu meningkatkan efisiensi penyisihan BOD menjadi 88,33%. Sedangkan untuk IPAL SD dimana terdapat IPAL untuk mengolah GW namun IPAL tidak berfungsi maka perlu melakukan perbaikan IPAL tersebut sehingga mencapai efisiensi penyisihan BOD 88,33% dan penyisihan TN sebesar 11,5% seperti pada Tabel 4.

Setiap jenis IPAL SWK kemudian dilakukan perhitungan absolut emisi dan beban pencemar BOD dan TN sehingga didapatkan absolut setiap program seperti pada Gambar 1 dan Gambar 2.

Pada program SA emisi GRK mengalami peningkatan sebesar 19,923 Ton CO_{2eq} (Gambar 1). Hal ini dikarenakan terdapat IPAL baru untuk mengolah air limbah dapur dengan sistem anaerobik sehingga emisi GRK meningkat. Pengolahan dengan anaerobik menghasilkan gas yang lebih banyak dibandingkan dengan aerobik. Hal ini dapat dilihat dari faktor

emisi CH₄ pada reaktor anaerobik lebih besar dibandingkan dengan aerobik (IPCC, 2019). Disisi lain, sistem anaerobik memiliki kelebihan yaitu menghasilkan lumpur yang lebih sedikit, sehingga energi yang dibutuhkan untuk mengolah lumpur lebih sedikit dibandingkan dengan sistem aerobik.

Tabel 4. Program mitigasi GRK IPAL setiap jenis IPAL SWK

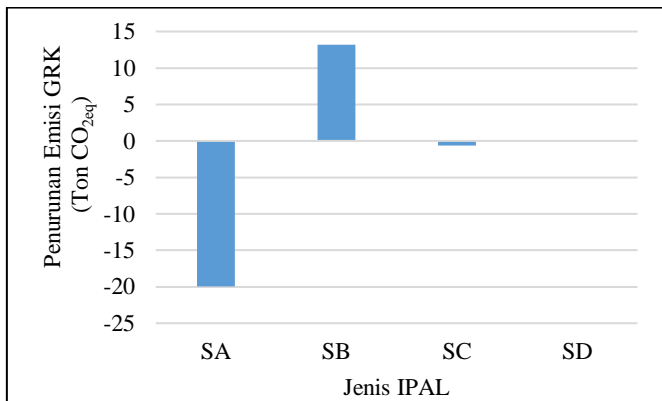
Kode	Baseline	Program
SA	Tangki Septik (BW) berfungsi dan limbah dapur ke drainase	Tangki septik tetap berfungsi, dan KW diolah dengan ABR+biofilter
SB	Tangki Septik (BW) dan ABR+Biofilter (KW), Berfungsi	tangki septik tetap berfungsi, dan KW dioptimalkan
SC	Tangki Septik (BW) dan ABR+Biofilter (KW), Berfungsi tidak optimal	tangki septik tetap berfungsi, dan limbah dapur di optimalkan
SD	Tangki Septik (BW) dan ABR+Biofilter (KW), Tidak Berfungsi	tangki septik tetap berfungsi, dan KW di perbaiki sehingga mencapai efisiensi maksimal

Keterangan:

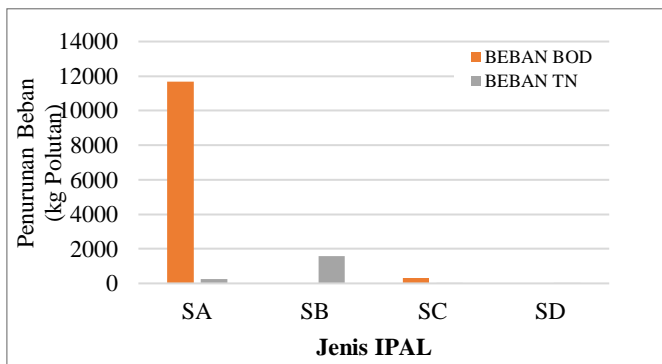
KW: *Kitchen Wastewater*/ air limbah dapur,

BW: *blackwater*/ air limbah kakus.

