



Pemodelan Emisi Gas CO₂ dari Lokasi Tempat Pembuangan Akhir di Kota Pekanbaru menggunakan Dispersi AERMOD

Modelling CO₂ Gas Emissions from Landfill Sites in Pekanbaru City using AERMOD Dispersion

Nofia Rahmadani

Program Studi Fisika, Fakultas MIPA dan Kesehatan, Universitas Muhammadiyah Riau, Pekanbaru, Indonesia

Yulia Fitri¹

Program Studi Fisika, Fakultas MIPA dan Kesehatan, Universitas Muhammadiyah Riau, Pekanbaru, Indonesia

Sri Fitria Retnawaty

Program Studi Fisika, Fakultas MIPA dan Kesehatan, Universitas Muhammadiyah Riau, Pekanbaru, Indonesia

Dinda Lestari

Program Studi Fisika, Fakultas MIPA dan Kesehatan, Universitas Muhammadiyah Riau, Pekanbaru, Indonesia

Sri Mulyani

Program Studi Fisika, Fakultas MIPA dan Kesehatan, Universitas Muhammadiyah Riau, Pekanbaru, Indonesia

Selvia

Program Studi Fisika, Fakultas MIPA dan Kesehatan, Universitas Muhammadiyah Riau, Pekanbaru, Indonesia

Artikel Masuk : 2 Oktober 2023

Artikel Diterima : 30 Mei 2024

Tersedia Online : 31 Agustus 2024

Abstrak: Dekomposisi anaerobik senyawa organik di Tempat Pembuangan Akhir (TPA) sampah bertanggung jawab atas timbulnya gas rumah kaca yang dapat berkontribusi terhadap pemanasan global. Penelitian ini bertujuan untuk mengestimasi jumlah produksi gas CO₂ dari tahun 2018 hingga 2068 di TPA Muara Fajar 2 Kota Pekanbaru, Provinsi Riau.

¹ Korespondensi Penulis: Program Studi Fisika, Fakultas MIPA dan Kesehatan, Universitas Muhammadiyah Riau, Pekanbaru, Indonesia
Email: yuliafitri@umri.ac.id

How to Cite

Rahmadani, N., Fitri, Y., Retnawaty, S, F., Lestari, D., Mulyani, S., & Selvia, S., (2024). Pemodelan emisi gas CO₂ dari lokasi tempat pembuangan akhir di Kota Pekanbaru menggunakan dispersi AERMOD. *Jurnal Wilayah dan Lingkungan*, 12(2), 163-176. doi: 10.14710/jwl.12.2.163-176

Pertama, kami mengumpulkan semua informasi yang diperlukan, termasuk data jumlah sampah padat yang dibuang ke TPA Muara Fajar 2 Pekanbaru. Selanjutnya, kami menganalisis data tersebut menggunakan model *LandGEM* untuk memperkirakan jumlah produksi gas CO₂ yang dipancarkan ke atmosfer dari TPA Muara Fajar 2 Pekanbaru. Dalam penelitian ini, model dispersi AERMOD digunakan untuk dispersi CO₂ dari lokasi TPA Muara Fajar 2 Pekanbaru dalam kondisi tahunan yang berbeda. Distribusi emisi gas CO₂ dilakukan secara tahunan mulai dari tahun 2018 hingga 2022 yang berasal dari TPA tersebut. Hasil analisis menunjukkan bahwa produksi gas CO₂ mencapai puncaknya pada tahun 2049. Jumlah Gas CO₂ akan menurun setelah 30 tahun pertama. Penurunan jumlah gas CO₂ dipengaruhi beberapa faktor, salah satunya adalah tingkat biodegradasi. Hasil dispersi yang diperoleh menunjukkan bahwa dispersi CO₂ dipengaruhi oleh arah angin. Pemodelan AERMOD menunjukkan bahwa konsentrasi tertinggi untuk emisi CO₂ terjadi pada tahun 2022 yaitu sebesar 185.961 µg/m³.

Kata Kunci: AERMOD; emisi; gas CO₂; LandGEM; model; TPA

Abstract: *anaerobic decomposition of organic compounds in waste landfills is responsible for the generation of greenhouse gases that can contribute to global warming. This study aims to estimate the amount of CO₂ gas production from 2018 to 2068 in the Muara Fajar 2 landfill in Pekanbaru City, Riau Province. First, we collected all the necessary information, including data on the amount of solid waste disposed of at the Muara Fajar 2 Pekanbaru landfill. Next, we analyzed the data using the LandGEM model to estimate the amount of CO₂ gas production emitted to the atmosphere from the Muara Fajar 2 Pekanbaru landfill. In this study, the AERMOD dispersion model was used for CO₂ dispersion from the Muara Fajar 2 Pekanbaru landfill site under different annual conditions. The distribution of CO₂ gas emissions was carried out on an annual basis from 2018 to 2022 originating from the landfill. The analysis results show that CO₂ gas production reaches its peak in 2049. The amount of CO₂ gas will decrease after the first 30 years. The decrease in the amount of CO₂ gas is influenced by several factors, one of which is the level of biodegradation. The dispersion results obtained show that CO₂ dispersion is influenced by wind direction. AERMOD modeling shows that the highest concentration of CO₂ emissions occurred in 2022 at 185.961 µg/m³.*

Keywords: AERMOD; CO₂ gas; emissions; LandGEM; model; TPA

Pendahuluan

Peningkatan jumlah penduduk dan aktivitas manusia akan sebanding dengan peningkatan sampah di lingkungan sekitar (Wijaya & Cahyawati, 2022). Jumlah penduduk Indonesia berdasarkan data Badan Pusat Statistik (BPS) sebanyak 275.773,8 juta jiwa pada tahun 2022, dengan laju pertumbuhan sebesar 1,17 % pada tahun 2020 hingga 2022 (BPS Indonesia, 2023). Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) menyatakan bahwa, jumlah timbulan sampah pada tahun 2022 di Indonesia menghasilkan 20,29 juta ton. Laporan KLHK menunjukkan bahwa produksi sampah nasional mencapai 175.000 ton per hari. Rata-rata satu orang penduduk Indonesia menyumbang sampah sebanyak 0,7 kg per hari (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2022).

