

Inventarisasi Emisi Gas Rumah Kaca Berdasarkan Penggunaan Lahan di Kota Bogor

Inigo Kila Adinatha^{1*} dan Chusnul Arif¹

¹ Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor Kampus IPB Dramaga, PO BOX 220, Bogor, Jawa Barat, Indonesia

* Penulis korespondensi: inigo_adinatha@apps.ipb.ac.id

Abstrak: Pemanasan Global merupakan isu lingkungan yang menjadi perhatian banyak negara saat ini. Inventarisasi emisi gas rumah kaca (GRK) dapat ditentukan dari beberapa sektor di suatu wilayah. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan dan membandingkan emisi GRK antara tahun 2012, 2014 dan 2020 di Kota Bogor berdasarkan peta tata guna lahan, dan memberikan rekomendasi untuk mitigasi emisi GRK pada aktivitas beberapa sector berdasarkan kriteria IPCC. Data sekunder seperti data aktivitas sektor dan peta tata guna lahan dari Kota Bogor digunakan untuk menentukan jumlah emisi GRK dengan metode IPCC 2006 tier-1, kemudian menganalisis tata guna lahan dengan menggunakan ArcGIS. Hasil studi menunjukkan bahwa perumahan dan taman mendominasi tata guna lahan di Kota Bogor. Inventarisasi emisi GRK menunjukkan peningkatan dari 1,44 juta ton CO₂ ekuivalen pada tahun 2012 meningkat menjadi 1,48 juta ton CO₂ ekuivalen pada tahun 2014, dan menurun menjadi 1,02 juta ton CO₂ ekuivalen pada tahun 2020. Penurunan emisi pada tahun 2020 ditengarai karena pandemik Covid-19 yang berdampak pada penurunan aktivitas khususnya transportasi. Meskipun terjadi penurunan, langkah mitigasi emisi GRK tetap diperlukan khususnya apabila pandemic telah berakhir.

Kata kunci: inventarisasi GRK; IPCC; tata guna lahan; mitigasi

Diterima: 29 November 2021

Disetujui: 31 Maret 2022

Sitasi:

Adinatha, I.K.; Arif, C. Inventarisasi Emisi Gas Rumah Kaca Berdasarkan Penggunaan Lahan di Kota Bogor. *J. Teknik Sipil dan Lingkungan*. 2022; 7 (1): 49-64.,
<https://doi.org/10.29244/jsil.7.1.49-64>

1. Pendahuluan

Pemanasan global adalah isu lingkungan hidup yang menjadi perhatian banyak negara saat ini [1]. Pemanasan global merupakan suatu peristiwa meningkatnya temperatur rata-rata laut, atmosfer, dan daratan Bumi [2]. Menurut laporan pemantauan Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) dalam [3], temperatur bumi telah meningkat sebesar 0,5 °C selama abad 20 dan diperkirakan akan meningkat sekitar 1,5-5,8 °C pada tahun 2100. Pemanasan global akibat peningkatan temperatur bumi berdampak pada berubahnya iklim secara global. Perubahan iklim global tersebut menyebabkan terjadinya perubahan curah hujan dan meningkatnya intensitas frekuensi badai, meningkatnya tinggi muka air laut, serta menurunkan salinitas dan meningkatkan sedimentasi di kawasan pesisir dan lautan [4].

Emisi gas rumah kaca (GRK) menjadi salah satu penyebab terjadinya pemanasan temperatur udara dan perubahan iklim [5]. Kebijakan pengurangan emisi GRK yang ditandai dengan lahirnya Protokol Kyoto pada tahun 1998 dan kemudian diratifikasi melalui UU RI No. 17/2004, mengamanatkan bahwa setiap pemerintah daerah (provinsi dan kabupaten/kota) termasuk pemerintah Kota Bogor, wajib melaksanakan kegiatan inventarisasi GRK. Hal ini akan menjadi tantangan yang dihadapi oleh pemerintah Kota Bogor untuk menyediakan data dasar GRK [6]. Penelitian untuk mengetahui jumlah emisi GRK ini pernah

dilakukan di daerah lain, seperti salah satunya di Kabupaten Bogor. Berdasarkan penelitian tersebut, diketahui laju emisi historis total tahunan pada periode tahun 2009 sampai dengan tahun 2014 merupakan yang terbesar. Laju emisi historis total tahunan pada periode tersebut sebesar 355.900 ton CO₂ eq/tahun. Hal ini menunjukkan bahwa terjadi peningkatan sekitar 35% dari periode sebelumnya, yaitu tahun 2005-2009 [7].

Untuk menentukan emisi gas rumah kaca, diperlukan suatu ukuran atau satuan tertentu yang dapat menyatakan besar nilai emisi dari tiap gas rumah kaca. Umumnya, emisi gas rumah kaca dinyatakan dalam ekivalen karbon dioksida (CO₂ eq). Ekivalen karbon dioksida merupakan suatu ukuran yang digunakan untuk membandingkan daya pemanasan global (*global warming potential*, GWP) gas rumah kaca tertentu relatif terhadap daya pemanasan global gas CO₂. Misalnya GWP metana (CH₄) selama rata-rata 100 tahun adalah 25 dan nitrous oksida (N₂O) adalah 298. Ini menunjukkan bahwa emisi 1 juta ton CH₄ dan 1 juta ton N₂O berturut-turut, menyebabkan pemanasan global yang besarnya setara dengan 25 juta ton dan 298 juta ton gas CO₂ [8]. IPCC sebagai salah satu hasil bahasan sistem antar pemerintah yang diatur oleh negara-negara mengenai isu perubahan iklim, telah mengeluarkan berbagai laporan dan panduan yang dapat diikuti oleh negara-negara anggota untuk menurunkan emisi karbon mereka [9]. Salah satu panduan yang dikeluarkan oleh IPCC adalah metode IPCC 2006, yaitu metode untuk memperkirakan inventarisasi suatu negara atau daerah untuk emisi gas rumah kaca hasil aktivitas manusia. Pedoman IPCC 2006 memberikan pilihan tingkatan tier (tingkatan kedetailan basis data) dengan tier 1 sebagai tier terendah karena menggunakan data *default*, dan tier 3 sebagai tier tertinggi karena menggunakan data spesifik lokasi. Meskipun tier 1 merupakan tier terendah, tier inilah yang masih banyak digunakan di Indonesia [10].

Pengambilan data untuk menghitung emisi GRK ini menggunakan pendekatan sektor, yaitu berdasarkan sektor aktivitas atau sektor penghasil emisi yang ada di suatu wilayah, seperti di bidang transportasi, pemukiman, industri, pertanian, dan peternakan [11]. Dengan melakukan inventarisasi emisi gas rumah kaca di Kota Bogor, analisis spasial beban sumber emisi dapat dilakukan. Hasilnya dapat digunakan untuk membantu penataan ruang wilayah, seperti pembuatan ruang terbuka hijau pada wilayah dengan tingkat emisi besar [11]. Namun, utamanya inventarisasi emisi di Kota Bogor dilakukan untuk dapat mengetahui besar emisi yang dihasilkan oleh tiap sektor aktivitas, membandingkan besar emisi dalam beberapa tahun terakhir, serta untuk mengetahui dampak faktor internal maupun eksternal dari sektor aktivitas terhadap besar emisi di Kota Bogor. Oleh sebab itu, penelitian ini bertujuan menentukan dan membandingkan emisi GRK di Kota Bogor berdasarkan peta tata guna lahan tahun 2012 dan tahun 2020, serta memberikan rekomendasi mitigasi emisi GRK pada setiap sektor aktivitas di Kota Bogor berdasarkan kriteria IPCC.

