



Terakreditasi Sinta Peringkat 4 (S4)



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Profil Emisi Gas Rumah Kaca di Kabupaten Sambas

Iqbal Halim^{1*}, Dian Rahayu Jati¹, dan Aini Sulastr¹

¹Jurusan Teknik Lingkungan Universitas Tanjungpura

*E-mail: hanshalimiqb10@student.untan.ac.id

Submitted : 25-06-2025 Revised : 06-01-2026 Accepted : 07-01-2026

Abstract

Climate change is the phenomenon of increasing concentrations of greenhouse gases (GHG) in the Earth's atmosphere. Sambas Regency, the extreme coastal area of West Kalimantan, has a population of 647,800. It contributes to greenhouse gas emissions from various activities, such as transportation, waste management, agriculture, plantation, and animal husbandry. This research aims to calculate greenhouse gas emissions across multiple sectors, create an emissions map, and identify mitigation efforts. The study's results are expected to inform the Sambas Regency Government in designing mitigation actions that are easy to implement in the field. The method used to conduct this greenhouse gas emission inventory follows Tier-1 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 2006 guidelines, with emission factors set to the IPCC standard. Activity data used in the emission inventory is sourced from secondary data. Meanwhile, mitigation options were generated from literature studies. The results showed that the total GHG emissions in the Agriculture sector in Sambas Regency reached 277.25 Gg CO₂-eq, in the Plantation sector the total GHG emissions in the Palm Oil Plantation sector in Sambas Regency reached 13.40 Gg CO₂-eq, the total GHG emissions in the transportation sector in Sambas Regency reached 228.20 Gg CO₂-eq, the total GHG emissions in the Livestock sector in Sambas Regency reached 0.684 Gg CO₂-eq. The total GHG emissions in the waste sector in Sambas Regency reached 0.0901 Gg CO₂-eq.

Keywords: Emissions, Greenhouse gases, Sectors.

Abstrak

Perubahan iklim adalah fenomena meningkatnya konsentrasi Gas Rumah Kaca (GRK) di atmosfer bumi. Kabupaten Sambas yang merupakan daerah pesisir paling ujung Kalimantan Barat dan memiliki jumlah penduduk sebanyak 647.800 jiwa. Berkontribusi dalam menghasilkan emisi gas rumah kaca dari berbagai aktivitas yang ada didalamnya seperti kegiatan penggunaan transportasi, persampahan, pertanian, perkebunan, dan peternakan. Penelitian ini bertujuan untuk menghitung jumlah emisi gas rumah kaca dari berbagai sektor, membuat peta emisi, dan upaya mitigasi. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi masukan bagi Pemerintah Kabupaten Sambas dalam merancang aksi mitigasi yang mudah diterapkan di lapangan. Metode yang digunakan untuk melakukan inventarisasi emisi gas rumah kaca ini adalah Tier-1 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) Tahun 2006, dimana faktor emisi yang digunakan adalah standard IPCC. Data aktivitas yang digunakan dalam inventarisasi emisi bersumber dari data sekunder. Sedangkan opsi mitigasi dihasilkan dari studi literatur. Hasil penelitian menunjukkan bahwa total emisi GRK sektor Pertanian di Kabupaten Sambas mencapai 277,25 Gg CO₂-eq, pada sektor Perkebunan total emisi GRK sektor Perkebunan Kelapa Sawit di Kabupaten Sambas mencapai 13,40 Gg CO₂-eq, total emisi GRK pada sektor transportasi di Kabupaten Sambas mencapai 228,20 Gg CO₂-eq, total emisi GRK pada sektor Peternakan di Kabupaten Sambas mencapai 0,684 Gg CO₂-eq, dan total emisi GRK pada sektor persampahan di Kabupaten Sambas mencapai 0,0901 Gg CO₂-eq.

Kata Kunci: Emisi, Gas rumah kaca, Sektor.

PENDAHULUAN

Indonesia saat ini telah merasakan secara nyata berbagai konsekuensi perubahan iklim, mulai dari kecenderungan peningkatan suhu udara, kenaikan muka air laut, hingga semakin seringnya kejadian bencana hidrometeorologi. Dalam kerangka United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), gas rumah kaca (GRK) diklasifikasikan ke dalam enam golongan utama, yaitu karbon dioksida (CO_2) (Alwin, 2016), metana (CH_4), dinitro oksida (N_2O), sulfur heksafluorida (SF_6), perfluorokarbon (PFCs), dan hidroflokarbon (HFCs). Meningkatnya konsentrasi gas-gas tersebut di atmosfer terutama didorong oleh berbagai aktivitas antropogenik, seperti pembakaran bahan bakar fosil, perubahan tata guna lahan dan deforestasi, serta kegiatan di sektor pertanian dan peternakan yang menghasilkan emisi GRK (Anggraeni, 2015). Rangkaian aktivitas manusia inilah yang pada akhirnya memicu fenomena yang disebut perubahan iklim, yang secara substantif dapat dipahami sebagai kondisi meningkatnya konsentrasi gas rumah kaca di atmosfer bumi dari waktu ke waktu (Wardani et al., 2017).

Penyusunan Profil Emisi GRK Kabupaten Sambas dilakukan karena wilayah ini, yang terletak di kawasan pesisir paling ujung Kalimantan Barat dengan jumlah penduduk sekitar 647.800 jiwa, menjadi salah satu sumber emisi gas rumah kaca yang bersumber dari beragam aktivitas manusia, antara lain penggunaan sarana transportasi, pengelolaan persampahan, kegiatan pertanian, serta usaha peternakan. Profil emisi tersebut dibutuhkan untuk mengetahui tingkat, status, dan kecenderungan emisi GRK di daerah ini secara lebih sistematis sehingga dapat disusun langkah inventarisasi dan strategi mitigasi penurunan emisi yang tepat sasaran. Atas dasar pertimbangan tersebut, dilaksanakan kegiatan Koordinasi, Sinkronisasi, dan Pelaksanaan Pengendalian Emisi Gas Rumah Kaca (Chaerul et al., 2020), Mitigasi, dan Adaptasi Perubahan Iklim yang diarahkan untuk menghasilkan dokumen Profil Emisi GRK Kabupaten Sambas sebagai acuan dalam perencanaan kebijakan pengendalian emisi di masa mendatang.

Dalam konteks tersebut, penelitian ini disusun untuk merespons tiga rumusan pertanyaan utama, yaitu: (1) berapakah besaran emisi gas rumah kaca yang ditimbulkan dari berbagai aktivitas di Kabupaten Sambas, khususnya yang berasal dari sektor pertanian, peternakan, transportasi, serta pengelolaan persampahan? (2) bagaimana visualisasi dan karakteristik sebaran spasial emisi gas rumah kaca tersebut apabila dituangkan dalam bentuk peta emisi di wilayah Kabupaten Sambas? dan (3) upaya-upaya mitigasi apa saja yang dapat dirumuskan dan diterapkan guna menurunkan tingkat emisi gas rumah kaca yang muncul dari aktivitas pertanian, perkebunan, peternakan, transportasi, dan persampahan di Kabupaten Sambas?.