Program SA dapat menurunkan beban BOD dan TN masing-masing sebesar 11.680,737 kg BOD/tahun dan 244,402 kg TN/tahun (Gambar 2). Begitupula dengan program SC dapat meningkatkan emisi GRK sebesar 0,638 Ton CO_{2eq} (Gambar 1), namun dapat mengurangi beban polutan sebesar 318,689 kg BOD/tahun dan 0,938 kg TN/tahun (Gambar 2).



Gambar 1. Perkiraan penurunan emisi GRK dari IPAL dan *discharge* IPAL SWK



Gambar 2. Perkiraan penurunan beban di *discharge* IPAL SWK

Adapun pada program SB dan SD dapat menurunkan emisi GRK masing-masing sebesar 13,213 Ton CO_{2eq} dan 0,129 ton CO_{2eq} (Gambar 1). Namun program SB dan SD tidak menurunkan beban BOD dan hanya menurunkan beban TN sebesar 1.575,543 kg TN/tahun (SB) dan 27,564 kg TN/tahun (SD) (Gambar 2).

3.3 Strategi untuk IPAL rusunawa

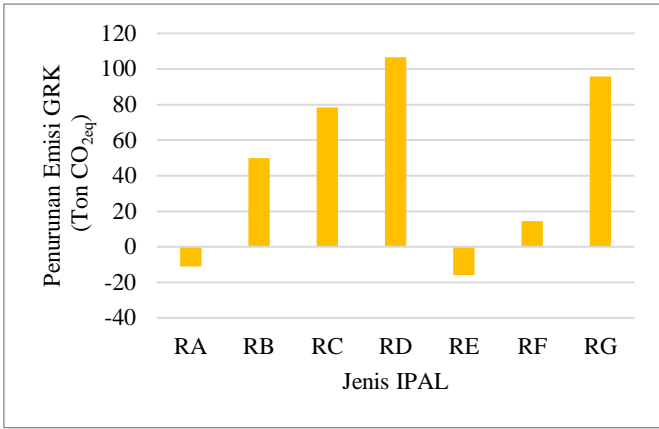
Berdasarkan kondisi eksisting tipe IPAL rusunawa dibagi menjadi 7 yaitu IPAL ABR mengolah BW berfungsi, tidak berfungsi optimal, dan tidak berfungsi, IPAL ABR yang mengolah air limbah campuran BW dan GW dalam kondisi berfungsi, tidak berfungsi optimal, dan tidak berfungsi, serta pengolahan BW dengan menggunakan tangki septik dalam kondisi berfungsi (Tabel 5).

Tabel 5. Program mitigasi GRK IPAL setiap jenis IPAL rusunawa

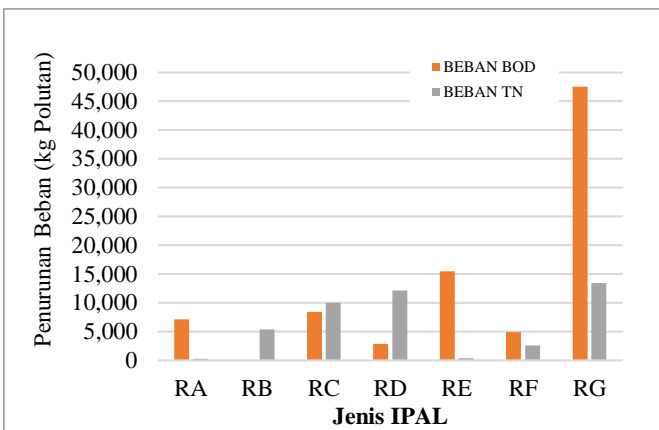
Kode	Baseline	Program
RA	ABR, BW, Berfungsi	GW diolah bersama di ABR BW
RB	ABR, BW+GW, Berfungsi	Unit di optimalkan hingga efisiensi penyisihan tertinggi
RC	ABR, BW, Berfungsi kurang optimal	ABR dioptimalkan, GW diolah bersama di ABR BW
RD	ABR, BW+GW, Berfungsi kurang optimal	ABR dioptimalkan
RE	Tangki Septik, BW, Berfungsi	GW diolah diunit baru ABR
RF	ABR, BW, Tidak berfungsi	ABR difungsikan, GW diolah bersama di ABR BW
RG	Tangki Septik, BW, Tidak berfungsi	TS difungsikan, GW diolah diunit baru ABR