Pekanbaru merupakan kota dengan pertumbuhan penduduk yang sangat pesat dan merupakan kota tujuan urbanisasi dari daerah maupun dari provinsi lain, akibatnya peningkatan jumlah penduduk meningkat drastis dari tahun ke tahun (Surtinah, 2020). Badan Pusat Statistik Riau menyatakan bahwa, Kota Pekanbaru memiliki penduduk sebanyak 1.007.540 jiwa pada tahun 2022 dengan luas permukaan sebesar 632,26 km² dan jumlah curah hujan antara 179 - 473 mm³ (BPS Provinsi Riau, 2023). Laju pertumbuhan penduduk Kota Pekanbaru sebesar 1,30% yang selanjutnya akan menambah jumlah produksi limbah padat (BPS Kota Pekanbaru, 2023). Peraturan Daerah Kota Pekanbaru

Nomor 8 Tahun (2014) tentang pengelolaan sampah memiliki salah satu tujuan yaitu mewujudkan lingkungan yang sehat dan bersih. Namun pelaksanaan pengelolaan sampah selama ini belum sesuai dengan metode dan teknik yang berwawasan lingkungan sehingga menimbulkan penyakit terhadap kesehatan masyarakat (Ramadhan, 2019). Tempat Pembuangan Akhir (TPA) menjadi salah satu cara penanganan sampah akhir yang banyak digunakan (Mahyudin, 2017). Permasalahan utama pada TPA salah satunya adalah emisi gas TPA yang disebabkan oleh operasional TPA, keadaan iklim, dan karakteristik sampah yang dibuang ke TPA (Ghosh et al., 2018; Ramprasad & Gopalakrishnan, 2013; Younes et al., 2015).

Gas Karbon dioksida (CO_2) yang dihasilkan dari TPA diasumsikan berasal dari sumber biogenik (Mehta et al., 2018). Gas CO_2 yang dihasilkan dari TPA berkisar antara 40-50% (Lee et al., 2017; Njoku et al., 2018; Shen et al., 2018). Gas CO_2 adalah gas rumah kaca utama dan bertanggung jawab atas efek rumah kaca (Sharma & Singh, 2021). CO_2 menyumbang sebesar 75% sebagai gas rumah kaca (Sari & Sofwan, 2021). Gas rumah kaca seperti CO_2 dipancarkan ke atmosfer. Semakin banyak CO_2 di atmosfer maka temperatur akan semakin tinggi dan akibatnya jumlah uap air di atmosfer akan semakin banyak (Ahmad & Wani, 2013). Pengelolaan sampah di TPA Muara Fajar 2 Kota Pekanbaru saat ini hanya ditumpuk dan tidak ditutupi dengan tanah. Tumpukan sampah akan mengalami pembusukan dan menghasilkan gas berbahaya, seperti CO_2 (Head, 2018). Gas CO_2 dapat menyerap panas matahari, yang memiliki dampak terhadap lingkungan sehingga turut berkontribusi dalam pemanasan global dan perubahan iklim (Pawlowska, 2014). Permasalahan terkait gas CO_2 dari TPA telah menarik perhatian dalam beberapa penelitian yang melibatkan penggunaan teknik pemodelan untuk menghitung tingkat produksi dan penyebaran polutan dari TPA (Fallahizadeh et al., 2019). Faktor yang mempengaruhi emisi gas CO_2 dari TPA yaitu mulai dari kondisi iklim, kuantitas sampah, jenis dan komposisi sampah yang dibuang ke TPA. Faktor di atas menjadi pertimbangan dalam pendekatan pemodelan untuk memprediksi tingkat emisi karena memiliki peranan penting dalam perencanaan dan pengoperasian TPA (Yaman, 2019), terutama TPA Muara Fajar 2 Pekanbaru.

Metode untuk memperkirakan emisi gas CO_2 ada berbagai macam, mulai dari pengujian lapangan, dan pemodelan matematis (Fallahizadeh et al., 2019; Knapp et al., 2014). Emisi gas CO_2 dapat diprediksi lebih tepat dan akurat dengan menggunakan beberapa model (Cambaliza et al., 2017). Model yang bisa digunakan untuk estimasi emisi adalah metode default IPCC, model triangular, model triangular modifikasi, model peluruhan orde pertama, model EPER dan GasSim (Pawar et al., 2021). Model matematis di atas memiliki banyak keterbatasan dan ketidakpastian dalam memprediksi gas TPA (Ramprasad et al., 2022). Parameter yang diperlukan dalam model-model ini seringkali tidak dapat dipastikan sehingga berpengaruh buruk terhadap keakuratan model (Majdinasab et al., 2017). *Landfill Gas Emission Model (LandGEM)* telah dijadikan subjek penelitian oleh beberapa peneliti, dan hasil yang dilaporkan menunjukkan bahwa model ini baik dalam memprediksi dan memperkirakan emisi gas dari TPA (Sil et al., 2014). Penelitian yang dilakukan oleh Monice & Perinov, (2018) menggunakan *LandGEM* menunjukkan bahwa produksi gas CO_2 di TPA Muara Fajar 1 Kota Pekanbaru pada tahun 2011 dan 2012 masing-masing adalah 404.100 dan 979.700 m^3 /tahun. Produksi gas CO_2 untuk tahun 2020 mencapai 1.259.034 m^3 /tahun (Rahmi et al., 2017). Peningkatan yang signifikan dalam produksi gas CO_2 ini memiliki dampak terhadap pemanasan global, sebagaimana telah dijelaskan oleh Shiddieq et al., (2018). Peningkatan gas CO_2 berbanding lurus dengan peningkatan jumlah sampah. TPA Muara Fajar 1 sudah mencapai kapasitas maksimum untuk menampung sampah, sehingga TPA Muara Fajar 2 dibuka sebagai kebutuhan tempat pembuangan sampah. Penelitian lebih lanjut juga diperlukan dalam mengestimasi produksi gas CO_2 pada TPA Muara Fajar 2 sebagai antisipasi dari potensi

dampak yang akan terjadi. Dengan memahami perkiraan produksi gas CO₂ di TPA Muara Fajar 2, kita dapat lebih awal memahami potensi dampak yang timbul dan pihak terkait dapat merencanakan pengelolaan dan mitigasi yang tepat. Hal ini bisa mencakup strategi untuk mengurangi produksi gas CO₂ atau mengelola gas tersebut secara lebih efektif. Estimasi produksi gas CO₂ dilakukan menggunakan model *LandGEM* hingga masa yang akan datang.