Kajian inventarisasi GRK sektor pertanian dalam lima tahun terakhir semakin banyak memanfaatkan pendekatan spasial (penginderaan jauh dan pemodelan) untuk memetakan emisi metana sawah secara detail, sehingga estimasi emisi dapat diturunkan ke unit wilayah yang lebih kecil dan lebih relevan untuk perencanaan mitigasi (Rahmi & others, 2025). Bukti empiris terkini menunjukkan bahwa praktik pengelolaan air sawah seperti alternate wetting and drying berpotensi menurunkan CH_4 , tetapi dampaknya sangat dipengaruhi oleh konteks agroekologi dan praktik budidaya setempat sehingga perlu dipadankan dengan data lapangan lokal (Dahlgreen & Parr, 2024). Di Indonesia, variasi komposisi pupuk dan varietas padi terbukti dapat mengubah pola emisi CH_4 dan N_2O sekaligus mempengaruhi hasil panen, yang mengindikasikan bahwa strategi mitigasi pertanian perlu dirancang berbasis kombinasi “produktivitas–emisi” (bukan hanya salah satunya) (Slameto & others, 2024). Pada sektor peternakan, penguatan inventaris juga bergerak menuju pendekatan prediktif berbasis data termasuk pemodelan emisi metana pada sistem sapi perah skala kecil—yang menekankan pentingnya ketersediaan data manajemen ternak dan produksi untuk meningkatkan akurasi estimasi pada skala lokal (Choo & Raghavan, 2025).

Di sektor persampahan dan transportasi, studi inventarisasi subnasional di Indonesia menunjukkan penggunaan pedoman IPCC (Tier 1 dan Tier 2), proyeksi BAU, serta perancangan strategi mitigasi berbasis analisis keputusan (misalnya SWOT dan QSPM), sehingga inventaris tidak berhenti pada angka emisi tetapi diarahkan menjadi dasar paket intervensi yang operasional (Hardyanti et al., 2022). Literatur terbaru juga memperlihatkan bahwa opsi refuse and derived fuel (RDF) dapat menurunkan emisi dengan mengalihkan fraksi sampah dari landfill sekaligus memulihkan energi, sehingga relevan sebagai skema mitigasi yang dapat diintegrasikan dengan skenario pengelolaan persampahan daerah. (Sari & others, 2025).

Pada sektor transportasi, instrumen ekonomi seperti carbon tax dibahas sebagai pendorong perubahan perilaku dan teknologi menuju mobilitas rendah karbon, tetapi efektivitasnya sangat bergantung pada ketepatan inventaris emisi dan ketelusuran data aktivitas sektor transportasi (Pranita & others, 2025). Sejalan dengan itu, analisis transisi energi transportasi Indonesia dengan pendekatan multi level menegaskan bahwa kebijakan, inovasi, dan dinamika pasar harus dibaca sebagai satu sistem, sehingga inventaris GRK sektoral dibutuhkan sebagai tolok ukur untuk menilai apakah transisi benar-benar menurunkan emisi (bukan sekadar berganti teknologi) (Fathoni & others, 2025).

Untuk konteks risiko iklim yang melatarbelakangi urgensi pengendalian emisi, evaluasi kinerja produk satelit curah hujan untuk Indonesia dan analisis kejadian ekstrem menunjukkan perlunya deret data hidroklimat yang kuat karena kejadian hidrometeorologi berkaitan erat dengan dinamika curah hujan ekstrem dan variabilitas musiman (Ramadhan & others, 2023). Di wilayah pesisir Indonesia, kenaikan muka air laut yang berinteraksi dengan penurunan tanah terbukti meningkatkan kerentanan banjir, sehingga pendekatan spasial (pemetaan) menjadi penting untuk menyandingkan paparan wilayah dengan prioritas intervensi (Lumban-Gaol & others, 2024). Kajian kerentanan rob di pesisir Indonesia juga menunjukkan bahwa parameter geomorfologi, tren muka air laut, perubahan garis pantai, serta kondisi mangrove berperan dalam membentuk tingkat kerentanan, yang relevan bagi kabupaten pesisir dalam merancang respons mitigasi–adaptasi yang berbasis lokasi (Putiarni et al., 2023).

Sementara itu, pemodelan perubahan suhu permukaan berbasis Landsat dan pemodelan spasial dinamis di wilayah perkotaan Indonesia menegaskan bahwa perubahan tutupan lahan dapat mempercepat pemanasan lokal, sehingga informasi spasial perlu dipertimbangkan bersama inventaris emisi untuk membaca tekanan iklim di tingkat daerah (Wijaya & others, 2025). Bukti tren jangka panjang di wilayah metropolitan Indonesia juga menunjukkan pergeseran pola suhu dan hujan yang konsisten dengan tekanan urbanisasi dan variabilitas iklim, memperkuat kebutuhan kebijakan daerah yang berbasis data dan indikator terukur (Maheng & others, 2024). Dari sisi mitigasi berbasis tata ruang, pemetaan dan pemantauan ruang terbuka hijau melalui platform penginderaan jauh dan komputasi awan menunjukkan jalur intervensi yang dapat ditautkan langsung dengan strategi penurunan emisi dan peningkatan serapan karbon pada skala kota/kabupaten (Agustiyara & others, 2025).

Dataset emisi global beresolusi tinggi telah berkembang pesat dan menyediakan gambaran spasial yang berguna sebagai pembanding, namun praktik terbaik tetap menekankan perlunya penguatan inventaris berbasis data aktivitas lokal agar hasilnya representatif untuk pengambilan keputusan daerah (Crippa & others, 2024). Literatur terbaru juga menegaskan bahwa tantangan krusial inventaris spasial adalah penetapan “extent” spasial dan konsistensi activity data, karena perbedaan batas dan definisi kategori dapat mengubah hasil emisi atau serapan secara signifikan (Choi & others, 2024). Kebaruan riset Anda diposisikan pada integrasi inventarisasi multi sektor tingkat kabupaten (pertanian, peternakan, transportasi, persampahan) dengan pemetaan spasial emisi yang operasional untuk perencanaan daerah, selaras dengan dorongan pengembangan inventaris subnasional yang lebih otomatis, konsisten, dan dapat diturunkan menjadi strategi aksi (Glen & others, 2025).

Kontribusi penting lainnya adalah orientasi output menjadi dokumen acuan kebijakan (profil dan aksi), sejalan dengan praktik bahwa inventaris GRK merupakan langkah awal yang diperlukan untuk menyusun rencana aksi iklim dan pemantauan penurunan emisi (Davutluoglu & others, 2024). Justifikasi orisinalitas diperkuat oleh temuan bahwa peningkatan akurasi inventaris (melalui emission factor dan tier yang lebih baik pada ekosistem kunci Indonesia) berdampak langsung pada kredibilitas kebijakan mitigasi dan skema pembiayaan iklim, sehingga pendekatan inventaris daerah yang sistematis menjadi semakin strategis (Murdiyarso & others, 2024).

METODE PENELITIAN

Lokasi penelitian untuk pengambilan data dilakukan pada Kabupaten Sambas. Berikut Peta administrasi Kecamatan Sambas Kabupaten Sambas.



Gambar 1 Peta Lokasi Kabupaten Sambas

Sumber : BPS Kab.Sambas

Rangkuman jenis data yang dimanfaatkan dalam penelitian ini beserta sumber perolehannya. Secara umum, seluruh informasi yang digunakan berasal dari data sekunder yang merepresentasikan aktivitas pada objek kajian untuk tahun 2022 serta faktor emisi yang relevan. Data aktivitas tersebut mencakup antara lain luasan lahan tanaman padi, umur atau fase tanam padi, luas lahan tanaman pangan dan perkebunan beserta komoditas yang diusahakan, jenis dan populasi hewan ternak, jumlah kendaraan yang beroperasi, serta sistem pengelolaan sampah yang diterapkan di wilayah studi (Azizah et al., 2017).