2. Metodologi

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Maret - Juni 2021. Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah seperangkat alat pengolah data, seperti komputer atau laptop yang dilengkapi dengan program ArcGIS dan Ms. Office. Bahan yang digunakan pada penelitian adalah data sekunder berupa data aktivitas dan peta tata guna lahan di Kota Bogor. Peta tata guna lahan yang digunakan berupa peta digital dengan informasi yang telah ditetapkan oleh instansi terkait. Sumber data sekunder yang digunakan tersedia pada Tabel 1 dan Tabel 2.

Tabel 1. Sumber data aktivitas Kota Bogor 2012-2020.

Data Aktivitas	Sumber data
Jumlah Kendaraan Tahun 2012	(33)
Jumlah Penumpang Kereta Api Tahun 2012	
Konsumsi Gas Bumi Industri Tahun 2012	
Jumlah Penduduk Tahun 2012	(34)
Luas Panen Padi Tahun 2012	
Jumlah Ternak Tahun 2012	
Jumlah Kendaraan Tahun 2014	(35)
Jumlah Penumpang Kereta Api Tahun 2014	
Konsumsi Gas Bumi Industri Tahun 2014	
Jumlah Penduduk Tahun 2014	(27)
Luas Panen Padi Tahun 2014	
Jumlah Ternak Tahun 2014	
Jumlah Kendaraan Tahun 2020	(36)
Jumlah Penumpang Kereta Api Tahun 2020	Data diolah dari berbagai sumber
Konsumsi Gas Bumi Industri Tahun 2020	
Jumlah Penduduk Tahun 2020	
Luas Panen Padi Tahun 2020	(37)
Jumlah Ternak Tahun 2020	

Tabel 2. Sumber peta tata guna lahan Kota Bogor 2012-2020.

Peta	Sumber Data
Peta Tahun 2012	(38)
Peta Tahun 2014	(39)
Peta Tahun 2020	(40)

Penelitian ini menggunakan data sekunder untuk memperoleh emisi gas rumah kaca di Kota Bogor. Perhitungan emisi GRK pada penelitian ini mengacu pada metode IPCC 2006 dengan menggunakan data aktivitas, seperti jumlah kendaraan dan penduduk yang diperoleh dari berbagai lembaga dengan lokasi pemantauan Kota Bogor. Sebagian besar faktor emisi yang digunakan berupa faktor emisi default (tier 1), kecuali untuk faktor emisi sektor kereta api yang menggunakan faktor emisi untuk KRL Jabodetabek (Kereta Api Listrik Jakarta-Bogor-Depok-Tangerang-Bekasi) dan faktor emisi sektor pertanian yang menggunakan faktor emisi untuk lahan sawah secara umum di Indonesia. Emisi gas rumah kaca yang ditinjau adalah emisi dari gas karbon dioksida (CO₂), metana (CH₄), dan dinitrogen oksida (N₂O). Setelah dilakukan perhitungan emisi GRK, dilakukan analisis hubungan besar emisi GRK dengan perubahan penggunaan lahan di Kota Bogor dengan menggunakan program ArcGIS. Kemudian, rekomendasi strategi mitigasi emisi GRK dapat diberikan sebagai usaha untuk menurunkan emisi dari tiap sektor aktivitas di Kota Bogor.

2.1. Perhitungan Emisi Gas Rumah Kaca dari Berbagai Sektor

Pada dasarnya, persamaan yang digunakan dalam menentukan jumlah emisi GRK ditunjukkan pada Persamaan 1. Persamaan dasar ini kemudian dimodifikasi untuk menyesuaikan dengan faktor emisi dan data aktivitas dari tiap sektor yang berbeda. Sektor penyumbang GRK yang diteliti adalah sektor transportasi, pemukiman, pertanian, dan peternakan. Persamaan 2 merupakan persamaan untuk memperoleh konsumsi bahan bakar kendaraan bermotor. Persamaan 3 sampai dengan Persamaan 11 menunjukkan persamaan yang digunakan untuk memperoleh nilai emisi GRK pada tiap sektor tersebut.

$$E = A_D \times E_F \quad (1)$$

Keterangan:

- E = emisi GRK yang dapat berupa CH₄, N₂O, atau CO₂
- A_D = data aktivitas
- E_F = faktor emisi

Sebelum dapat memperoleh emisi transportasi jalan raya, perlu dihitung konsumsi bahan bakar transportasi jalan raya terlebih dahulu dengan menggunakan persamaan 2.

$$K_a = P_K \times I_E \times J_T \times O_e \quad (2)$$

Keterangan:

- K_a = konsumsi bahan bakar a (TJ)
- P_K = jumlah unit kendaraan bermotor
- I_E = intensitas penggunaan energi (liter/km)
- J_T = jarak tempuh (km/hari)
- O_e = operasi efektif setahun (%)

Emisi GRK dari sektor transportasi untuk transportasi jalan raya diperoleh dengan menggunakan persamaan 3.

$$E_{JR} = \sum_a (K_a \times E_{Fa}) \quad (3)$$

Keterangan:

- E_{JR} = emisi GRK dari transportasi jalan raya (kg GRK)
- K_a = konsumsi bahan bakar a (TJ)
- E_{Fa} = faktor emisi GRK menurut jenis bahan bakar a (kg GRK/TJ)
- a = jenis bahan bakar (premium, solar)

Emisi GRK dari sektor transportasi untuk kereta api diperoleh dengan menggunakan persamaan 4.

$$E_{KA} = P_p (E_{Ff} + E_{Fs}) \quad (4)$$

Keterangan:

- E_{KA} = emisi GRK dari kereta api (ton GRK)
- P_p = jumlah penumpang kereta api
- E_{Ff} = faktor emisi GRK freon AC (ton GRK/penumpang)
- E_{Fs} = faktor emisi GRK penggunaan listrik di stasiun (ton GRK/penumpang)

Persamaan 5 merupakan persamaan untuk menentukan emisi GRK dari sektor industri.

$$E_I = K \times E_F \quad (5)$$

Keterangan:

- E_I = emisi GRK dari sektor industri (kg GRK)
 K = konsumsi bahan bakar (TJ)
 E_F = faktor emisi (kg GRK/TJ)

Persamaan 6 merupakan persamaan untuk menentukan emisi GRK dari sektor pemukiman.

$$E_R = K \times E_F \quad (6)$$

Keterangan:

- E_R = emisi GRK dari sektor pemukiman (kg GRK)
 K = konsumsi bahan bakar (TJ)
 E_F = faktor emisi (kg GRK/TJ)

Emisi GRK dari sektor pertanian untuk emisi N_2O diperoleh dengan menggunakan persamaan 7.

$$N_2O_{sawah} = E_F \times C_F \times T \times A \times 10^{-6} \quad (7)$$

Keterangan:

- N_2O_{sawah} = emisi N_2O dari tanah budidaya padi sawah
 (Gg N_2O /tahun, 1 Giga gram = 1000 tahun)
 E_F = faktor emisi ($E_F N_2O = 0,0027$ kg N_2O /(ha.hari))
 C_F = faktor koreksi emisi N_2O ($C_F = 1$)
 T = umur tanam padi (hari)
 A = luas panen (ha/tahun)

Emisi GRK dari sektor pertanian untuk emisi CH_4 diperoleh dengan menggunakan persamaan 8.

$$CH_4_{sawah} = \sum (E_{F\ rice} \times T \times A \times 10^{-6}) \quad (8)$$

Keterangan:

- CH_4_{sawah} = emisi metana dari pengelolaan sawah Gg CH_4 /tahun)
 $E_{F\ rice}$ = faktor emisi metana dari lahan sawah ($E_{F\ rice}$ Indonesia = 1,61 kg CH_4 /(ha.hari))
 T = umur tanam padi (hari)
 A = luas panen (ha/tahun)

Persamaan 9 merupakan persamaan untuk menentukan emisi GRK dari sektor peternakan untuk emisi CH_4 dari pencernaan ternak.

$$CH_4_{CT} = P_T \times E_F \quad (9)$$

Keterangan:

- CH_4_{CT} = emisi metana dari pencernaan ternak (kg CH_4 /tahun)
 P_T = jumlah ternak (ekor)
 E_F = faktor emisi (kg CH_4 /ekor.tahun))

Persamaan 10 merupakan persamaan untuk menentukan emisi GRK dari sektor peternakan untuk emisi CH_4 dari kotoran ternak.

$$CH_{4\text{KT}} = P_T \times E_F \tag{10}$$

Keterangan:

- CH₄_{KT} = emisi metana dari kotoran ternak (kg CH₄/tahun)
- P_T = jumlah ternak (ekor)
- E_F = faktor emisi (kg CH₄/ekor.tahun))

Persamaan 11 merupakan persamaan yang digunakan untuk memperoleh emisi GRK dari sektor peternakan untuk emisi N₂O dari kotoran ternak.

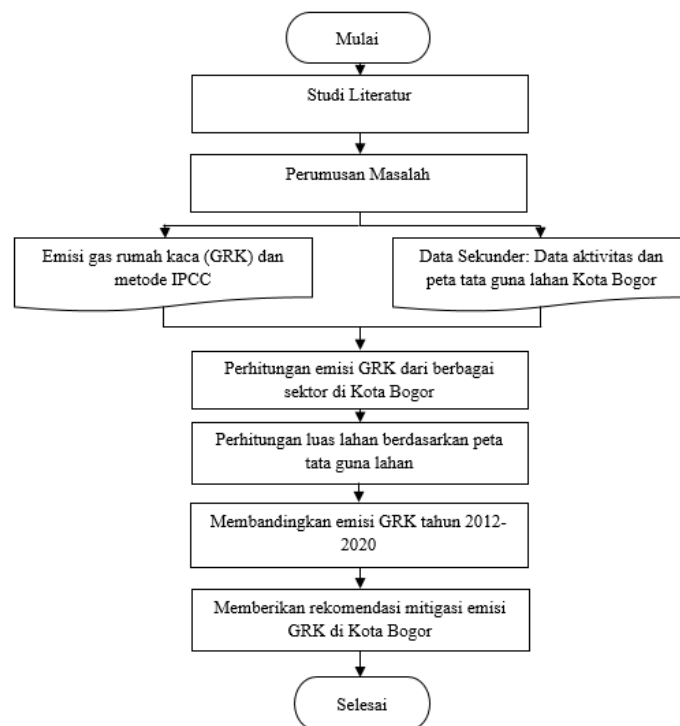
$$N_2O_{KT} = \frac{(E_F \times N_E)}{(1000 \times B_T^{-1})} \times 365 \times \frac{44}{28} \tag{11}$$

Keterangan:

- N₂O_{KT} = emisi N₂O dari kotoran ternak (kg N₂O/tahun)
- E_F = faktor emisi
- N_E = nitrogen yang diekskresikan dari ternak (kg N/(1000 kg berat badan.hari))
- B_T = berat badan ternak (kg)

2.2. Pengolahan Data Penggunaan Lahan di Kota Bogor

Setelah diperoleh besar emisi GRK, dilakukan analisis perubahan penggunaan lahan di Kota Bogor dengan menggunakan data sekunder berupa peta tata guna lahan Kota Bogor. Peta tata guna lahan tahun 2012, 2014, dan 2020 ini kemudian dibuat ulang dengan menggunakan program ArcGIS. Setelah itu, dapat dilakukan perhitungan luas penggunaan lahan di Kota Bogor yang dapat menunjukkan penggunaan lahan di Kota Bogor dari tahun 2012-2020. Kemudian, dapat dilakukan analisis hubungan antara hasil perhitungan emisi GRK dengan perubahan penggunaan lahan di Kota Bogor. Prosedur penelitian secara sederhana dapat dilihat pada Gambar 1.

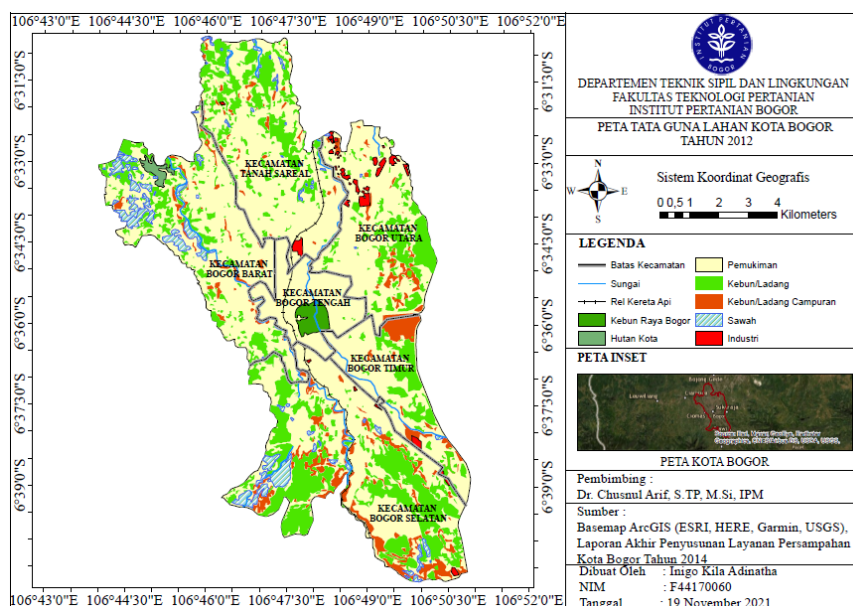


Gambar 1. Diagram alir prosedur penelitian.

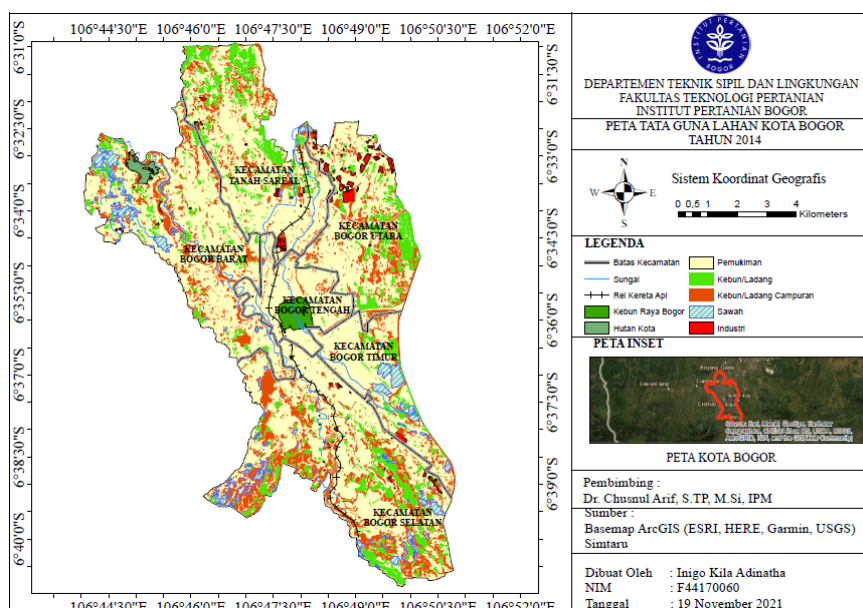
3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Penggunaan Lahan Kota Bogor 2012-2020