Emisi CO₂ yang mencemari udara di atmosfer dapat mengganggu kehidupan manusia, tumbuhan, atau hewan. Keberadaan gas emisi di atmosfer menunjukkan hubungan yang signifikan antara pencemaran lingkungan terhadap kesehatan manusia (Amouzouvi et al., 2020). Penerapan model dispersi dapat menilai pencemaran di atmosfer secara lebih rinci (Handayani, 2020). Salah satu model yang paling banyak digunakan dalam pemodelan dispersi emisi udara adalah Model AERMOD. *Software* AERMOD menjadi model yang paling direkomendasikan oleh EPA karena telah melewati pengembangan dan evaluasi kinerja yang ekstensif. Model AERMOD digunakan untuk memprediksi konsentrasi emisi berbagai emisi dari sumber titik, garis, dan permukaan, tetapi sangat cocok untuk sumber garis (*line source*) (Atabi et al., 2014; Barjoe et al., 2018).

Penelitian ini menggabungkan dua model, yaitu *LandGEM* dan AERMOD dalam memprediksi produksi dan penyebaran emisi gas CO₂ dari TPA Muara Fajar 2 Pekanbaru. Penelitian terdahulu yang telah dilakukan oleh Monice & Perinov, (2018); Rahmi et al., (2017) umumnya hanya menggunakan model *LandGEM* untuk memprediksi produksi gas CO₂ dari TPA, tanpa mempertimbangkan aspek penyebaran emisi di atmosfer secara rinci. Sehingga model AERMOD juga digunakan dalam penelitian ini untuk memetakan dispersi emisi CO₂ dari TPA Muara Fajar 2 Pekanbaru. Hasil dari pemodelan dispersi dapat membantu dalam mengidentifikasi area area di sekitar TPA yang berpotensi terpapar emisi CO₂. Penelitian ini bisa menjadi informasi awal yang penting untuk merumuskan langkah – langkah pengelolaan sampah di TPA sebagai upaya mengurangi emisi gas CO₂. Implementasi strategi pengelolaan sampah yang lebih baik, seperti pemanfaatan teknologi pengelolaan sampah yang ramah lingkungan dan pengelolaan emisi gas CO₂ dari TPA akan berperan penting dalam menurunkan risiko pencemaran udara dan kesehatan masyarakat. Oleh karena itu, tujuan utama dari penelitian ini ada dua: (i) untuk memprediksi jumlah produksi CO₂ di TPA Muara Fajar 2; (ii) dan memodelkan dispersi CO₂ dari lokasi TPA Muara Fajar 2 Pekanbaru menggunakan AERMOD.

Metode Penelitian

Tempat Penelitian

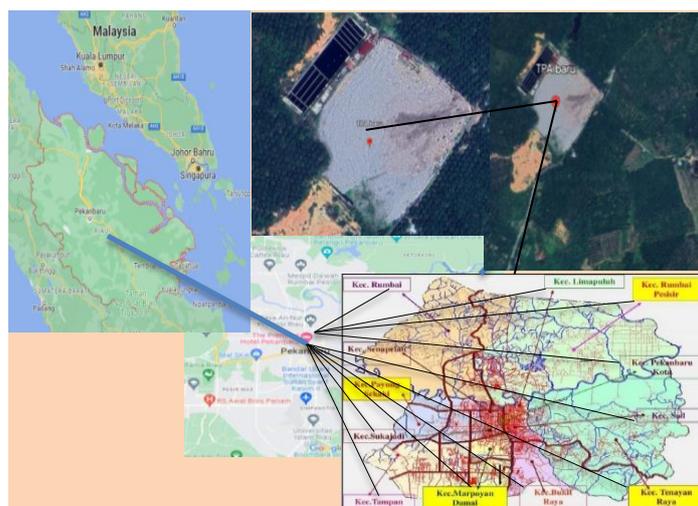
Penelitian ini dilakukan di TPA Muara Fajar 2 yang terletak di Kota Pekanbaru, Riau dan mulai beroperasi sejak tahun 2018. Semua sampah yang berasal dari TPS-TPS di setiap Kecamatan akan diangkut ke TPA Muara Fajar 2 Kota Pekanbaru. Parameter seperti tingkat curah hujan tahunan, data populasi, luas permukaan, suhu rata-rata tahunan, tingkat timbulan sampah per kapita, dan kuantitas sampah dikumpulkan dan disajikan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Karakteristik lokasi tempat pembuangan sampah kota Pekanbaru

No	Karakteristik/Faktor	Nilai
1	Luas permukaan	11 Ha
2	Populasi	1.045.039 jiwa
3	Curah hujan tahunan	473 mm ³
4	Suhu rata rata tahunan	26,0-27,7°C
5	Tingkat timbulan sampah padat	227.851 ton per tahun pada tahun 2022

Sumber: BPS Kota Pekanbaru, 2023

Titik koordinat untuk TPA Muara Fajar 2 Pekanbaru adalah $0^{\circ} 39' 30''$ LU dan $101^{\circ} 26' 36''$ BT yang diperoleh dari *Global Positioning System* (GPS) dan lokasi dari TPA ditunjukkan pada Gambar 1. Pembuangan sampah rata-rata 700 ton per hari dilakukan di lahan TPA Muara Fajar 2, dan tidak dikelola dengan baik. Sampah yang tidak dikelola dengan baik akan menimbulkan ketidaknyamanan kehidupan lingkungan sekitar (Sehol et al., 2022). TPA Muara Fajar 2 memiliki luas lahan sekitar 11 Ha yang terdiri dari 6,12 Ha sebagai *landfill site*. TPA ini berjarak ± 16 km dari titik nol kota Pekanbaru, $\pm 1,6$ km dari jalan umum, dan berada pada ketinggian laut ± 48 m di atas permukaan laut.