Tabel 1. Jenis data dan sumber

No	Jenis Data	Sumber
1	Luas Lahan Pertanian dan Perkebunan	Dinas Pertanian dan Ketahanan Pangan Kab. Sambas
2	Jumlah Hewan Ternak	(Badan Pusat Statistik Kecamatan Sambas, 2020)
3	Jumlah Kendaraan	Sistem Administrasi Manunggal Satu Atap (Samsat) Kab. Sambas
4	Jumlah Timbunan Sampah	Dinas Pekerjaan Umum dan Penataan Ruang Kab. Sambas

Dalam pelaksanaan penelitian, peneliti melalui serangkaian prosedur yang saling berkaitan mulai dari tahap konseptual hingga tahap pelaporan akhir. Rangkaian kegiatan tersebut meliputi studi literatur sebagai dasar penyusunan kerangka teori, dilanjutkan dengan pengumpulan data primer dan sekunder, kemudian pengolahan serta analisis data untuk memperoleh temuan yang dapat dipertanggungjawabkan, yang selanjutnya diuraikan dalam bagian hasil dan pembahasan, dan diakhiri dengan perumusan kesimpulan serta saran. Susunan aktivitas tersebut secara keseluruhan membentuk tahapan penelitian yang menjadi panduan sistematis selama proses kajian berlangsung.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Perhitungan Emisi Gas Rumah Kaca

1. Sektor Pertanian dan Perkebunan

Total luas lahan pertanian di Kabupaten Sambas mencapai 78.881,33 Ha dimana Kecamatan Tebas memiliki lahan terluas yakni sebesar 12.555,29 Ha dan Kabupaten Subah memiliki lahan paling kecil dengan hanya sekitar 360,71 Ha. Sedangkan untuk lahan Perkebunan Kelapa Sawit Kabupaten Subah memiliki areal terluas yakni mencapai 51.627 Ha dengan total produksi sebesar 178.906 ton pada tahun 2023.

Tabel 2 Perhitungan Emisi Sektor Pertanian Padi

No	Kecamatan	Emisi CO ₂ (Gg CO ₂ -eq)	Emisi CH ₄ (Gg CO ₂ -eq)	Emisi N ₂ O (Gg CO ₂ -eq)	Total Emisi GRK (Gg CO ₂ -eq)	Persentase (%)
1	Selakau	0,24	19,92	1,21	21,37	8
2	Selakau Timur	0,20	16,29	0,99	17,48	6
3	Pemangkat	0,18	14,94	0,91	16,03	6
4	Semparuk	0,25	20,43	1,24	21,92	8
5	Salatiga	0,12	10,07	0,61	10,81	4
6	Tebas	0,50	41,13	2,50	44,13	14
7	Tekarang	0,18	14,48	0,88	15,53	6
8	Sambas	0,05	3,88	0,24	4,17	2
9	Subah	0,01	1,18	0,07	1,27	0
10	Sebawi	0,05	4,03	0,24	4,33	2
11	Sajad	0,02	1,75	0,11	1,87	1
12	Jawai	0,25	20,23	1,23	21,70	8
13	Jawai Selatan	0,22	17,87	1,08	19,18	7
14	Teluk Keramat	0,29	23,38	1,42	25,09	9
15	Galing	0,13	10,63	0,65	11,41	4
16	Tangaran	0,15	12,09	0,73	12,97	5
17	Sejangkung	0,13	10,55	0,64	11,32	4
18	Sajingan Besar	0,03	2,64	0,16	2,83	1
19	Paloh	0,16	12,93	0,78	13,87	5
Total		3,16	258,42	15,68	277,25	100
Persentase		1%	93%	6%		

Sumber : Hasil Analisis, 2025

Kontribusi terbesar emisi GRK pada sektor pertanian padi di Kabupaten Sambas berasal dari gas metana (CH₄) yang dilepaskan selama proses budidaya padi, dengan nilai emisi mencapai 258,42 Gg CO₂-eq atau sekitar 93% dari total emisi sektor pertanian. Dominasi emisi CH₄ tersebut secara keseluruhan berkontribusi pada total emisi GRK sektor Pertanian Padi di Kabupaten Sambas yang tercatat sebesar 277,25 Gg CO₂-eq.

Secara proses biogeokimia, dominasi emisi metana pada sawah tergenang umumnya berkaitan dengan kondisi anaerob yang mendorong aktivitas metanogen, sementara besarnya fluks CH₄ sangat dipengaruhi oleh rezim air dan karakter pengelolaan budidaya yang mengatur ketersediaan substrat organik serta jalur pelepasan gas ke atmosfer (Chen & others, 2024). Selain faktor hidrologi, bukti empiris menunjukkan bahwa alokasi karbon tanaman ke bawah permukaan (melalui eksudat akar dan biomassa akar) dapat menjadi penggerak utama pembentukan dan pelepasan CH₄ pada lahan basah yang dikelola, sehingga dinamika emisi dapat berubah signifikan meskipun luasan lahan relatif tetap (Demyan & others, 2024).

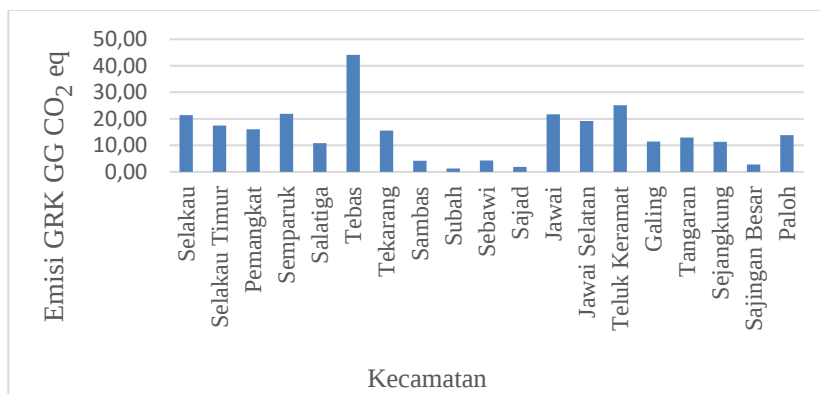
Tabel 3. Perhitungan Emisi Sektor Perkebunan Kelapa Sawit

No	Kecamatan	Emisi CO ₂ (Gg CO ₂ -eq)	Emisi CH ₄ (Gg CO ₂ -eq)	Emisi N ₂ O (Gg CO ₂ -eq)	Total Emisi GRK (Gg CO ₂ -eq)	Persentase (%)
1	Selakau	0,05	0,01	0,07	0,13	0,96
2	Selakau Timur	0,13	0,01	0,17	0,31	2,35
3	Pemangkat	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
4	Semparuk	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03
5	Salatiga	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	Tebas	0,89	0,32	1,22	2,43	18,16
7	Tekarang	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04
8	Sambas	0,02	0,00	0,03	0,05	0,35
9	Subah	2,07	0,51	2,84	5,42	40,46
10	Sebawi	0,09	0,01	0,12	0,22	1,63
11	Sajad	0,06	0,00	0,08	0,14	1,06
12	Jawai	0,01	0,00	0,01	0,02	0,16
13	Jawai Selatan	0,01	0,00	0,01	0,02	0,14
14	Teluk Keramat	0,03	0,00	0,04	0,06	0,47
15	Galing	0,09	0,01	0,13	0,23	1,72
16	Tangaran	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02
17	Sejangkung	1,31	0,17	1,80	3,29	24,53
18	Sajingan Besar	0,33	0,02	0,45	0,80	5,97
19	Paloh	0,11	0,01	0,15	0,26	1,95
Total		5,18	1,08	7,13	13,40	100
Persentase		39%	8%	53%		