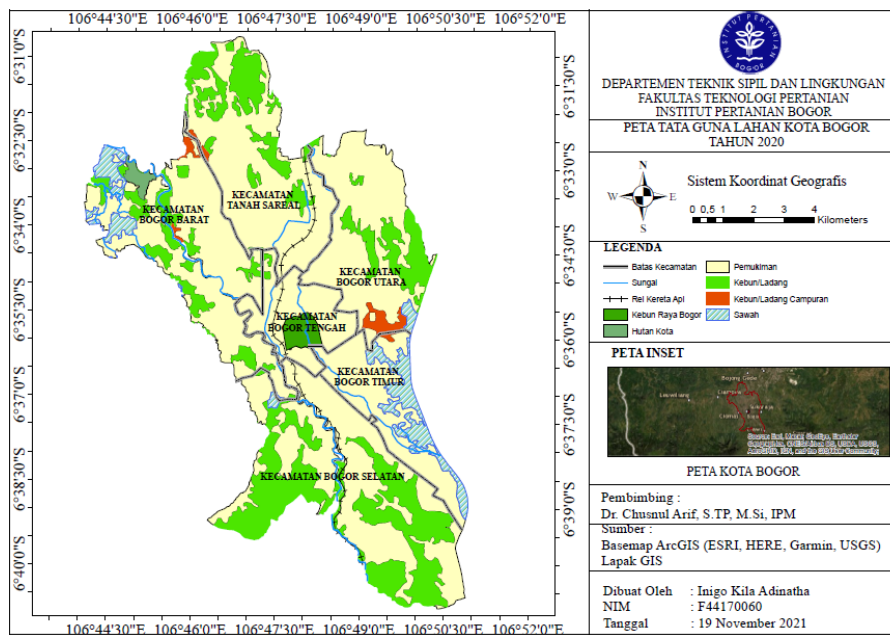
Gambar 2-4 menunjukkan peta tata guna lahan Kota Bogor pada tahun 2012, 2014, dan 2020. Peta-peta tata guna lahan tersebut menunjukkan bahwa terjadi perubahan penggunaan lahan di Kota Bogor dalam 8 tahun terakhir. Pada awalnya legenda untuk tiap tahun memiliki perbedaan jumlah penggunaan lahan, dikarenakan peta yang digunakan berasal dari sumber yang berbeda. Maka dari itu untuk mempermudah, terdapat beberapa penggunaan lahan yang digabungkan, yaitu kebun dan pemukiman. Kebun merupakan gabungan dari kebun, ladang, tegalan, dan semak. Lalu, pemukiman merupakan gabungan dari pemukiman serta fungsi penggunaan lahan lainnya, yaitu industri, tanah kosong, dan danau. Berdasarkan perhitungan luas peta penggunaan lahan tahun 2012-2020 dengan menggunakan program ArcGIS, diperoleh luas tiap fungsi penggunaan lahan Kota Bogor yang ditunjukkan pada Tabel 3.



Gambar 2. Peta tata guna lahan Kota Bogor tahun 2012.



Gambar 3. Peta tata guna lahan Kota Bogor tahun 2014.



Gambar 4. Peta tata guna lahan Kota Bogor tahun 2020.

Tabel 3. Penggunaan lahan Kota Bogor tahun 2012-2020.

Penggunaan Lahan	Luas (ha)		
	2012	2014	2020
Hutan Kota	44,3	50,6	64,9
Industri	103,2	132,5	tidak ada data
Kebun	3.419,6	3.136,5	2.610,4
Pemukiman	7.601,6	7.613,7	7.802,1
Sawah	349,6	302,6	496,0
Total	11.518,3	11.236,0	10.973,4

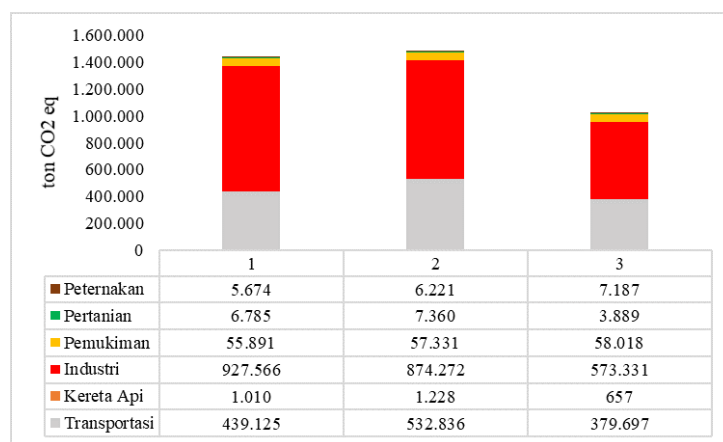
Tabel 3 menunjukkan bahwa penggunaan lahan Kota Bogor didominasi oleh pemukiman dan kebun, dengan tren pemukiman terus mengalami peningkatan akibat pertumbuhan penduduk di Kota Bogor dari tahun ke tahun. Pertumbuhan penduduk yang terjadi tidak hanya mengakibatkan peningkatan permintaan lahan pemukiman, namun juga lahan terbangun lainnya, seperti lahan untuk industri dan infrastruktur [12]. Alih fungsi lahan pertanian serta perkebunan pun dilakukan untuk memenuhi permintaan tersebut. Maka dari itu, Tabel 3 juga menunjukkan bahwa luas lahan kebun terus mengalami penurunan, sedangkan lahan industri mengalami peningkatan. Selain itu, penggunaan lahan hutan kota di Kota Bogor mengalami peningkatan dari tahun 2012 sampai dengan tahun 2020. Tabel 3 juga menunjukkan bahwa Kota Bogor mengalami penurunan luas wilayah, yang disebabkan oleh perubahan batas wilayah, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2-4.

Lahan sawah di Kota Bogor sempat mengalami penurunan pada tahun 2014, kemudian meningkat pada tahun 2020. Terjadinya penurunan luas lahan sawah pada tahun 2014 ini diakibatkan adanya konversi lahan sawah menjadi pemukiman maupun lahan terbangun lainnya. Namun, data juga menunjukkan bahwa luas lahan sawah di Kota Bogor dari tahun 2014 sampai ke 2020 mengalami peningkatan, setelah sebelumnya turun di tahun 2012-2014. Walaupun begitu, perlu diketahui bahwa luas lahan ini merupakan luas lahan sawah secara keseluruhan, bukan lahan sawah yang difungsikan atau luas panen yang digunakan dalam perhitungan emisi. Luas tanam merupakan luas lahan yang ditanami suatu komoditas perkebunan, sedangkan luas panen merupakan luas lahan dari hasil suatu komoditas yang

sudah siap dipanen [13,14]. Walaupun luas tanam berpengaruh terhadap luas panen, luas panen yang diperoleh belum tentu sama dengan luas tanam. Hal ini disebabkan oleh beberapa faktor, seperti iklim, tenaga kerja, serta produktivitas lahan yang menyebabkan gagal panen. Maka dari itu, luas lahan berdasarkan peta tata guna lahan ini tidak dapat dijadikan patokan terhadap besar emisi yang dapat ditimbulkan [14,15].