Sumber: Google Maps, 2023

Gambar 1. Peta Kota Pekanbaru beserta lokasi TPA Muara Fajar 2 Kota Pekanbaru

Pengumpulan Data

TPA Muara Fajar 2 mulai menampung sampah kota Pekanbaru sejak tahun 2018 dengan menggunakan truk pengangkut sampah. Data yang berkaitan dengan parameter dan spesifikasi model *LandGEM* dapat dilihat pada Tabel 2. Jumlah sampah yang dibuang ke TPA Muara Fajar 2 Pekanbaru pada tahun 2018-2022 diperoleh dari Dinas Lingkungan Hidup dan Kebersihan (DLHK) bidang pengelolaan sampah dan kebersihan (Dinas Lingkungan Hidup dan Kebersihan Kota Pekanbaru, 2023). Data tersebut diproyeksikan untuk masa yang akan datang dengan mempertimbangkan faktor pertumbuhan penduduk menggunakan metode *geometrik*.

Tabel 2. Parameter dan spesifikasi model *LandGEM* yang digunakan dalam penelitian ini

Keterangan	Nama Parameter	Nilai	Satuan	Referensi
QCO ₂	Jumlah produksi CO ₂ tahunan dari TPA	-	per tahun	
k	Konstanta laju untuk produksi CO ₂	0.04	Per tahun	(Sasmita et al., 2016)
L ₀	Potensi produksi CO ₂	100	m ³ /Mg	(Sasmita et al., 2016)
Mi	Massa sampah yang diterima pada tahun i ke tahun i	-		
	Kandungan CO ₂	60	% dari tingkat volume	(Sasmita et al., 2016)
NMOC	Konsentrasi senyawa organik non-	-		

karbondioksida			
Tahun awal pembuangan sampah ke TPA	2018	tahun	(Sasmita et al., 2016)
Tahun penutupan TPA	2048	tahun	(Sasmita et al., 2022)
Apakah tahun penutupan TPA memerlukan model komputasi?	NO	-	
Kapasitas TPA	NA	Mg	
Umur TPA	30	tahun	(Sasmita et al., 2022)

Deskripsi model *LandGEM*

Model *LandGEM* dikembangkan oleh *U.S. Environmental Protection Agency* (USEPA) yang digunakan untuk memperkirakan tingkat emisi gas TPA, seperti CH₄, CO₂, NMOC dan beberapa polutan tertentu (Ghosh, 2020). *LandGEM* menggunakan persamaan laju peluruhan orde pertama untuk menghitung emisi gas CO₂ (Syafudin & Ramadan, 2023). Persamaan (1), menggunakan dua parameter utama untuk memprediksi gas CO₂, yaitu konstanta laju pembentukan gas CO₂ (k dalam per tahun) dan kapasitas produksi CO₂ (L_o dalam cu. m per Mg). Jumlah produksi CO₂ dalam satu tahun dihitung berdasarkan persamaan 1 dan parameter model yang digunakan dalam penelitian ini disajikan dalam Tabel 2. Model *LandGEM* memprediksi gas CO₂ untuk perencanaan TPA.

$$Q_{CO_2} = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0,1}^1 k L_o \left(\frac{M_i}{10} \right) e^{-kt_{ij}} \quad (1)$$

Keterangan: Q_{CO₂} = timbulan karbon dioksida tahunan pada tahun perhitungan (m³/tahun); i = peningkatan waktu setiap tahun; j = peningkatan waktu 0,1 tahun; n = didefinisikan sebagai (tahun perhitungan) - (tahun awal penerimaan sampah); k = laju timbulan karbon dioksida (tahun⁻¹); L_o = potensi kapasitas timbulan karbon dioksida (m³/tahun); t_{ij} = umur dari massa sampah di TPA selama tahun ke-j; M_i = massa sampah yang diterima pada tahun ke-i.

Data seperti jumlah sampah yang masuk ke TPA Muara Fajar 2 Pekanbaru, tahun buka dan penutupan TPA dimasukkan ke dalam software *LandGEM*. *Software* ini menghitung CO₂ berdasarkan nilai standar seperti nilai k, nilai L_o, dan kandungan CO₂ yang ditunjukkan pada Tabel 2.

Model Dispersi Udara

Konsentrasi gas CO₂ di permukaan tanah yang dipancarkan dari lokasi TPA Muara Fajar Kota Pekanbaru ditentukan dengan pemodelan dispersi udara. Persamaan *Gaussian Plume* merupakan dasar dari Model dispersi udara AERMOD yang digunakan untuk simulasi emisi gas CO₂. Kelebihan AERMOD dengan perangkat lunak lainnya adalah kemampuannya dalam memprediksi *ground level concentration* (GLC) (Amouzouvi et al., 2020). Kemampuan yang diberikan model AERMOD untuk memodelkan emisi terdiri dari berbagai sumber emisi, seperti tumpukan, garis, volume, area, dan sumber terbuka. Model ini merupakan alat yang dirancang khusus untuk memprediksi konsentrasi emisi gas dan tingkat endapan emisi gas dalam jarak dekat, dengan batasan jarak hingga 50 kilometer dari sumber emisi. Fitur yang dimiliki AERMOD adalah Sistem Informasi Geografis (SIG) yang terintegrasi dengan sistem pendukung analisis data, sehingga membantu objek dan hasil pemodelan untuk saling berinteraksi dan ditampilkan bersama dengan berbagai informasi geofisika (Elmi et al., 2020).

Gas CO₂ pada model AERMOD dipengaruhi oleh kondisi meteorologi. Asumsi kondisi stabil memberikan hasil yang relevan karena distribusi konsentrasi secara statistik lebih utama untuk diperhatikan daripada konsentrasi yang spesifik pada waktu dan lokasi tertentu. Kondisi lapisan batas stabil (*Stable Boundary Layer/SBL*), distribusi konsentrasi dianggap mengikuti persamaan Gaussian baik secara vertikal maupun horizontal. Lapisan batas konvektif (*Convective Boundary Layer/CBL*), distribusi horizontal dianggap mengikuti persamaan Gaussian, tetapi distribusi vertikal dianggap mengikuti fungsi

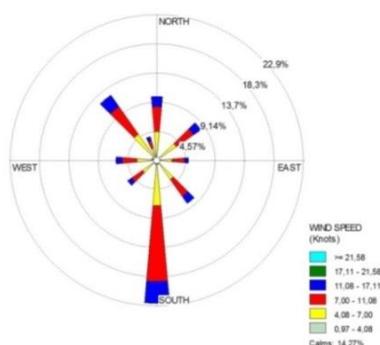
probabilitas kepadatan bi-Gaussian. Model AERMOD juga melacak setiap *plume* yang menembus lapisan stabil dan meningkat, kemudian memungkinkannya untuk masuk kembali ke lapisan batas jika sesuai (Elmi et al., 2020).