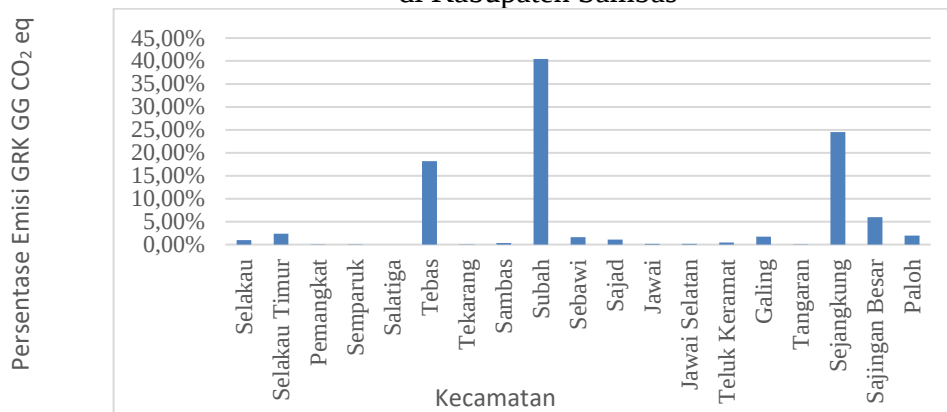
Sumber : Hasil Analisis, 2025

Berdasarkan hasil perhitungan, kegiatan pada sektor Perkebunan Kelapa Sawit di Kabupaten Sambas menghasilkan total emisi GRK sebesar 13,40 Gg CO₂-eq. Komponen emisi terbesar berasal dari gas dinitro oksida (N₂O) dengan nilai 7,13 Gg CO₂-eq atau sekitar 53% dari keseluruhan emisi sektor perkebunan sawit. Sebaliknya, kontribusi terendah disumbangkan oleh emisi metana (CH₄) yang hanya mencapai 1,08 Gg CO₂-eq atau kurang lebih 8% dari total emisi pada sektor ini. Besaran emisi tersebut tidak terlepas dari luas areal perkebunan kelapa sawit di Kabupaten Sambas yang mencapai 129.539 ha, yang menjadi sumber utama pembentukan emisi GRK, termasuk CH₄, dari aktivitas budidaya kelapa sawit.

Secara ilmiah, proporsi N₂O yang tinggi pada sistem perkebunan intensif sering terkait dengan interaksi antara masukan nitrogen, kelembapan tanah, serta proses nitrifikasi dan denitrifikasi pada tanah tropis terlapuk, sehingga perubahan praktik pemupukan dapat berdampak pada emisi namun tidak selalu segera terlihat karena adanya efek “legacy” pengelolaan sebelumnya (Chen & others, 2024).



Gambar 2. Sebaran Emisi Gas Rumah Kaca Sektor Pertanian setiap Kecamatan di Kabupaten Sambas



Gambar 3. Sebaran Emisi Gas Rumah Kaca Sektor Perkebunan Sawit setiap Kecamatan di Kabupaten Sambas

Sumber : Hasil Analisis, 2025



Gambar 4. Peta Emisi Gas Rumah Kaca sektor Pertanian Setiap Kecamatan di Kabupaten Sambas



Gambar 5. Peta Emisi Gas Rumah Kaca sektor Perkebunan setiap Kecamatan di Kabupaten Sambas

Sumber : Hasil Analisis, 2025

2. Sektor Transportasi

Jenis sarana transportasi yang mendominasi di Kabupaten Sambas adalah sepeda motor dengan jumlah mencapai 271.139 unit. Secara keseluruhan, total kendaraan bermotor yang terdaftar di wilayah ini sebanyak 286.955 unit, yang setara dengan kurang lebih 8,57% dari populasi kendaraan di seluruh Provinsi Kalimantan Barat.

Tabel 4. Jumlah Data Kendaraan di Kabupaten Sambas

Jenis Kendaraan	Total
Mobil Penumpang	9.123
Bus	150
Mobil Besar	6471
Sepeda Motor	271.139
Kendaraan Khusus	72

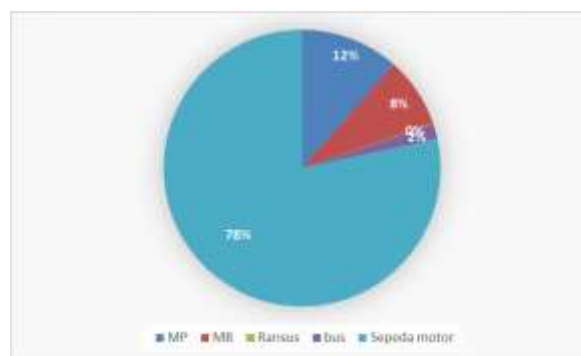
Sumber: Korlantas Polri, 2024

Tabel 5. Perhitungan Emisi Sektor Transportasi

Jenis Kendaraan	Emisi CO ₂ (Gg CO ₂ -eq)	Persentase (%)
Mobil Penumpang	26,34	11,54
Mobil Besar	18,68	8,19
Kendaraan Khusus	0,20	0,09
Bus	4,02	1,76
Sepeda motor	178,95	78,42
Total	228,20	100,00

Sumber : Hasil Analisis, 2025

Berdasarkan hasil perhitungan inventarisasi, besaran total emisi gas rumah kaca yang ditimbulkan dari sektor transportasi di Kabupaten Sambas tercatat mencapai 228,20 Gg CO₂-eq sebagaimana terdapat pada Tabel 5. Kontribusi emisi terbesar berasal dari kelompok kendaraan bermotor roda dua (sepeda motor), dengan nilai emisi mencapai 178,95 Gg CO₂-eq atau sekitar 78,42% dari keseluruhan emisi sektor transportasi.



Gambar 6. Sebaran Emisi Gas Rumah Kaca Sektor Transportasi di Kabupaten Sambas

Sumber : Hasil Analisis, 2025

Dalam konteks negara berkembang, strategi mitigasi emisi transportasi jalan umumnya paling efektif ketika menggabungkan elektrifikasi, perbaikan efisiensi sistem, dan kebijakan pendukung (infrastruktur, regulasi, insentif) karena laju motorisasi yang cepat cenderung mendorong kenaikan emisi bila hanya mengandalkan perbaikan teknis kendaraan secara parsial (Basmantra & others, 2025).

Dengan demikian, dominasi kontribusi sepeda motor pada inventaris emisi Sambas dapat diposisikan sebagai dasar untuk merumuskan paket mitigasi yang menargetkan perubahan teknologi (motor listrik), perubahan perilaku perjalanan, serta penguatan tata kelola energi agar penurunan emisi tidak bersifat semu.

3. Sektor Peternakan

Sektor peternakan di Kabupaten Sambas merupakan sumber emisi gas rumah kaca yang berasal terutama dari gas metana (CH_4) yang dilepaskan melalui dua proses utama, yaitu fermentasi enterik di dalam saluran pencernaan ternak serta pengelolaan kotoran hewan yang belum optimal. Emisi tersebut muncul dari berbagai komoditas ternak yang dibudidayakan masyarakat, antara lain sapi, kambing, babi, dan ayam, yang selama ini menjadi basis usaha peternakan sekaligus salah satu mata pencaharian utama bagi sebagian besar penduduk di Kabupaten Sambas.