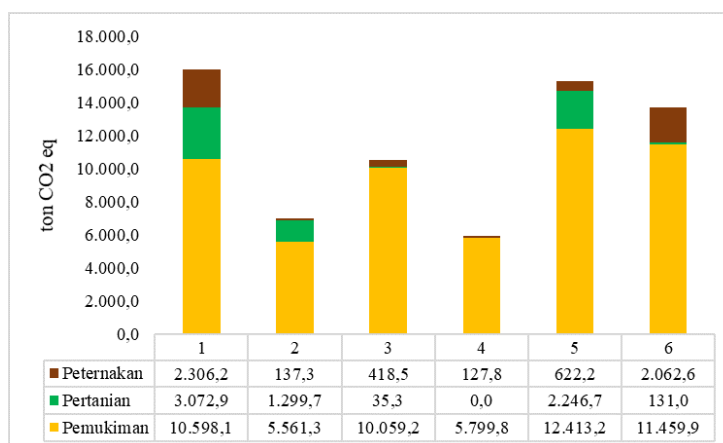
3.2. Emisi Gas Rumah Kaca di Kota Bogor 2012-2020

Hasil perhitungan emisi GRK di Kota Bogor secara keseluruhan pada tahun 2012, 2014, dan 2020 disajikan pada Gambar 5. Digunakan satuan ton CO₂ eq untuk menyatakan besar emisi GRK. Sektor pemukiman, pertanian, dan peternakan disajikan berdasarkan kecamatan, sedangkan sektor transportasi dan sektor industri disajikan untuk Kota Bogor. Hal ini dikarenakan data yang digunakan untuk menghitung emisi sektor transportasi dan industri adalah data untuk Kota Bogor secara keseluruhan.

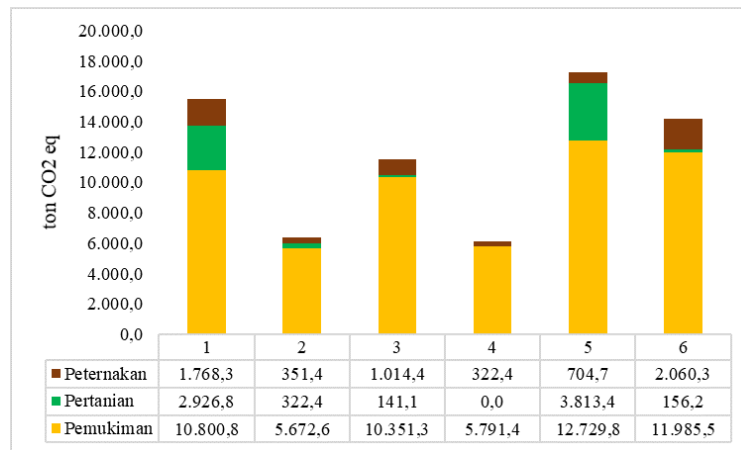


Gambar 5. Besar emisi GRK Kota Bogor tahun 2012, 2014, dan 2020.

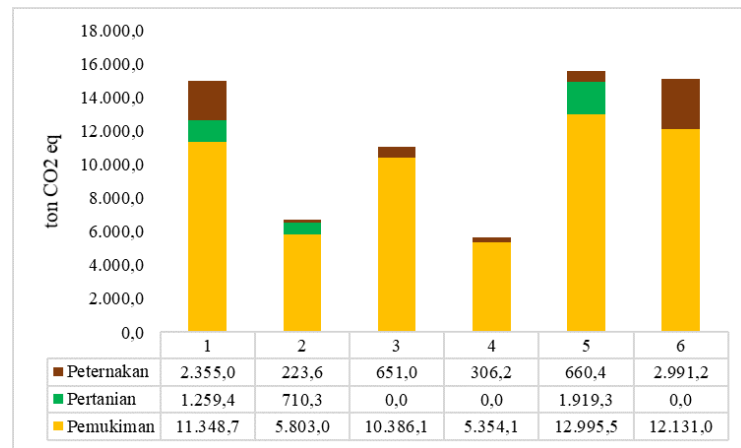
Gambar 5 menunjukkan bahwa emisi di Kota Bogor mengalami peningkatan dari tahun 2012 ke tahun 2014, lalu mengalami penurunan dari tahun 2014 ke tahun 2020. Diketahui total emisi di Kota Bogor adalah 1,44 juta ton CO₂ eq pada tahun 2012, 1,48 juta ton CO₂ eq pada tahun 2014, dan 1,02 juta ton CO₂ eq pada tahun 2020. Walaupun terjadi penurunan emisi pada tahun 2020, sektor-sektor yang menjadi penyumbang emisi terbesar tetap sama, yaitu sektor industri, sektor transportasi jalan raya, dan sektor pemukiman. Lalu, terdapat pula 3 sektor yang datanya tersedia per kecamatan, sehingga dapat diperoleh besar emisi per kecamatan, seperti ditunjukkan pada Gambar 6-8.



Gambar 6. Besar emisi GRK Kota Bogor berdasarkan kecamatan tahun 2012.



Gambar 7. Besar emisi GRK Kota Bogor berdasarkan kecamatan tahun 2014.

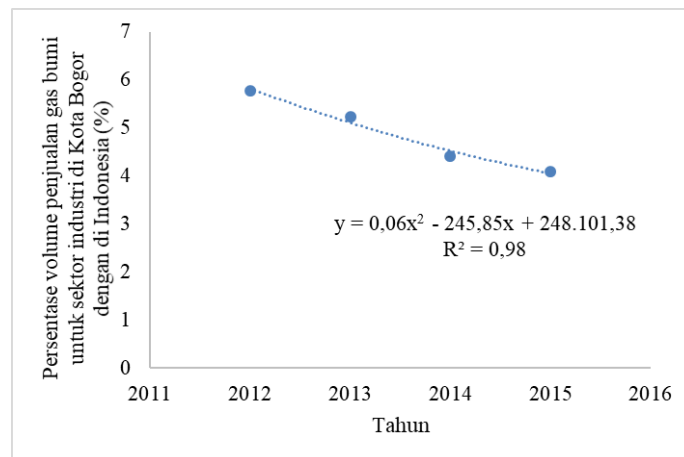


Gambar 8. Besar emisi GRK Kota Bogor berdasarkan kecamatan tahun 2020.

Gambar 6-8 menunjukkan emisi GRK di Kota Bogor berdasarkan kecamatan pada tahun 2012-2020. Berdasarkan Gambar 6, kecamatan yang memiliki emisi tertinggi pada tahun 2012 adalah Kecamatan Bogor Selatan dengan total emisi sebesar 15.977,2 ton CO₂ eq. Lalu, Gambar 7 menunjukkan bahwa kecamatan yang memiliki emisi tertinggi pada tahun 2014 adalah Kecamatan Bogor Barat dengan total emisi sebesar 17.248 ton CO₂ eq. Kemudian, Gambar 8 menunjukkan bahwa kecamatan dengan emisi tertinggi pada tahun 2020 adalah Kecamatan Bogor Barat dengan total emisi sebesar 15.575,2 ton CO₂ eq. Sedangkan, kecamatan dengan emisi terendah untuk ketiga tahun tersebut adalah Kecamatan Bogor Tengah, yang diakibatkan oleh luas wilayah yang sempit. Ini juga menyebabkan hanya terdapat sedikit penggunaan lahan untuk peternakan dan tidak terdapat penggunaan lahan untuk sawah di Kecamatan Bogor Tengah.