Implementasi dari model AERMOD adalah distribusi gas CO₂ di permukaan tanah yang dilepaskan dari lokasi TPA. Beberapa asumsi dibuat dalam penelitian ini, yang meliputi: (i) kondisi *steady-state*, (ii) mengasumsikan konsentrasi awal dari CO₂ adalah nol; dan (iii) emisi dari sumber-sumber lain seperti lalu lintas dan industri diabaikan. Asumsi-asumsi ini mungkin tidak mewakili situasi yang sebenarnya. Penelitian ini merupakan langkah awal dalam memahami hasil model dan memperoleh gambaran mengenai kinerja model dalam kondisi iklim Kota Pekanbaru, yang akan menjadi dasar bagi penelitian selanjutnya. Sebaran emisi gas CO₂ awalnya disimulasikan dalam dua dimensi dengan sedikit atau tanpa peningkatan *plume*, seperti emisi di permukaan tanah atau tingkat rendah. Model AERMOD mensimulasikan sumber area sebagai sebuah wadah yang mungkin juga memiliki sudut rotasi yang ditentukan *relative* terhadap orientasi angin yang umumnya mengarah dari utara ke selatan (Elmi et al., 2020).

Data Meteorologi

Kota Pekanbaru, yang terletak di Provinsi Riau memiliki iklim basah (Rahmanto et al., 2022). Suhu rata-rata di Pekanbaru pada tahun 2022 berkisar antara 26,0 °C – 27,7 °C (BPS Kota Pekanbaru, 2023). Salah satu faktor yang mempengaruhi laju dispersi gas CO₂ di atmosfer adalah stabilitas suhu. Data parameter meteorologi yang diperlukan untuk pemodelan ini diperoleh melalui situs *Climate Data Store* (CDS) Kota Pekanbaru, dan dianggap dapat mewakili data meteorologi TPA Muara Fajar Kota Pekanbaru.

Frekuensi distribusi arah angin dan kecepatan angin akan menentukan penyebaran gas CO₂ dengan perkiraan yang tepat. Diagram angin Kota Pekanbaru dapat dilihat pada Gambar 2. Pergerakan angin bergerak dominan dari selatan dengan presentase 22,9% dari seluruh arah angin per jam. Selain itu, sekitar 12% dari tahun tersebut angin memiliki kecepatan 3,5 m/s – 5,54 m/s, sekitar 7,3 % angin tersebut memiliki kecepatan 2 m/s – 3,5 m/s dan 14,27 % kecepatan angin tenang. Klasifikasi stabilitas atmosfer yang banyak digunakan adalah klasifikasi yang dikembangkan oleh Pasquill, dengan kategori (A = sangat tidak stabil, B = tidak stabil menengah, C= sedikit tidak stabil, D netral, E = agak stabil, F = stabil). Kelas stabilitas didasarkan pada tabel yang terdiri dari kecepatan angin, intensitas radiasi matahari, dan tutupan awan (Koehn et al., 2013). Data meteorologi yang digunakan dalam penelitian ini adalah suhu, tutupan awan, arah angin, kecepatan angin, radiasi matahari, tekanan udara, kelembaban, curah hujan, dan ketinggian dasar awan digunakan dalam model dispersi udara.



Sumber : Stasiun Klimatologi BMKG, 2022

Gambar 2. Diagram Angin Kota Pekanbaru 2022

Hasil dan Pembahasan

Emisi Gas CO₂

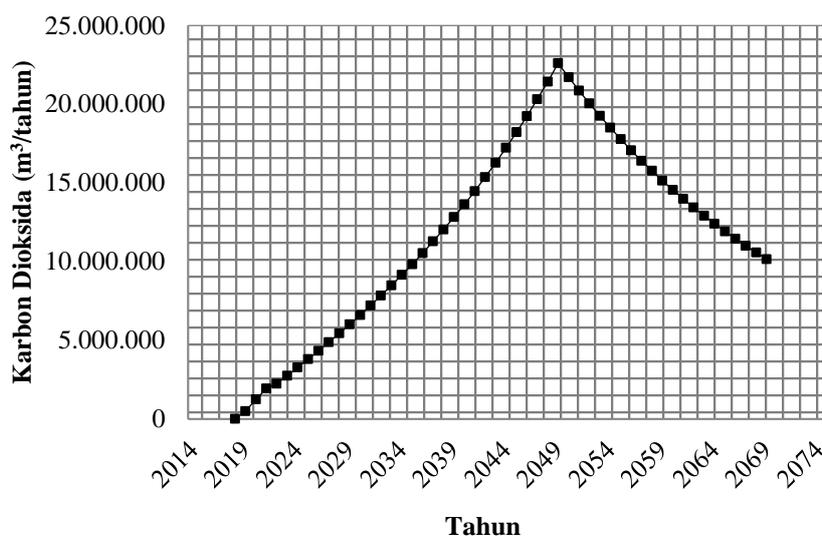
Gas CO₂ diklasifikasikan sebagai rumah kaca karena memiliki potensi signifikan terhadap pemanasan global. Jangka waktu CO₂ di atmosfer berkisar antara ratusan hingga ratusan ribu tahun (Sarnoff, 2016). Berdasarkan Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional, (2023), sampah di Kota Pekanbaru didominasi oleh sampah organik seperti sisa makanan sebesar 59%. Emisi CO₂ dapat dihasilkan dari proses dekomposisi pada sampah organik karena adanya mikroba anaerobik. Jangka waktu paruh sampah organik seperti sisa makanan sangat mempengaruhi emisi gas CO₂ (Ramprasad et al., 2022). Jumlah timbulan sampah pada tahun 2018 adalah 189.082 ton per tahun dan meningkat menjadi 227.851 ton per tahun pada tahun 2022 (Dinas Lingkungan Hidup dan Kebersihan Kota Pekanbaru, 2023). Jumlah timbulan sampah diproyeksikan akan mencapai 765.871 ton per tahun pada tahun 2048. Data jumlah dan proyeksi timbulan sampah dapat dilihat pada Tabel 3. Model *LandGEM* mengestimasi emisi gas CO₂ dengan hasil yang bervariasi (Fallahizadeh et al., 2019).