Dari perspektif fisiologi pencernaan ruminansia, pembentukan CH_4 berkaitan dengan keseimbangan hidrogen di rumen dan komposisi ransum, sehingga opsi mitigasi yang berbasis pakan umumnya diarahkan untuk menekan jalur metanogenesis tanpa menurunkan produktivitas ternak (Palangi & Lackner, 2022). Kerangka ini relevan untuk menafsirkan variasi beban emisi antarkecamatan karena perbedaan struktur komoditas ternak, pola pemberian pakan, dan intensitas pemeliharaan berpotensi menghasilkan profil emisi yang tidak selalu linear terhadap jumlah ternak semata.

Tabel 6. Data Aktivitas sektor Peternakan Kabupaten Sambas

No	Kecamatan	Jumlah ternak (ekor/unit)			
		Sapi	Kambing	Babi	Ayam
1	Selakau	98	1.487	288	358.082
2	Selakau Timur	74	335	0	3.126
3	Pemangkat	257	1.236	375	529.438
4	Semparuk	168	1.954	57	242.431
5	Salatiga	172	1.595	23	34.528
6	Tebas	573	2.229	435	453.629
7	Tekarang	145	388	418	127.927
8	Sambas	597	688	215	552.765
9	Subah	1.032	661	1.271	2.197
10	Sebawi	57	163	0	71.562
11	Sajad	9	377	0	1.428
12	Jawai	151	1.331	180	49.431
13	Jawai Selatan	70	2.152	39	59.823
14	Teluk Keramat	971	2.451	137	407.141
15	Galing	249	810	0	667.012
16	Tangaran	2.172	988	12	74.714
17	Sejangkung	450	388	8	30.912
18	Sajingan Besar	71	48	2.183	3.214
19	Paloh	695	1017	313	9.527
Total		8.011	20.298	5.954	3.678.887

Sumber: Badan Pusat Statistik, 2024

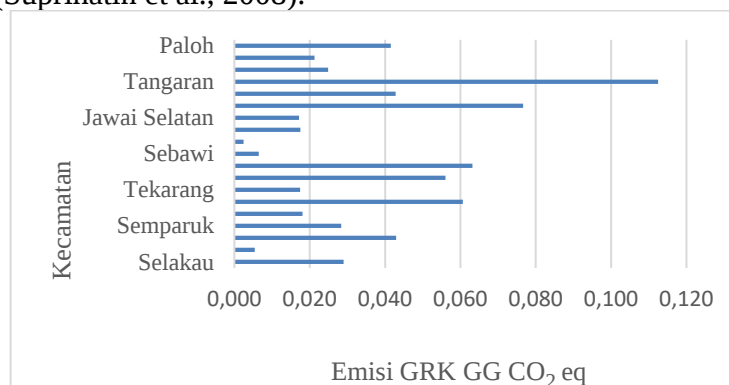
Pada sektor peternakan di Kabupaten Sambas menggunakan data jumlah ternak dari sapi, kambing, babi, dan ayam. Peternakan ayam merupakan jenis peternakan yang paling banyak di Kabupaten Sambas yakni mencapai 3.678.887 ekor pada tahun 2023. Dimana Kecamatan Galing memiliki jumlah ternak terbanyak yakni 668.071 ekor dari seluruh ternak (sapi, kambing, babi, dan ayam) yang ada di Kabupaten Sambas.

Tabel 7 Perhitungan Emisi Sektor Peternakan

No	Kecamatan	Total emisi GRK (Gg CO ₂ eq)	Persentase (%)
1	Selakau	0,029	4
2	Selakau Timur	0,005	1
3	Pemangkat	0,043	6
4	Semparuk	0,028	4
5	Salatiga	0,018	3
6	Tebas	0,061	9
7	Tekarang	0,017	3
8	Sambas	0,056	8
9	Subah	0,063	9
10	Sebawi	0,006	1
11	Sajad	0,002	0
12	Jawai	0,018	3
13	Jawai Selatan	0,017	3
14	Teluk Keramat	0,077	11
15	Galing	0,043	6
16	Tangaran	0,112	16
17	Sejangkung	0,025	4
18	Sajingan Besar	0,021	3
19	Paloh	0,042	6
Total		0,684	100%

Sumber : Hasil Analisis, 2025

Berdasarkan hasil perhitungan beban emisi metana (CH₄) di seluruh kecamatan di Kabupaten Sambas, total emisi GRK dari sektor peternakan tercatat mencapai 0,684 Gg CO₂-eq. Nilai tersebut diperoleh melalui estimasi emisi CH₄ yang dihasilkan pada tingkat kecamatan, yang kemudian diagregasi untuk menggambarkan kontribusi sektor peternakan terhadap total emisi gas rumah kaca di wilayah ini. Perhitungan tersebut penting dilakukan mengingat pada ternak ruminansia, sebagian besar gas yang berpotensi menimbulkan efek rumah kaca berasal dari metana (CH₄) yang dihasilkan melalui proses fermentasi enterik dalam sistem pencernaannya (Suprihatin et al., 2008).



Gambar 7. Sebaran Emisi Gas Rumah Kaca Sektor Peternakan setiap Kecamatan di Kabupaten Sambas

Untuk mengidentifikasi wilayah yang memberikan kontribusi paling besar maupun paling kecil terhadap emisi gas metana (CH_4) dari sektor peternakan, dilakukan analisis komparatif terhadap hasil perhitungan beban emisi CH_4 pada seluruh kecamatan di Kabupaten Sambas, sehingga dapat diketahui kecamatan mana yang berperan sebagai penyumbang utama dan kecamatan mana yang memiliki kontribusi paling rendah.



Gambar 8. Peta Emisi Gas Rumah Kaca sektor Peternakan setiap Kecamatan di Kabupaten Sambas

Sumber : Hasil Analisis, 2025

4. Sektor Persampahan

Sektor persampahan merupakan salah satu penyumbang emisi gas rumah kaca yang tidak dapat diabaikan, dan kondisi ini juga terjadi di Kabupaten Sambas. Pengelolaan pembuangan akhir timbulan sampah menjadi isu lingkungan yang semakin kompleks, karena volume sampah cenderung meningkat seiring dengan pertumbuhan ekonomi daerah serta perubahan perilaku konsumsi masyarakat yang makin bersifat konsumtif. Aktivitas sehari-hari masyarakat pada akhirnya menghasilkan kuantitas sampah dalam jumlah besar dalam waktu relatif singkat, sehingga menambah beban pada sistem pengelolaan persampahan yang ada dan sekaligus memperbesar potensi emisi GRK dari sektor ini.