Program pada IPAL RA, RC, dan RF yaitu mengolah *greywater* (GW) bersama BW, IPAL RB, RC dan RD dioptimalkan hingga efisiensi penyisihan BOD 80% dan TN sebesar 56,98% (Tabel 5). Sedangkan pada IPAL RE dan RG perlu membangun IPAL ABR baru untuk mengolah GW, serta pada IPAL RG dimana tangki septik tidak berfungsi maka perlu memperbaiki tangki septik sehingga mencapai efisiensi penyisihan BOD 80% dan penyisihan TN sebesar 56,98% seperti pada Tabel 5. Setiap jenis IPAL rusunawa kemudian dilakukan perhitungan absolut emisi dan beban pencemar BOD dan TN sehingga didapatkan absolut setiap program seperti pada Gambar 3 dan Gambar 4.

Pada program RA dan RE emisi GRK mengalami peningkatan masing-masing sebesar 11,074 Ton CO_{2eq} dan 15,728 Ton CO_{2eq} (Gambar 1). Hal ini dikarenakan pada IPAL RE terdapat IPAL baru untuk mengolah GW dengan sistem anaerobik sehingga emisi GRK meningkat. Sedangkan IPAL RA dimana GW yang semula langsung dibuang ke drainase berubah menjadi diolah bersama BW di ABR. Disisi lain program RA dan RE dapat menurunkan beban BOD dan TN masing-masing sebesar 7.123,480 kg BOD/tahun (RA), 15.437,021 kg BOD/tahun (RE), 298,918 kg TN/tahun (RA), dan 351,412 kg TN/tahun (RE) (Gambar 4).



Gambar 3. Perkiraan penurunan emisi GRK dari IPAL dan discharge IPAL rusunawa.



Gambar 4. Perkiraan penurunan beban di discharge IPAL rusunawa

Adapun pada program RB, RC, RD, RF, dan RG dapat menurunkan emisi GRK masing-masing sebesar 49,829 Ton CO_{2eq}, 78,253 Ton CO_{2eq}, 106,606 Ton CO_{2eq}, 14,474 Ton CO_{2eq}, dan 95,862 Ton CO_{2eq} (Gambar 3). Selain itu, program RB, RC, RD, RF, dan RG juga dapat menurunkan beban BOD dan TN masing-masing sebesar 8.454,648 kg BOD/tahun (RC), 2.900,331 kg BOD/tahun (RD), 4.865,815 kg BOD/tahun (RF), 47.536,801 kg BOD/tahun (RG), 5.401,528 kg TN/tahun (RB), 10.001,852 kg TN/tahun (RC), 12.139,897 kg TN/tahun (RD), 2.564,607 kg TN/tahun (RF), dan 13.444,110 kg TN/tahun (RG) (Gambar 4).

Seluruh program pada IPAL rusunawa ini dapat menurunkan emisi GRK sebesar 345,024 Ton CO_{2eq} dan menaikkan emisi GRK sebesar 26,802 Ton CO_{2eq}. sedangkan total beban polutan yang diturunkan yaitu 86.318,096 kg BOD/tahun dan 44.202,324 kg TN/tahun.