Tabel 3. Jumlah dan proyeksi timbulan sampah Kota Pekanbaru

Tahun	Timbulan Sampah (ton/tahun)	Tahun	Timbulan sampah (ton/tahun)
2018	189.082	2034	398.706
2019	293.489	2035	417.737
2020	283.523	2036	437.677
2021	143.321	2037	458.568
2022	227.851	2038	480.456
2023	238.727	2039	503.389
2024	250.122	2040	527.417
2025	262.060	2041	552.592
2026	274.569	2042	578.968
2027	287.675	2043	606.603
2028	301.406	2044	635.558
2029	315.793	2045	665.894
2030	330.866	2046	697.679
2031	346.659	2047	730.980
2032	363.206	2048	765.871
2033	380.542	2049	0

Sumber : DLHK, 2023 dan Olahan Data

Jumlah emisi gas CO₂ selama 2018 hingga 2068 dapat dilihat pada Gambar 3. Jumlah gas CO₂ mulai meningkat secara bertahap dari tahun ke tahun. Tren peningkatan emisi gas CO₂ dari sampah TPA Muara Fajar 2 Pekanbaru mencapai puncaknya pada tahun 2049 yaitu sebesar 22.600.000 m³ per tahun. Jumlah produksi gas CO₂ pada tahun 2019 adalah 495.300 m³ per tahun dan mencapai 5.441.000 m³ per tahun pada tahun 2028. Produksi gas CO₂ meningkat dari 0% menjadi 9,10% dalam waktu 10 tahun. Penurunan emisi gas CO₂ mulai terjadi setelah tahun 2049 yaitu pada tahun 2050 karena TPA telah tutup. Hasil ini sesuai penelitian yang dilakukan oleh Ramprasad et al., (2022), bahwa penurunan emisi gas CO₂ terjadi setelah mengalami puncak. Hal ini menunjukkan bahwa emis gas CO₂ bergantung pada kuantitas sampah, dan tingkat biodegradasi. Produksi gas CO₂ akan menurun karena sampah yang akan terurai akan berkurang setiap tahun (Ghasemzade & Pazoki, 2017). Jenis komponen sampah padat yang akan terurai juga dapat mempengaruhi jumlah produksi CO₂.



Gambar 3. Emisi CO₂ m³/tahun dari TPA Muara Fajar 2 Pekanbaru 2018-2068

Secara umum komponen sampah organik dapat dibagi menjadi senyawa yang dapat terurai dengan cepat (terurai dalam waktu 3 bulan hingga 5 tahun) dan senyawa yang dapat terurai secara perlahan (terurai hingga 50 tahun atau lebih). Senyawa yang dapat terurai dengan cepat termasuk yang mudah membusuk (sisa makanan), kotoran, limbah lumpur, koran, kardus, sebagian dari sampah taman dan abu isinerator. Senyawa yang dapat terurai secara perlahan terdiri dari karet, kulit, tekstil, dan bagian kayu dari sampah kebun. Potensi senyawa organik yang dapat terurai dengan cepat dalam menghasilkan emisi gas CO₂ diperkirakan lebih tinggi dibandingkan dengan senyawa organik yang dapat terurai dengan lambat (Hosseini et al., 2018). Berdasarkan Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional, (2023) lebih dari 71 % sampah di Kota Pekanbaru merupakan senyawa yang terurai dengan cepat, maka periode sebelum tahun penutupan TPA jumlah produksi gas CO₂ akan tinggi. Senyawa organik yang terurai dengan lambat sebesar 29%, sehingga jumlah produksi gas CO₂ akan menurun setelah tahun penutupan TPA.

Penguraian sampah akan dipengaruhi oleh suhu. Suhu yang panas akan menyebabkan peningkatan aktivitas bakteri, sehingga menghasilkan gas CO₂ yang tinggi (Khalil et al., 2014). Menurut hasil penelitian Hosseini et al., (2018), pada musim panas dengan suhu 26,85 °C memproduksi gas TPA yang maksimum dan musim dingin dengan suhu 0,25 °C memproduksi gas TPA secara minimum. Beberapa data meteorologi seperti suhu, kelembaban, dan curah hujan mempengaruhi jumlah produksi gas CO₂. Penelitian menggunakan korelasi pearson untuk memahami hubungan antara data meteorologi dengan emisi gas CO₂, dan analisis regresi dilakukan untuk menentukan sejauh mana kondisi meteorologi mempengaruhi emisi gas CO₂.

Nilai emisi CO₂ terhadap faktor yang mempengaruhinya dapat dilihat menggunakan uji statistik. Hasil uji statistik dapat dilihat pada Tabel 4. Hasil maksimum dan minimum CO₂ dari periode 2018-2022 berada dalam kisaran 0 hingga 2.238.000. Nilai standar deviasi untuk CO₂ sebesar 943307,20765.

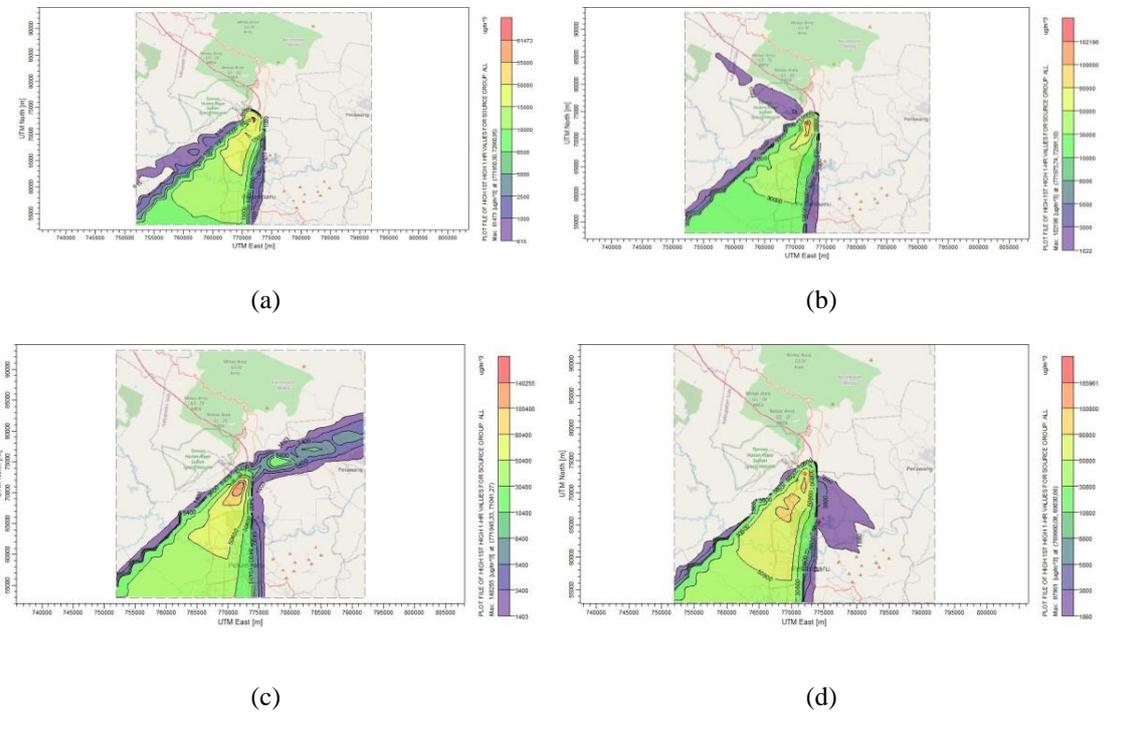
Tabel 4. Hasil Uji Statistik Emisi Gas CO₂
Descriptive Statistics