Tabel 8. Data Aktivitas Sektor Persampahan Kabupaten Sambas

No	Kecamatan	Jumlah	Timbulan sampah (ton/tahun)
1	Selakau	18.530	4.734
2	Selakau Timur	0	0
3	Pemangkat	35.757	9.136
4	Semparuk	16.605	4.243
5	Salatiga	5.846	1.494
6	Tebas	31.890	8.148
7	Tekarang	0	0
8	Sambas	49.520	12.652
9	Subah	0	0
10	Sebawi	18.126	4.631
11	Sajad	0	0
12	Jawai	11.589	2.961
13	Jawai Selatan	7300	1.865
14	Teluk Keramat	15.000	3.833
15	Galing	3.339	853
16	Tangaran	6.669	1.704
17	Sejangkung	0	0

No	Kecamatan	Jumlah	Timbulan sampah (ton/tahun)
18	Sajingan Besar	4.382	1.120
19	Paloh	15.445	3.946
Total		239.998	61.319

Sumber: Dinas Pekerjaan Umum, 2024

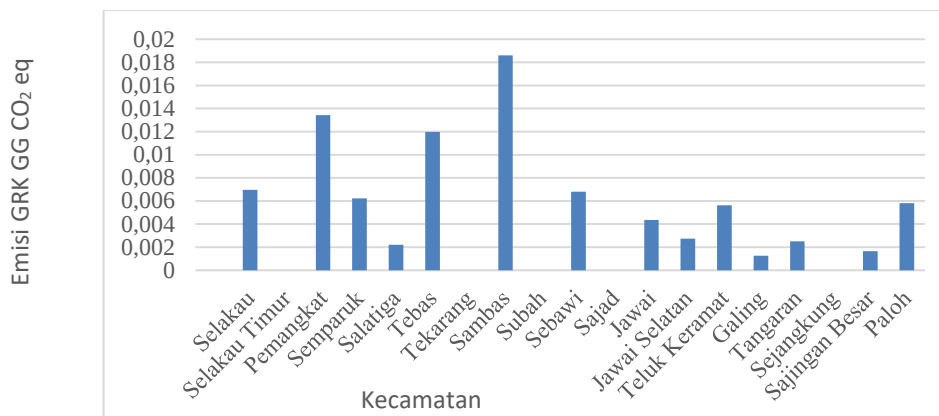
Tabel 9. Perhitungan Emisi Sektor Persampahan

No	Kecamatan	Emisi CH ₄ (Gg Co ₂ -eq)	Persentase (%)
1	Selakau	0,0070	7,72
2	Selakau Timur	0,0000	0,00
3	Pemangkat	0,0134	14,90
4	Semparuk	0,0062	6,92
5	Salatiga	0,0022	2,44
6	Tebas	0,0120	13,29
7	Tekarang	0,0000	0,00
8	Sambas	0,0186	20,63
9	Subah	0,0000	0,00
10	Sebawi	0,0068	7,55
11	Sajad	0,0000	0,00
12	Jawai	0,0044	4,83
13	Jawai Selatan	0,0027	3,04
14	Teluk Keramat	0,0056	6,25
15	Galing	0,0013	1,39
16	Tangaran	0,0025	2,78
17	Sejangkung	0,0000	0,00
18	Sajingan Besar	0,0016	1,83
19	Paloh	0,0058	6,44
Total		0,0901	100,00

Sumber : Hasil Analisis, 2025

Total emisi GRK yang berasal dari sektor persampahan di Kabupaten Sambas dihitung mencapai 0,0901 Gg CO₂-eq. Besaran ini terutama ditimbulkan oleh proses yang berlangsung di Tempat Pemrosesan Akhir (TPA), di mana timbulan sampah organik yang bersifat biodegradable mengalami penguraian secara anaerobik. Dalam kondisi tanpa oksigen tersebut, bahan organik terdekomposisi dan menghasilkan berbagai jenis gas, dengan komponen utama berupa gas metana (CH₄) yang dikenal sebagai salah satu gas rumah kaca berpotensi tinggi terhadap pemanasan global.

Pengurangan emisi sektor persampahan umumnya paling kuat ketika fraksi organik dikelola melalui jalur yang meminimalkan kondisi anaerob tidak terkendali (misalnya komposting/bioproses terarah), karena pendekatan ini dapat menekan pembentukan CH₄ sekaligus meningkatkan pemanfaatan sumber daya dari sampah (Manea et al., 2024). Implikasinya, pemetaan spasial emisi persampahan di Sambas dapat langsung ditautkan ke prioritas intervensi berbasis sumber (pemilahan di hulu) dan berbasis fasilitas (optimalisasi pengolahan organik) pada kecamatan penyumbang utama.



Gambar 9 Sebaran Emisi Gas Rumah Kaca sektor Persampahan setiap Kecamatan di Kabupaten Sambas

Sumber : Hasil Analisis, 2025

Jika dianalisis berdasarkan distribusi spasialnya, kontribusi emisi gas rumah kaca dari sektor persampahan di Kabupaten Sambas didominasi oleh tiga kecamatan utama. Kecamatan Pemangkat tercatat menghasilkan emisi sebesar 0,0134 Gg CO₂-eq, disusul Kecamatan Tebas dengan total emisi 0,012 Gg CO₂-eq. Di antara seluruh kecamatan tersebut, Kecamatan Sambas menjadi penyumbang emisi terbesar dengan nilai 0,0186 Gg CO₂-eq, yang setara dengan sekitar 20,63% dari total emisi sektor persampahan di Kabupaten Sambas (Yuwono, 2012).



Gambar 10 Peta Emisi Gas Rumah Kaca sektor Persampahan setiap Kecamatan di Kabupaten Sambas

Sumber : Hasil Analisis, 2025

Upaya Mitigasi

Penurunan emisi GRK pada sektor pertanian, khususnya pada budidaya padi, sangat dipengaruhi oleh karakteristik tanaman dan pengelolaan air di lahan sawah. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa varietas padi dengan emisi metana yang rendah umumnya dicirikan oleh biomassa yang relatif sedikit, rongga aerenkima pada akar yang sempit, serta ketegaran morfologi batang dan daun yang cenderung lemah (Arisandi et al., 2018). Temuan tersebut mengindikasikan bahwa pemilihan varietas dengan sifat-sifat tersebut, yang dikombinasikan dengan pengelolaan irigasi yang lebih efisien dan terkontrol, merupakan salah satu pendekatan yang dapat diterapkan untuk menekan emisi GRK dari budidaya padi di tingkat lahan.

Pada sektor Perkebunan sawit, upaya mitigasi yang dapat dilakukan diantaranya adalah menghindari deforestasi dengan tidak membuka hutan primer atau gambut tetapi dengan mengembangkan sawit hanya di lahan terdegradasi, membangun instalasi biogas untuk menangkap dan mengubah CH₄ menjadi energi dan meminimalkan produksi CH₄ dengan pengolahan POME secara aerobik.

Pada sektor transportasi, upaya mitigasi sangat penting untuk dilakukan mengingat transportasi adalah salah satu penyumbang emisi CO₂ terbesar. Upaya yang dapat dilakukan diantaranya adalah melakukan peralihan kendaraan ke rendah emisi seperti elektrifikasi transportasi dengan penggunaan mobil, motor, dan bus listrik. Melakukan efisiensi energi transportasi dengan menggunakan kendaraan yang lebih hemat bahan bakar (*engine downsizing*, *aerodynamic design*), perawatan kendaraan rutin untuk menjaga efisiensi konsumsi bahan bakar.

Pada sektor peternakan, pemanfaatan pakan ternak yang bersumber dari limbah biomassa pertanian menjadi salah satu pendekatan mitigasi emisi gas rumah kaca yang mendorong keterpaduan antara usaha tani dan usaha ternak. Sisa panen, seperti jerami, tidak hanya berpotensi menjadi limbah, tetapi dapat diolah terlebih dahulu melalui proses pengomposan dan kemudian dimanfaatkan sebagai hijauan pakan ternak pada periode musim kemarau ketika ketersediaan hijauan segar terbatas (Yuliana, 2017). Dengan demikian, pengelolaan pakan ternak berbasis limbah biomassa pertanian sekaligus memperkuat integrasi sistem pertanian–peternakan dan berkontribusi pada penurunan emisi GRK dari sektor peternakan.

Pada sektor persampahan banyak menghasilkan CH₄ dimana pengelolaan sampah yang lebih bersih, terpisah, dan termanfaatkan adalah kunci mitigasi GRK di sektor ini. Perlu adanya pengembangan program 3R (*Reduce, Reuse, Recycle*), pengurangan sampah organik dan plastik, serta dengan menerapkan *zero waste lifestyle*.