3.4 Strategi untuk IPAL permukiman

Program pada IPAL permukiman sama seperti IPAL SWK dan IPAL rusunawa. Dimana pada IPAL PA, PC, PF yang hanya mengolah BW menggunakan ABR maka GW perlu diolah di ABR yang sama dengan BW (Tabel 6. Program mitigasi GRK IPAL setiap jenis IPAL permukiman. Tabel 6). Sedangkan IPAL PE dan PG perlu dibangun unit baru ABR untuk mengolah GW. Adapun unit lainnya yang belum optimal dimana efisiensi penyisihan belum optimal, maka perlu ada *monitoring* dan *maintenance* secara berkala. Setiap

jenis IPAL permukiman kemudian dilakukan perhitungan absolut emisi dan beban pencemar BOD dan TN sehingga didapatkan absolut setiap program seperti pada Gambar 5 dan Gambar 6.

Tabel 6. Program mitigasi GRK IPAL setiap jenis IPAL permukiman.

Kode	Baseline	Program
PA	ABR, BW, Berfungsi	GW diolah bersama di ABR BW
PB	ABR, BW+GW, Berfungsi	Unit di optimalkan hingga efisiensi penyisihan tertinggi
PC	ABR, BW, Berfungsi kurang optimal	ABR dioptimalkan, GW diolah bersama di ABR BW
PD	ABR, BW+GW, Berfungsi kurang optimal	ABR dioptimalkan
PE	Tangki Septik, BW, Berfungsi	GW diolah diunit baru ABR
PF	ABR, BW, Tidak berfungsi	ABR difungsikan, GW diolah bersama di ABR BW
PG	TS, BW, Tidak berfungsi	TS difungsikan, GW diolah di unit baru ABR

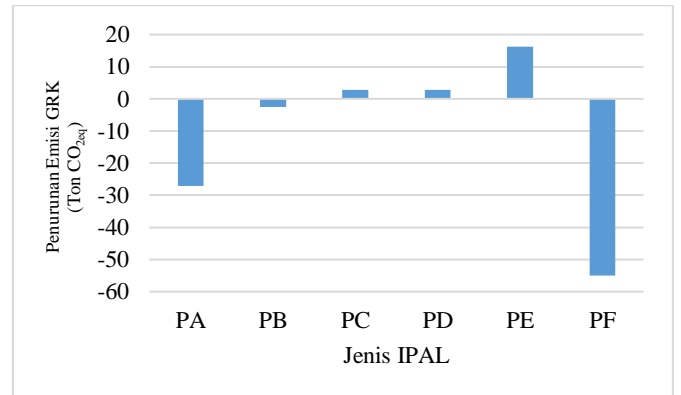
Keterangan:

TS: Tangki septik

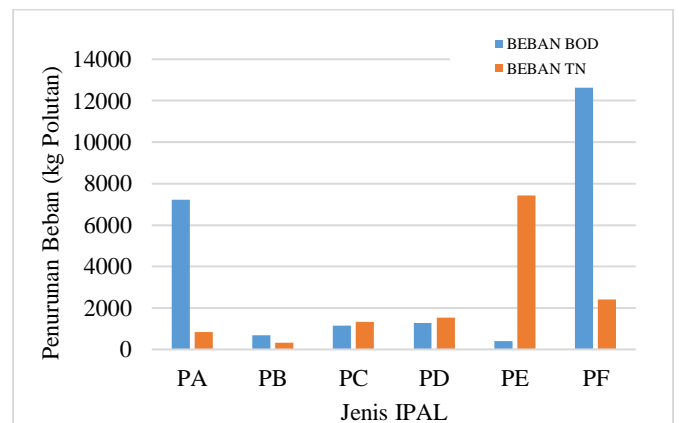
ABR: *anaerobik baffled reactor*

BW: *blackwater*

BW+GW : campuran *blackwater* dan *greywater*



Gambar 5. Perkiraan penurunan emisi GRK dari IPAL dan discharge IPAL Permukiman.



Gambar 6. Perkiraan penurunan beban di discharge IPAL permukiman.