	N	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation
Jumlah Penduduk	5	983356	1143359	1049239.80	75108.829
Timbulan Sampah	5	143321.00	293489.00	227453.2000	63354.72292
Emisi CO ₂	5	.00	2238000.00	1183260.0000	943307.20765
Valid N (listwise)	5				

Sumber : Hasil SPSS

Pemodelan Emisi CO₂ dari TPA

Tempat yang paling umum dalam pembuangan sampah di Kota Pekanbaru adalah TPA. Sejumlah besar gas CO₂ di produksi setiap tahun dan dilepaskan ke atmosfer karena beberapa ton sampah Kota Pekanbaru dibuang setiap tahun di TPA Muara Fajar 2. Pemodelan dispersi udara di TPA Muara Fajar 2 Pekanbaru dilakukan untuk menentukan penyebaran emisi CO₂ yang dihasilkan. Tren konsentrasi CO₂ berubah secara tahunan tergantung pada variasi kondisi meteorologi. Masukan model untuk mensimulasikan distribusi rata-rata per jam dari konsentrasi CO₂ untuk tahun 2019 hingga tahun 2022 adalah sumber emisi, parameter meteorologi, dan reseptor (SDN 49 Pekanbaru). Arah angin ditunjukkan pada Gambar 3. Secara umum, medan angin (arah dan kecepatan angin) dan stabilitas atmosfer (stabil, netral, dan tidak stabil) mempengaruhi penyebaran polutan di udara. Sebagai contoh, dispersi polutan selama kondisi stabil lebih rendah daripada saat kondisi netral dan kondisi tidak stabil. Distribusi konsentrasi CO₂ di berbagai tahun dapat dilihat pada Gambar 4a,4b,4c, dan 4d.



Gambar 4. Dispersi emisi Gas CO₂ pada tahun 2019-2022 di TPA Muara Fajar 2 Pekanbaru: (a) tahun 2019, (b) tahun 2020, (c) tahun 2021, (d) tahun 2022

Gambar 4a merupakan hasil gambar dispersi emisi CO₂ pada tahun 2019. Konsentrasi tertinggi untuk emisi CO₂ adalah 61.473 µg/m³. Distribusi per jam untuk konsentrasi CO₂ selama tahun 2020 ditunjukkan pada Gambar 4b. Konsentrasi tertinggi emisi CO₂ diperkirakan sebesar 102.198 µg/m³. Konsentrasi emisi CO₂ per jam selama tahun 2021 ditunjukkan pada Gambar 4c. Konsentrasi tertinggi untuk emisi CO₂ adalah 140.255 µg/m³. Gambar 4d merupakan hasil dispersi emisi CO₂ pada tahun 2022. Konsentrasi tertinggi untuk emisi CO₂ adalah 185.961 µg/m³. Emisi CO₂ pada tahun 2022 menyebar terutama ke arah selatan barat daya, karena arah angin yang dominan dari arah selatan. Kecepatan angin maksimum sebesar 5,54 m/s. Hasil dispersi emisi CO₂ pada tahun 2022 menunjukkan nilai konsentrasi lebih tinggi dari ketiga tahun sebelumnya (2019-2021), karena jumlah sampah pada tahun 2022 lebih besar dari tahun-tahun sebelumnya (2019-2021). Konsentrasi emisi CO₂ dari tahun 2019 hingga 2022 mengalami peningkatan. Hal ini terjadi karena jumlah timbulan sampah yang dihasilkan TPA Muara Fajar 2 Pekanbaru mengalami peningkatan. Peningkatan jumlah sampah akan berbanding lurus dengan peningkatan gas CO₂. Peningkatan produksi gas CO₂ adalah salah satu faktor yang berkontribusi pada peningkatan konsentrasi CO₂ di atmosfer.

Kesimpulan

Penelitian ini dilakukan untuk mengestimasi emisi gas CO₂ dari TPA Muara Fajar 2 Pekanbaru dan mengetahui penyebarannya menggunakan AERMOD. Estimasi gas CO₂ dilakukan dari tahun 2018 hingga 2068. Sampah yang dibuang pada TPA Muara Fajar 2 saat ini hanya ditumpuk. Produksi gas CO₂ mencapai puncak pada tahun 2049 sebesar 22.600.000 m³ per tahun. Produksi gas CO₂ akan menurun secara bertahap setelah 30 tahun pertama. Pemodelan AERMOD menunjukkan bahwa konsentrasi tertinggi untuk emisi CO₂ terjadi pada tahun 2022 yaitu sebesar 185.961 µg/m³. Emisi CO₂ pada tahun 2022 menyebar terutama ke arah selatan barat daya, karena arah angin yang dominan dari arah selatan. Kecepatan angin maksimum sebesar 5,54 m/s. Menurut *Occupational Safety and Health Administration* (OSHA), nilai baku mutu CO₂ sebesar 5000 ppm untuk paparan rata-rata selama 8 jam kerja. Konsentrasi emisi CO₂ yang dihasilkan berada dalam rentang 34,15 ppm hingga 103,31 ppm. Sehingga, hasil tersebut masih berada di bawah baku mutu. Hasil penelitian ini dapat digunakan oleh pihak terkait sebagai informasi awal untuk merancang sistem pengelolaan yang berkelanjutan dan meminimalisir dampak negatif terhadap lingkungan.