Gambar 5 menunjukkan bahwa sektor transportasi kereta api merupakan sektor penyumbang emisi terkecil pada tahun 2012, 2014, dan tahun 2020. Sektor transportasi kereta api menyumbang emisi sebesar 1.010 ton CO₂ eq atau 0,07% dari total emisi di Kota Bogor pada tahun 2012. Kemudian, sektor transportasi kereta api menyumbang emisi sebesar 1.228 ton CO₂ eq atau 0,08% dari total emisi di Kota Bogor pada tahun 2014. Lalu, sektor transportasi kereta api menyumbang emisi sebesar 657 ton CO₂ eq atau 0,06% dari total emisi di Kota Bogor pada tahun 2020. Rendahnya emisi GRK dari sektor kereta api ini dikarenakan emisi GRK sektor kereta api hanya berasal dari freon AC yang digunakan kereta api listrik (KRL) serta dari energi listrik yang digunakan di stasiun KRL. Operasional KRL Jabodetabek menggunakan sumber listrik yang berasal dari PLTA, sehingga tidak terdapat emisi CO₂ [16].

Terdapat 3 sektor yang dapat dilihat hubungan antara besar emisi dengan penggunaannya, yaitu sektor pertanian, industri, dan pemukiman, tetapi hanya sektor pemukiman yang besar emisinya berbanding lurus dengan luas lahannya. Adanya ketidaksesuaian antara besar emisi dengan luas lahan sawah dikarenakan luas lahan yang digunakan di peta tata guna lahan merupakan luas lahan sawah secara keseluruhan, sedangkan luas yang digunakan dalam perhitungan emisi merupakan luas panen. Selain itu, terdapat faktor lain seperti iklim, tenaga kerja, serta produktivitas lahan yang dapat menyebabkan gagal panen dan menurunkan besar luas panen [15]. Kemudian, terjadi peningkatan luas lahan industri dari tahun 2012 ke tahun 2014, namun besar emisi yang dihasilkan terus menurun. Ini dapat disebabkan oleh beberapa kemungkinan, yaitu perbedaan bahan bakar yang digunakan serta sudah diterapkan efisiensi energi. Data aktivitas yang digunakan untuk menghitung emisi dari konsumsi gas bumi juga tidak tersedia setiap tahunnya, sehingga data yang digunakan pada tahun 2020 diperoleh dengan mengalikan persentase konsumsi gas bumi di Kota Bogor dengan konsumsi di Indonesia dengan proyeksi, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 9. Kurva eksponensial dari persentase volume penjualan gas bumi untuk sektor industri di Kota Bogor dari tahun 2012-2015.

Diketahui, emisi di Kota Bogor pada tahun 2014 mengalami peningkatan sebesar 3% dari tahun 2012, namun mengalami penurunan sebesar 30,9% pada tahun 2020 apabila dibandingkan dengan tahun 2014. Penurunan emisi GRK ini terjadi di semua sektor, kecuali sektor pemukiman dan sektor peternakan. Penurunan emisi terbesar terjadi pada sektor pertanian (47,2%), sektor kereta api (46,5%), sektor industri (34,4%), dan sektor transportasi jalan raya (28,7%). Berdasarkan data, jumlah kendaraan dan industri di Kota Bogor meningkat tiap tahunnya, seiring dengan terus bertambahnya jumlah penduduk di Kota Bogor, sehingga seharusnya jumlah emisi pada tahun 2020 meningkat dari tahun 2014. Maka dari itu, terdapat faktor lain yang menyebabkan terjadinya penurunan emisi di Kota Bogor pada tahun 2020.

Penurunan emisi di sektor transportasi dan industri di Kota Bogor pada tahun 2020 ini utamanya disebabkan oleh kebijakan terkait pandemi Covid-19. Beberapa kebijakan terkait pandemi Covid-19 yang berdampak terhadap kedua sektor ini adalah kebijakan “Kerja dari Rumah” dari Perkantoran, pembatasan aktivitas industri karena menurunnya permintaan produk, serta pembatasan mobilitas ke sekolah atau kampus. Pembatasan kegiatan transportasi dan produksi industri (termasuk UMKM) ini mengakibatkan konsumsi energi menurun [17]. Menurunnya konsumsi energi pun berdampak terhadap industri minyak dan gas bumi yang mengalami penurunan permintaan, penurunan harga, dan kelebihan produksi dalam kurun pandemi Covid-19 pada tahun 2020 [18].

Adanya peningkatan emisi di sektor pemukiman dan peternakan menunjukkan bahwa pandemi Covid-19 memiliki dampak berbeda ke tiap sektor kehidupan masyarakat. Peningkatan emisi di sektor pemukiman diakibatkan oleh adanya pembatasan kegiatan masyarakat, sebagian besar kegiatan

masyarakat dilakukan di rumah, seperti belajar, bekerja, berbelanja atau melakukan transaksi dari rumah, serta tidak melakukan perjalanan ke dalam maupun ke luar negeri [18]. Maka dari itu, penggunaan energi, berupa LPG di rumah cenderung stabil atau bahkan meningkat. Kemudian, sektor peternakan memiliki tren tersendiri untuk tiap jenis ternak yang cenderung stagnan bahkan meningkat tiap tahunnya, termasuk pada tahun 2020, sehingga tidak terlalu atau tidak sama sekali terdampak oleh pandemi [19].

3.3. Mitigasi Emisi Gas Rumah Kaca di Kota Bogor

3.3.1. Mitigasi GRK Secara Umum

Diketahui sebelumnya emisi GRK di Kota Bogor mengalami penurunan pada tahun 2020. Walaupun begitu, tetap diperlukan cara untuk menurunkan emisi GRK di Kota Bogor, terutama untuk mencegah peningkatan emisi kembali ketika pandemi telah berakhir. Mitigasi emisi GRK merupakan salah satu cara mengurangi dampak pemanasan global akibat GRK, yaitu dengan menurunkan emisi dari sumbernya atau dengan meningkatkan usaha penyerapan dan pengkonversian GRK. Selain itu, mitigasi GRK juga dapat memiliki dampak positif terhadap aspek sosial dan ekonomi [20]. Aksi mitigasi yang dilakukan berbeda untuk tiap sektor, namun pada dasarnya terdapat empat strategi utama mitigasi GRK [21]. Empat strategi utama penerapan mitigasi emisi GRK tersebut ialah:

- a. Eliminasi, yaitu menghindari aktivitas dan penggunaan alat-alat yang dapat menghasilkan emisi GRK. Salah satu contohnya adalah mematikan lampu saat tidak digunakan.
- b. Pengurangan, yaitu melakukan efisiensi energi pada tiap aktivitas. Salah satu contohnya adalah memilih peralatan elektronik yang lebih hemat listrik.
- c. Substitusi, yaitu strategi untuk mengganti teknologi atau mengubah perilaku yang menimbulkan emisi GRK yang besar dengan teknologi atau perilaku yang rendah emisi. Salah satu contohnya adalah penggunaan energi terbarukan.
- d. *Offset*, yaitu strategi mitigasi emisi GRK dengan menyerap konsentrasi GRK yang telah dihasilkan. Salah satu contohnya adalah reforestasi untuk menyerap emisi gas karbondioksida akibat aktivitas manusia.