Pada program PA, PB, PF emisi GRK mengalami peningkatan masing-masing sebesar 27,042 Ton CO_{2eq}, 2,548 Ton CO_{2eq}, 55,022 Ton CO_{2eq} (Gambar 5). Namun program ini dapat menurunkan beban BOD dan TN masing-masing sebesar 7.211,727 kg BOD/tahun (PA), 691,324 kg BOD/tahun (PB), 12.630,594 kg BOD/tahun (PF), 848,659 kg TN/tahun (PA), 321,799 kg TN/tahun (PB), 2.402,368 kg TN/tahun (PF) (Gambar 6).

Adapun pada 3 program lainnya dapat menurunkan emisi GRK masing-masing sebesar 2,849 Ton CO_{2eq} (PC), 2,759 Ton CO_{2eq} (PD), dan 16,236 Ton CO_{2eq} (PE) (Gambar 5). Selain itu, program tersebut juga dapat menurunkan beban BOD dan TN masing-masing sebesar 1.146,453 kg BOD/tahun (PC), 1.275,820 kg BOD/tahun (PD), 388,580 kg BOD/tahun (PE), 1.326,143 kg TN/tahun (PC), 1.545,421 kg TN/tahun (PD), dan 7.428,052 kg TN/tahun (PE) (Gambar 6).

4. KESIMPULAN

Strategi mitigasi emisi GRK dengan cara optimalisasi IPAL dan melakukan pengolahan air limbah non kakus dengan IPAL dapat mengurangi emisi GRK sebesar 345,024 Ton CO_{2eq}/tahun pada IPAL rusunawa, 13,342 Ton CO_{2eq}/tahun pada IPAL SWK, 21,844 Ton CO_{2eq}/tahun pada IPAL permukiman. Selain itu, strategi tersebut dapat menurunkan beban BOD dan TN di lingkungan masing-masing sebesar 23.344,498 kg BOD/tahun dan 13.872,442 kg TN/tahun pada IPAL permukiman, 86.318,096 kg BOD/tahun dan 44.202,324 kg TN/tahun pada IPAL rusunawa, serta 11.999,425 kg BOD/tahun dan 1.848,446 kg TN/tahun pada IPAL SWK.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Dinas Lingkungan Hidup Kota Surabaya, Dinas Sumber Daya Air dan Bina Marga Kota Surabaya, Dinas Perumahan Rakyat Kawasan Permukiman dan Pertanahan, Dinas Koperasi Usaha Kecil dan Menengah dan Perdagangan Kota Surabaya, serta Kelompok Swadaya Masyarakat IPAL komunal Kota Surabaya yang telah membantu dalam penyediaan data dan pengambilan sampel air limbah.

DAFTAR PUSTAKA

Badan Pusat Statistik Kota Surabaya. (2022). *Kota Surabaya Dalam Angka 2022*. BPS Kota Surabaya. <https://surabayakota.bps.go.id/publication/2022/02/25/e65b36a5a3abccf19e24dd79/kota-surabaya-dalam-angka-2022.html>.

Bao, Z., Sun, S., & Sun, D. (2016). Assessment of greenhouse gas emission from A/O and SBR wastewater treatment plants in Beijing, China. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 108, 108-114. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ibiod.2015.11.028>.

Campos, J. L., Valenzuela-Heredia, D., Pedrouso, A., Val Del Río, A., Belmonte, M., & Mosquera-Corral, A. (2016). Greenhouse Gases Emissions from Wastewater Treatment Plants: Minimization, Treatment, and Prevention. *Journal of Chemistry*, 2016.

<http://dx.doi.org/10.1155/2016/3796352>.

Chang, J., Kyung, D., & Lee, W. (2014). Estimation of greenhouse gas (GHG) emission from wastewater treatment plants and effect of biogas reuse on GHG mitigation. *Advances in Environmental Research*, 3 (2), 173-183. <http://dx.doi.org/10.12989/aer.2014.3.2.173>.