Pada budidaya padi, literatur menunjukkan bahwa praktik Alternate Wetting and Drying (AWD) dan pendekatan intensifikasi tertentu dapat menurunkan emisi CH₄ secara konsisten, namun desain penerapannya perlu memperhitungkan potensi trade-off terhadap N₂O serta capaian hasil panen (Dahlgreen & Parr, 2024). Bukti studi lapangan juga menegaskan bahwa kombinasi praktik budidaya dan pengelolaan air dapat memperbaiki kinerja emisi tanpa selalu mengorbankan produktivitas, sehingga relevan untuk diuji adaptasinya pada karakter sawah setempat (Echegaray-Cabrera & others, 2024). Selain manajemen air, pemilihan varietas dan karakter perakaran berpengaruh pada jalur transport CH₄ dan total emisi musiman, sehingga intervensi varietas dapat dipertimbangkan sebagai opsi mitigasi berbasis “low-regret” bila selaras dengan target produktivitas (Qi & others, 2024).

Pada rantai nilai kelapa sawit, analisis jejak karbon siklus hidup menunjukkan bahwa tahap pengolahan limbah cair/wastewater dan perubahan penggunaan lahan dapat menjadi kontributor dominan emisi, sehingga penangkapan CH₄ dari pengolahan limbah (termasuk POME) dan pencegahan pembukaan lahan berkarbon tinggi merupakan titik ungkit mitigasi yang sangat strategis (Wang & others, 2025).

Untuk sektor transportasi, pengurangan emisi melalui elektrifikasi akan lebih maksimal ketika diselaraskan dengan skenario transisi energi ketenagalistrikan, karena intensitas emisi listrik menentukan besarnya pengurangan emisi bersih dari kendaraan listrik (Jolodoro & others, 2025). Di Indonesia, percepatan adopsi EV juga banyak ditentukan oleh dimensi regulasi, ekonomi, dan kesiapan teknologi–infrastruktur, sehingga mitigasi transportasi sebaiknya ditempatkan sebagai paket kebijakan lintas-sektor, bukan semata proyek kendaraan (Lazuardy & others, 2024). Secara evaluasi daur hidup, kendaraan listrik rata-rata berpotensi menurunkan emisi dibanding kendaraan berbahan bakar fosil, tetapi besarnya keuntungan sangat kontekstual terhadap bauran listrik, pola operasi, dan desain sistem transportasi setempat (Zajemska & others, 2025).

Pada peternakan, pengelolaan kotoran berbasis teknologi (misalnya pemisahan fraksi, pengolahan terarah, dan/atau anaerobic digestion) dipandang sebagai salah satu instrumen mitigasi yang dapat menekan emisi sekaligus meningkatkan pemanfaatan sumber daya, sehingga layak dipertimbangkan untuk wilayah dengan konsentrasi ternak tertentu (Symeon & others, 2025).

Di sektor persampahan, kerangka ekonomi sirkular menekankan bahwa pengurangan emisi bukan hanya isu “TPA”, tetapi juga transformasi sistem 3R dan optimalisasi jalur pengolahan agar emisi berkurang bersamaan dengan peningkatan recovery material/energi (McKnight & others, 2025).

KESIMPULAN

Hasil penelitian ini menunjukkan emisi GRK sektor Pertanian Padi di Kabupaten Sambas mencapai 277,25 Gg CO₂-eq, pada sektor Perkebunan total emisi GRK sektor Perkebunan Kelapa Sawit di Kabupaten Sambas mencapai 13,40 Gg CO₂-eq, total emisi GRK sektor transportasi di Kabupaten Sambas mencapai 228,20 Gg CO₂-eq, total emisi GRK sektor Peternakan di Kabupaten Sambas mencapai 0,684 Gg CO₂-eq, dan total emisi GRK sektor persampahan di Kabupaten Sambas mencapai 0,0901 Gg CO₂-eq. Upaya pada sektor pertanian, untuk menurunkan emisi GRK pada budidaya padi, maka harus irigasi yang digunakan.

Hasil penelitian sebelumnya menyebutkan bahwa padi yang menghasilkan emisi metana rendah memiliki karakteristik penciri biomassa sedikit, luas rongga aerenkima akar sempit dan ketegaran morfologi batang dan daun lemah. Pada sektor perkebunan sawit, upaya mitigasi yang dapat dilakukan diantaranya adalah menghindari deforestasi dengan tidak membuka hutan primer atau gambut tetapi dengan mengembangkan sawit hanya di lahan terdegradasi, membangun instalasi biogas untuk menangkap dan mengubah CH₄ menjadi energi dan meminimalkan produksi CH₄ dengan pengolahan POME secara aerobik.

DAFTAR PUSTAKA

- Agustiyara, A., & others. (2025). Mapping and monitoring urban green spaces using Google Earth Engine. *Urban Science*, 9(3), 105. <https://doi.org/10.3390/urbansci9030105>
- Alwin, R. N. (2016). *Analisis Jejak Karbon dari Aktivitas Permukiman di Desa Ciherang, Dramaga dan Petir, Kabupaten Bogor, Jawa Barat*. <https://repository.ipb.ac.id/handle/123456789/86991>
- Anggraeni, D. Y. (2015). Pengungkapan Emisi Gas Rumah Kaca, Kinerja Lingkungan, dan Nilai Perusahaan. *Jurnal Akuntansi Dan Keuangan Indonesia*, 12(2), 188–209. <https://doi.org/10.21002/jaki.2015.11>
- Arisandi, F. D., Setyanto, P., & Ardiarini, N. R. (2018). Heritabilitas dan karakteristik tanaman padi rendah emisi gas metana. *Jurnal Produksi Tanaman*, 6(6), 1042–1047. <https://doi.org/10.21176/protan.v6i6.745>
- Azizah, T. N., Andarani, P., & Samadikun, B. P. (2017). Kajian Jejak Karbon dan Pemetaannya dari Aktivitas Kampus di Fakultas Ilmu Budaya Universitas Diponegoro. *Jurnal Teknik Lingkungan*, 6(1), 19–21. <http://ejournal-s1.undip.ac.id/index.php/tlingkungan>
- Badan Pusat Statistik Kecamatan Sambas. (2020). *Kecamatan Sambas dalam Angka 2020*. Badan Pusat Statistik Kabupaten Sambas. <https://sambaskab.bps.go.id/publication/2020/09/28/90507daa4dda1c32328bd5d7/kecamatan-sambas-dalam-angka-2020.html>
- Basmantra, I., & others. (2025). Life-Cycle Greenhouse Gas Implications of Electric Two-Wheelers. *Vehicles*, 16(8), 428. <https://doi.org/10.3390/vehicles16080428>
- Chaerul, M., Febrianto, A., & Tomo, H. S. (2020). Peningkatan kualitas penghitungan emisi gas rumah kaca dari sektor pengelolaan sampah dengan metode IPCC 2006 (Studi Kasus: Kota Cilacap). *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 18(1), 153–161. <https://doi.org/10.14710/jil.18.1.153-161>
- Chen, Y., & others. (2024). Dynamics of Methane Emissions in Rice Systems under Water Management and Soil Conditions. *Biogeosciences*, 21, 513. <https://doi.org/10.5194/bg-21-513-2024>