3.3.2. Mitigasi GRK di Sektor Transportasi

Terdapat tiga strategi mitigasi emisi GRK untuk sektor transportasi, yaitu *avoid/reduce* atau menghindari atau mengurangi perjalanan atau kebutuhan untuk perjalanan (terutama di daerah perkotaan) melalui penatagunaan lahan, *shift* atau beralih ke moda transportasi yang lebih ramah lingkungan, serta *improve* atau meningkatkan efisiensi energi dari moda transportasi dan teknologi kendaraan [22]. Dengan adanya pandemi, strategi mengurangi perjalanan telah dilakukan dengan diterapkannya *work from home*, meskipun ini juga menyebabkan peralihan ke moda transportasi yang lebih ramah lingkungan, seperti kereta api berkurang. Terdapat pula kebijakan yang diterapkan oleh Pemerintah Kota Bogor dalam rangka menurunkan mobilitas warga selama pandemi, yaitu kebijakan Ganjil Genap. Selain dinilai efektif dalam menurunkan mobilitas warga, respon yang ditunjukkan oleh masyarakat terhadap penerapan kebijakan sistem ganjil genap ini sangat baik [23].

3.3.3. Mitigasi GRK di Sektor Industri

Terdapat beberapa aksi mitigasi yang dapat dilakukan di sektor industri. Pertama ialah efisiensi penggunaan sumber energi untuk proses industri sehingga dapat menghasilkan produksi yang maksimal dengan menggunakan energi seminimal mungkin. Kedua adalah melakukan efisiensi pemakaian energi dengan melakukan perubahan pada tahapan proses produksi atau modifikasi desain proses yang bertujuan untuk memperoleh pasokan energi, seperti dengan mengembangkan *Heat Recovery*. Ketiga, penggunaan energi alternatif yang ramah lingkungan, seperti dari pembangkit listrik tenaga air, angin, uap, cahaya matahari, biodiesel, dan nuklir. Aksi keempat yang dapat dilakukan adalah melakukan

standarisasi pabrik dan sistem industri lainnya, sehingga pabrik perlu memenuhi standar terlebih dahulu sebelum dapat beroperasi [24].

3.3.4. Mitigasi GRK di Sektor Pemukiman

Mitigasi GRK di sektor pemukiman dapat dilakukan dengan mengganti bahan bakar masak menjadi biogas atau gas bumi. Diketahui 15 m³ gas bumi setara dengan LPG (*liquefied petroleum gas*) ukuran 12 kg non subsidi. Lalu, dengan konsumsi normal rata-rata rumah tangga per bulan sekitar 10 m³, penggunaan gas bumi dapat menghemat sekitar Rp 40.000 apabila dibandingkan dengan konsumsi LPG 12 kg sebanyak 10 m³ [25]. Lalu, apabila menggunakan biogas, emisi GRK dapat turun sebesar 418,1 kg CO₂ eq/tahun. Walaupun penurunan emisi GRK dari proses substitusi LPG ke biogas tidak terlalu besar, penggunaan biogas memberikan manfaat lain berupa penghematan karena tidak perlu lagi membeli LPG. Apabila kebutuhan LPG mencapai 2-3 tabung LPG ukuran 3 kg setiap bulannya, maka dengan asumsi harga LPG ukuran tabung 3 kg adalah Rp 20.000, maka masyarakat dapat menghemat Rp 40.000-Rp 60.000 per bulan [26]. Peralihan bahan bakar menjadi gas bumi sudah mulai mengalami peningkatan dalam beberapa tahun terakhir, yang ditunjukkan dengan peningkatan dari sebanyak 16.356 pengguna pada tahun 2012 menjadi 16.542 pengguna pada tahun 2014 [27].

3.3.5. Mitigasi GRK di Sektor Pertanian

Terdapat beberapa strategi aksi mitigasi yang dapat dilakukan di sektor pertanian. Strategi-strategi tersebut ialah dengan melakukan manajemen air selektif, menggunakan varietas rendah emisi namun tinggi produktivitas, serta paket teknologi budidaya ramah lingkungan [28]. Berdasarkan penelitian, manajemen air selektif, seperti penerapan irigasi *intermittent* dapat menurunkan emisi gas metana sebesar 33,18% dan potensi pemanasan global GRK sebesar 34,9% apabila dibandingkan dengan penerapan irigasi konvensional [29]. Namun, agar aksi mitigasi ini dapat berjalan baik, perlu dilakukan sosialisasi secara masif dan menyeluruh kepada petani/kelompok tani tentang dampak, strategi mitigasi, dan adaptasi perubahan iklim dalam rangka mempertahankan dan mengembangkan usaha tani komoditas pangan, khususnya padi yang efisien, ramah lingkungan, dan berkelanjutan [28]. Telah terdapat beberapa sistem usaha tani padi ramah lingkungan yang salah satunya dilakukan di Kelurahan Situgede. Namun, produktivitas padi ramah lingkungan ini masih lebih rendah dibandingkan dengan produktivitas padi anorganik dikarenakan petani yang belum menguasai teknik budidaya padi secara ramah lingkungan [30].

3.3.6. Mitigasi GRK di Sektor Peternakan

Strategi mitigasi sektor peternakan dapat dilakukan melalui pemilihan jenis pakan, pemberian suplemen, maupun penambahan bahan kimia dan cara mekanik dalam proses pembuatan pakan yang bertujuan untuk meningkatkan efisiensi penggunaan pakan dan produktivitas ternak [31]. Peternak dapat melakukan proses pengawetan pakan, seperti amoniasi dan pembuatan silase. Pengawetan pakan ini dilakukan untuk meningkatkan daya cerna jerami padi, sehingga dapat meningkatkan jumlah bahan kering yang dikonsumsi ternak. Diketahui, strategi perbaikan pakan dengan menggunakan konsentrat dan daun leguminosa dapat menurunkan emisi gas metana enterik dari sapi potong sebesar 0,6631 ton CO₂ eq/tahun (dihitung dengan metode tier 1) dan sebesar 0,0545 ton CO₂ eq/tahun (dihitung dengan metode tier 2) [32].

Selain dengan perubahan pakan ternak, aksi mitigasi di sektor peternakan dapat dilakukan dengan pemanfaatan biogas dan pupuk organik. Pendapatan yang diperoleh dari instalasi biogas dapat mencapai Rp 600.000/bulan, apabila dikonversikan dengan harga dan nilai kalori LPG. Diketahui pula bahwa secara ekonomi, investasi tersebut layak dengan perbandingan keuntungan dan biaya sebesar 1,35. Beberapa mitigasi yang telah dilakukan di Kota Bogor adalah dengan menggantikan penggunaan rumput sebagai sumber hijauan pakan dengan penggunaan limbah pasar dan limbah pertanian. Selain itu, sudah

terdapat beberapa peternak yang memiliki *digester* pembuatan biogas yang merupakan bantuan dari Pemerintah Daerah [31].

4. Kesimpulan

1. Adanya ketidaksesuaian antara perubahan penggunaan lahan dengan besar emisi di Kota Bogor pada tahun 2012-2020 untuk sektor pertanian dan industri menunjukkan bahwa luas lahan berdasarkan peta tata guna lahan tidak dapat dijadikan patokan terhadap besar emisi yang dapat ditimbulkan.
2. Emisi di Kota Bogor mengalami peningkatan dari 1,44 juta ton CO₂ eq pada tahun 2012 menjadi 1,48 juta ton CO₂ eq pada tahun 2014, lalu mengalami penurunan menjadi 1,02 juta ton CO₂ eq pada tahun 2020.
3. Aksi mitigasi emisi gas rumah kaca yang dapat dilakukan di tiap sektor aktivitas didasarkan pada empat strategi mitigasi berikut: eliminasi, pengurangan, substitusi, dan *offset*.