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2006a). *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Vol. 2 Chapter 1*. IPCC. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2_Volume2/V2_1_Ch1_Introduction.pdf

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2006b). *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Vol. 2 Chapter 2*. IPCC. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2_Volume2/V2_2_Ch2_Stationary_Combustion.pdf

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2006c). *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Vol. 2 Chapter 3*. IPCC. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2_Volume2/V2_3_Ch3_Mobile_Combustion.pdf.

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2019). *Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Vol. 5 Chapter 6*. IPCC. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/pdf/5_Volume5/19R_V5_6_Ch06_Wastewater.pdf.

Johnson, J., Zakaria, F., Nkurunziza, A. G., Way, C., Miller A. Camargo-Valero, M. A., & Evans, B. (2022). Whole-system analysis reveals high greenhouse-gas emissions from citywide sanitation in Kampala, Uganda. *Communications Earth and Environment*. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00413-w>.

Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. (2022). *Laporan inventarisasi Gas Rumah Kaca (GRK) dan monitoring, pelaporan, verifikasi (MPV)*. Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan.

Maulana, I. & Juliardi, N. R. (2022). Identifikasi Dampak Lingkungan Pada Proses Pengolahan Lumpur Tinja (IPLT) Jabon Dengan Metode Life Cycle Assessment (LCA). *Jurnal EnviroUS*, 2 (2), 86-92. <https://doi.org/10.33005/enviro.us.v2i2.117>.

Nadhifatin, E. N. (2019). *Analisis Kontribusi Dampak Lingkungan Akibat Proses Pengolahan Lumpur Tinja IPLT Keputih dengan Metode Life Cycle Assessment (LCA)*. [Unpublished S.T. thesis]. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Negi, R., & Chandel, M. K. (2021). Analysing water-energy-GHG nexus in a wastewater treatment plant of Mumbai Metropolitan Region, India. *Environmental Research*, 196, 110931. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.110931>.

Noyola, A., Paredes, M. G., Güereca, L. P., Molina, L. T., & Zavala, M. (2018). Methane correction factors for estimating emissions from aerobic wastewater treatment facilities based on field data in Mexico and on literature review. *Science of the Total Environment*, 639, 84-91. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.111>.

Parravicini, V., Svardal, K., & Krampe, J. (2016). Greenhouse Gas Emissions from Wastewater Treatment Plant. *Energy Procedia*, 97, 246-253. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.10.067>.

- Reid, M. C., Guan, K., Wagner, & F., Mauzerall, D. L. (2014). Global methane emissions from pit latrines. *Environmental Science and Technology*, 48 (15), 8727-8734. <https://doi.org/10.1021/es501549h>.
- Singh, P., Kansal, A., dan Carliell-Marquet, C. (2016). Energy and carbon footprints of sewage treatment methods. *Journal of Environmental Management*, 165, 22-30. <https://doi.org/10.1007/s13201-012-0040-7>.
- Somlai-Haase, C., Knappe, J. & Gill, L. (2017). Carbon dioxide emissions from a septic tank soakaway in a northern maritime climate. *Science of the Total Environment*, 586, 485-491. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.206>.
- Somlai, C., Knappe, J. & Gill, L. (2019). Spatial and temporal variation of CO₂ and CH₄ emissions from a septic tank soakaway. *Science of the Total Environment*, 679, 185-195. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.449>.
- United States Environmental Protection Agency. (2023). Overview of Greenhouse Gases. <https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases>.
- Wahyudi, J. (2016). Mitigasi Gas Rumah Kaca. *Jurnal Litbang*, 12 (2), 104-112. <https://doi.org/10.33658/jl.v12i2.45>.
- Yang, M., Peng, M., Wu, D., Feng, H., Wang, Y., Lv, Y., Sun, F., Sharma, S., Che, Y. & Yang, K. (2023). Greenhouse gas emissions from wastewater treatment plants in China: Historical emissions and future mitigation potentials. *Resources, Conservation and Recycling*, 190, 106794. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106794>.