- Choi, J., & others. (2024). Assessing the challenges of activity data and spatial extent to estimate emissions and absorptions from settlements. *Land*, 13(4), 497. <https://doi.org/10.3390/land13040497>
- Choo, K., & Raghavan, V. (2025). Decarbonization Pathways in Agri-Food Systems: A Review of Emerging Strategies. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 9, 1668517. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1668517>
- Crippa, M., & others. (2024). EDGAR v8.0 global anthropogenic emissions and high-resolution temporal profiles. *Earth System Science Data*, 16, 1903–1945. <https://doi.org/10.5194/essd-16-1903-2024>
- Dahlgreen, J., & Parr, T. (2024). Mitigating Methane Emissions from Rice: Evidence for Alternate Wetting and Drying and Management Trade-offs. *Agronomy*, 14(2), 378. <https://doi.org/10.3390/agronomy14020378>
- Davutluoglu, O., & others. (2024). Municipal Solid Waste Mitigation Options and Greenhouse Gas Impacts: A Review. *Sustainability*, 16(10), 4184. <https://doi.org/10.3390/su16104184>
- Demyan, M. S., & others. (2024). Soil Methane and Carbon Dioxide Flux Controls under Changing Moisture and Temperature Conditions. *Scientific Reports*. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-74239-5>
- Echegaray-Cabrera, J., & others. (2024). Water Management and Methane Emissions in Rice Systems: A Synthesis of Recent Evidence. *Agronomy*, 14(2), 248. <https://doi.org/10.3390/agronomy14020248>
- Fathoni, A. M., & others. (2025). Understanding Indonesia's renewable energy transition in the transport sector: A multi-level perspective. *Energies*, 18(14), 3528. <https://doi.org/10.3390/en18143528>
- Glen, N., & others. (2025). LEARN: An automated tool for generating annual subnational land emissions inventories. *Land*, 14(1), 27. <https://doi.org/10.3390/land14010027>
- Hardyanti, N., Samadikun, B. P., Saputri, A. R., & Yuwono, A. P. (2022). Greenhouse gas emission reduction strategies in the transportation and solid waste sector in Cilacap Regency. *Jurnal Presipitasi*, 19(2), 239–250. <https://doi.org/10.14710/presipitasi.v19i2.239-250>
- Jolodoro, J., & others. (2025). Landfill Methane Dynamics and Mitigation under Developing-Country Conditions. *Sustainability*, 17(10), 4681. <https://doi.org/10.3390/su17104681>
- Lazuardy, A. A., & others. (2024). Assessing Electrification Pathways for Motorcycles and Buses in Indonesia. *Vehicles*, 15(9), 422. <https://doi.org/10.3390/vehicles15090422>
- Lumban-Gaol, M. A., & others. (2024). Sea level rise, land subsidence, and flood disaster vulnerability assessment: A case study in Medan City, Indonesia. *Remote Sensing*, 16(5), 865. <https://doi.org/10.3390/rs16050865>
- Maheng, D., & others. (2024). Changes in temperature and rainfall patterns in Jakarta and implications for hydrometeorological risk. *Sustainability*, 16(1), 350. <https://doi.org/10.3390/su16010350>

- Manea, E. E., Bumbac, C., Dinu, L. R., Bumbac, M., & Nicolescu, C. M. (2024). Composting as a Sustainable Solution for Organic Solid Waste Management: Current Practices and Potential Improvements. *Sustainability*, 16(15), 6329. <https://doi.org/10.3390/su16156329>
- McKnight, D., & others. (2025). Waste Sector Interventions and Greenhouse Gas Outcomes: Evidence and Frameworks. *Cleaner Waste Systems*, 100204. <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2025.100204>
- Murdiyarso, D., & others. (2024). Refining greenhouse gas emission factors for Indonesian peatlands and mangroves to meet ambitious climate targets. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 121(17), e2307219121. <https://doi.org/10.1073/pnas.2307219121>
- Palangi, V., & Lackner, K. S. (2022). A Review of Enteric Methane Mitigation Strategies in Ruminant Production. *Animals*, 12(24), 3452. <https://doi.org/10.3390/ani12243452>
- Pranita, M., & others. (2025). Carbon tax as an economic instrument for decarbonizing the transport sector. *Energies*, 18(7), 1670. <https://doi.org/10.3390/en18071670>
- Putiamini, S., Patria, M. P., Soesilo, T. E. B., & Karsidi, A. (2023). Coastal vulnerability assessment to tidal (rob) flooding in Indramayu Coast, West Java, Indonesia. *Indonesian Journal of Geography*, 55(3), 517–526. <https://doi.org/10.22146/ijg.65549>
- Qi, Z., & others. (2024). Nitrogen Management in Rice and Greenhouse Gas Trade-offs: Implications for CH₄ and N₂O. *Agronomy*, 14(3), 595. <https://doi.org/10.3390/agronomy14030595>
- Rahmi, M., & others. (2025). Oil Palm Plantation Mapping and Change Detection for Climate and Land-Use Accounting. *Remote Sensing*, 17(8), 1470. <https://doi.org/10.3390/rs17081470>
- Ramadhan, R., & others. (2023). Performance evaluation of GSMaP V08 precipitation products over Indonesia for extreme rainfall analysis. *Remote Sensing*, 15(4), 1004. <https://doi.org/10.3390/rs15041004>
- Sari, D. R., & others. (2025). Waste management with refuse-derived fuel (RDF) technology for reducing {CH₄} and {CO₂} emissions: A case study. *Heliyon*, 11(4), e36134. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e36134>
- Slameto, & others. (2024). Greenhouse Gas Mitigation Options in Rice Cultivation: Recent Advances. *Frontiers in Agronomy*, 6, 1317430. <https://doi.org/10.3389/fagro.2024.1317430>
- Suprihatin, Indrasti, N. S., & Romli, M. (2008). Potensi Penurunan Emisi Gas Rumah Kaca Melalui Pengomposan Sampah. *Jurnal Teknologi Industri Pertanian*, 18(1), 53–59. <https://journal.ipb.ac.id/index.php/jurnaltin/article/view/4202>
- Symeon, M., & others. (2025). System-Level Strategies for Waste Sector Decarbonization. *Sustainability*, 17(2), 586. <https://doi.org/10.3390/su17020586>
- Wang, S., & others. (2025). Spatial Risk and Uncertainty Considerations in Land-Based Production Systems. *Land*, 14(6), 1223. <https://doi.org/10.3390/land14061223>

- Wardani, E. P., Sutrisno, E., & Samadikun, B. P. (2017). Penentuan Nilai Jejak Karbon (CO₂, CH₄, N₂O) dari Aktivitas Kampus Fakultas Sains dan Matematika Universitas Diponegoro. *Jurnal Teknik Lingkungan*, 6(2), 1–11. <http://ejournal-s1.undip.ac.id/index.php/tlingkungan>
- Wijaya, A., & others. (2025). Cellular Automata--Artificial Neural Network approach to dynamically model past and future surface temperature changes in Indonesia. *Land*, 14(8), 1656. <https://doi.org/10.3390/land14081656>
- Yuliana, D. K. (2017). Tingkat emisi gas rumah kaca di Kabupaten Indramayu. *Jurnal Sains Dan Teknologi Mitigasi Bencana*, 12(2), 1–10. <https://doi.org/10.29122/jstmb.v12i2.2098>
- Yuwono, A. (2012). *Pedoman Penyelenggaraan Inventarisasi Gas Rumah Kaca Nasional*. Kementerian Lingkungan Hidup. <https://signsmart.menlhk.go.id/>
- Zajemska, M., & others. (2025). Aerodynamics and Fuel Economy: Emissions Reduction Potential for Road Vehicles. *Energies*, 18(21), 5704. <https://doi.org/10.3390/en18215704>