Daftar Pustaka

- [1] Lintangrino M, Boedisantoso R. Inventarisasi emisi gas rumah kaca pada sektor pertanian dan peternakan di Kota Surabaya. *J Tek*. 2016; 5:D53–7.
- [2] Purwanta W. Penghitungan emisi gas rumah kaca dari sektor sampah perkotaan di Indonesia. *J Tek Lingkungan*. 2009;10:1–8.
- [3] Indrawan M, Primack R, Supriatna J. *Biologi Konservasi*. Revisi. Jakarta (ID): Yayasan Obor Indonesia; 2007.
- [4] Latuconsina H. Dampak pemanasan global terhadap ekosistem pesisir dan lautan. *Agrikan. J Agribisnis Perikan*. 2010;3:30. <https://doi.org/10.29239/j.agrikan.3.1.30-37>.
- [5] Undang-undang Republik Indonesia. *Pengesahan Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change (Protokol Kyoto atas Konvensi Kerangka Kerja Perserikatan Bangsa-Bangsa Tentang Perubahan Iklim)*. Indonesia: 2004.
- [6] Muhudi A. Analisis Keseimbangan Sumber dan Rosot Gas Rumah Kaca (GRK) di Kota Bogor. [tesis]. Institut Pertanian Bogor, 2019. <https://doi.org/10.22201/fq.18708404e.2004.3.66178>.
- [7] Setiawan G. Estimasi Emisi Karbondioksida Equivalen (CO₂-eq) Akibat Perubahan Penggunaan Lahan di Kabupaten Bogor. [tesis]. Institut Pertanian Bogor, 2015.
- [8] Agus F, Santosa I, Dewi S, Setyanto P, Thamrin Y, Wulan C, et al. *Pedoman Teknis Perhitungan Baseline Emisi dan Serapan Gas Rumah Kaca Sektor Berbasis Lahan: Buku I Landasan Ilmiah*. Jakarta (ID): Badan Perencanaan Pembangunan Nasional; 2013.
- [9] Sibarani R. Tantangan tata kelola kebijakan perubahan iklim di Indonesia (studi kasus: komparasi antara penerapan desentralisasi dan multi-level governance). *J Huk Lingkungan Indones* . 2017;4:61–86. <https://doi.org/10.38011/jhli.v4i1.50>.
- [10] Chaerul M, Febrianto A, Tomo HS. Peningkatan kualitas penghitungan emisi gas rumah kaca dari sektor pengelolaan sampah dengan metode IPCC 2006 (studi kasus: Kota Cilacap). *J Ilmu Lingkungan*. 2020;18:153–61. <https://doi.org/10.14710/jil.18.1.153-161>.
- [11] Putra DFS, Hermana J. Pemodelan spasial beban sumber emisi gas rumah kaca di Kecamatan

- Driyorejo. *J Tek POMITS*. 2014;3:C273–8.
- [12] Sulikawati, Jupri, Somantri L. Dampak alih fungsi lahan pertanian menjadi permukiman terhadap perubahan nilai lahan di Kecamatan Bogor Utara Kota Bogor. *Antol Pendidik Geogr*. 2016;4:1–12.
- [13] Anisa, Syafitri U. Pendugaan luas panen berdasarkan luas tanam padi Propinsi Sulawesi Selatan dengan model state space. *J Mat Stat dan Komputasi*. 2006;2:50–7.
- [14] Saputri W, Amalita N. Analisa tentang luas tanam dan luas panen di bidang komoditi perkebunan di Provinsi Sumatera Barat dengan menggunakan analisis profil. *UNPjoMath*. 2020;3:85–9.
- [15] Yulianda. *Pengaruh luas tanam, luas panen dan tenaga kerja terhadap produksi kedelai di Kecamatan Lhoong Kabupaten Aceh Besar*. Universitas Syah Kuala, 2015.
- [16] Ayuningtyas U. *Life cycle assessment (LCA) penggunaan bahan bakar dan energi listrik pada transportasi massal di DKI Jakarta*. Bogor (ID): 2019.
- [17] Nugroho H, Muhyiddin. Menurun dan meningkat, maju namun belum cukup: kinerja pembangunan sektor energi di tengah pandemi Covid-19 tahun 2020. *Bappenas Work Pap*. 2021;4:1–12. <https://doi.org/10.47266/bwp.v4i1.95>.
- [18] Widyastuti NL, Nugroho H. Dampak Covid-19 terhadap industri minyak dan gas bumi: rekomendasi kebijakan untuk Indonesia. *J Perenc Pembang Indones J Dev Plan*. 2020;4:166–76. <https://doi.org/10.36574/jpp.v4i2.116>.
- [19] BPS RI. *Peternakan Dalam Angka 2020*. Jakarta (ID): BPS RI; 2020.
- [20] Wahyudi J. Mitigasi emisi gas rumah kaca. *J Litbang*. 2016;12:104–12.
- [21] Simpson M, Gössling S, Scott D, Hall C, Gladin E. *Climate Change Adaptation and Mitigation in the Tourism Sector*. Frameworks, Tools and Practices. Paris (FR): UNEP, University of Oxford, UNWTO, WMO; 2008.
- [22] Lestari JA. *Strategi adaptasi dan mitigasi penurunan emisi gas rumah kaca (GRK) sektor transportasi dan sektor persampahan di Kota Batu*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2017.
- [23] Rachmi H, Suparni, Kaafi A Al. Analisis sentimen sistem ganjil genap Kota Bogor. *J ELTIKOM*. 2021;5:92–9. <https://doi.org/10.31961/eltikom.v5i2.429>.
- [24] Muryani. Produksi bersih dan model kerjasama sebagai upaya mitigasi emisi gas rumah kaca pada sektor industri. *Dialektika*. 2018;13:48–65. <https://doi.org/10.20473/dk.v13i1.2018.48-65>.
- [25] Wicaksono PE. *Pakai Gas Bumi Lebih Hemat Dibanding LPG, Ini Hitungannya*. Liputan 6 2019.
- [26] Wahyudi J. *Potensi Produksi Biogas dan Mitigasi Emisi Gas Rumah Kaca di Industri Tahu*. Pros. SNST ke-8, Semarang (ID): 2017.
- [27] BPS Kota Bogor. *Kota Bogor dalam Angka 2015*. Bogor (ID): BPS Kota Bogor; 2015.
- [28] Najamuddin M. Strategi mitigasi emisi gas metan pada budidaya padi sawah. *J Agribisnis*. 2014;8:171–88. <https://doi.org/10.15408/aj.v8i2.5136>.
- [29] Utaminingsih W, Hidayah S. Mitigasi emisi gas rumah kaca melalui penerapan irigasi intermitten di lahan sawah beririgasi. *J Irig*. 2012;7:132–41. <https://doi.org/10.31028/ji.v7.i2.132-141>.

- [30] Ridwan. *Analisis Usahatani Padi Ramah Lingkungan dan Padi Anorganik Kasus: Kelurahan Situgede*, Kecamatan Bogor Barat, Kota Bogor. 2008.
- [31] Herawati T. Refleksi sosial dari mitigasi emisi gas rumah kaca pada sektor peternakan di Indonesia. *Wartazoa*. 2012;22:35–46.
- [32] Nurhayati I, Widiawati Y. Mitigasi Gas Rumah Kaca Subsektor Peternakan di Kabupaten Subang, Jawa Barat. *Pros. Semin. Nas. Teknol. Peternak. dan Vet.*, 2019, p. 226–36. <https://doi.org/10.14334/pros.semnas.tpv-2019-p.214-224>.