Daftar Pustaka

- Ahmad, P., & Wani, M. R. (2013). *Physiological Mechanisms and Adaptation Strategies in Plants Under Changing Environment: Volume 2*. Springer New York.
- Amouzouvi, Y. M., Dzagli, M. M., Sagna, K., Török, Z., Roba, C. A., Mereuță, A., Ozunu, A., & Edjame, K. S. (2020). Evaluation of Pollutants Along the National Road N2 in Togo using the AERMOD Dispersion Model. *Journal of Health & Pollution V, 10*(27), 1–12.
- Atabi, F., Ehyaei, M. A., & Ahmadi, M. H. (2014). Calculation of CH₄ and CO₂ Emission Rate in Kahrizak Landfill Site with Land GEM Mathematical Model. *Sustainability Forum*, 1–17.
- Barjoe, S. S., Azimzadeh, H., Kuchakzadeh, M., MoslehArani, A., & Sodaiezadeh, H. (2018). Dispersion and Health Risk Assesment of PM₁₀ Emitted from the Stacks of a Ceramic and Tile industry in Ardakan, Yazd, Iran. *Iranian South Medical Journal Bimonthly*, 22(5), 317–332. <https://doi.org/1029252/ismj.22.5.317>
- Badan Pusat Statistik (BPS) Indonesia. (2023). *Statistik Indonesia 2023*. Badan Pusat Statistik Indonesia.
- Badan Pusat Statistik (BPS) Kota Pekanbaru. (2023). *Kota Pekanbaru dalam Angka*. Badan Pusat Statistik Kota Pekanbaru.

- Badan Pusat Statistik (BPS) Provinsi Riau. (2023). *Provinsi Riau Dalam Angka 2023*. Pekanbaru: Badan Pusat Statistik Provinsi Riau.
- Cambaliza, M. O. L., Bogner, J. E., Green, R. B., Shepson, P. B., Harvey, T. A., Spokas, K. A., Stirm, B. H., & Corcoran, M. (2017). Field Measurements and Modeling to Resolve m² to km² CH₄ Emissions for a Complex Urban Source : An Indiana Landfill Study. *Elementa Science of the Anthropocene*, 3(5), 2–12. <https://doi.org/https://doi.org/10.1525/elementa.145>
- Dinas Lingkungan Hidup dan Kebersihan Kota Pekanbaru. (2023). *Pengelolaan Sampah dan Kebersihan*.
- Elmi, A., Al-harbi, M., Yassin, M. F., & Al-awadhi, M. M. (2020). Modeling Gaseous Emissions and Dispersion of Two Major Greenhouse Gases from Landfill Sites in Arid Hot Environment. *Environmental Science and Pollution Research, Alhumoud 2005*. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11760-6>
- Fallahizadeh, S., Rahmatinia, M., Mohammadi, Z., Vaezzadeh, M., Tajamiri, A., & Soleimani, H. (2019). Estimation of Methane Gas by LandGEM Model from Yasuj Municipal Solid Waste Landfill, Iran. *MethodsX*. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2019.02.013>
- Ghasemzade, R., & Pazoki, M. (2017). Estimation and Modeling of Gas Emissions in Municipal Landfill (Case Study: Landfill of Jiroft City). *Pollution*, 3(4), 689–700.
- Ghosh, P., Shah, G., Chandra, R., Sahota, S., Kumar, H., Vijay, V. K., & Thakur, I. S. (2018). Assessment of Methane Emissions and Energy Recovery Potential from the Municipal Solid Waste Landfills of Delhi, India. *Bioresource Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.10.069>
- Ghosh, S. K. (2020). *Urban Mining and Sustainable Waste Management*. Springer Nature Singapore.
- Handayani. (2020). *Biomonitoring Partikulat Matter di Udara yang Dikeluarkan dari Pabrik Semen dan Perbandingannya dengan Hasil Pemodelan Dispersi*. Universitas Islam Negeri Ar-Raniry.
- Head, H. (2018). *Poisoned Forests*. Gareth Stevens Publishing Lllp.
- Hosseini, S. S., Yaghmaeian, K., Yousefi, N., & Mahvi, A. H. (2018). Estimation of Landfill Gas Generation in A Municipal Solid Waste Disposal Site by LandGEM Mathematical Model. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 4(4), 493–506. <https://doi.org/10.22034/gjesm.2018.04.009>
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. (2022). *Jumlah Timbulan Sampah*. <https://www.menlhk.go.id/>
- Khalil, M. J., Gupta, R., & Sharma, K. (2014). Microbiological Degradation of Municipal Solid Waste in Landfills for LFG Generation. *International Journal of Engineering and Technical Research*, 10–14.
- Knapp, J. R., Laur, G. L., Vadas, P. A., Weiss, W. P., & Tricarico, J. M. (2014). Invited Review : Enteric Methane in Dairy Cattle Production : Quantifying the Opportunities and Impact of Reducing Emissions. *Journal of Dairy Science*, 97(6), 1–31. <https://doi.org/10.3168/jds.2013-7234>
- Koehn, A. C., Leytem, A. B., & Bjorneberg, D. L. (2013). Comparison of Atmospheric Stability Methods for Calculating Ammonia and Methane Emission Rates with Windtrax. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 56(2), 763–768.
- Lee, U., Han, J., & Wang, M. (2017). Evaluation of Landfill Gas Emissions from Municipal Solid Waste Landfills for the Life-Cycle Analysis of Waste-to-Energy Pathways. *Journal of Cleaner Production*, 1–24. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.016>
- Mahyudin, R. P. (2017). Kajian Permasalahan Pengelolaan Sampah dan Dampak Lingkungan di TPA (Tempat Pemrosesan Akhir). *Jukung (Jurnal Teknik Lingkungan)*, 3(1), 66–74.
- Majdinasab, A., Zhang, Z., & Yuan, Q. (2017). Modelling of Landfill Gas Generation : A Review. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 2016. <https://doi.org/10.1007/s11157-017-9425-2>
- Mehta, Y. D., Shastri, Y., & Joseph, B. (2018). Economic Analysis and Life Cycle Impact Assessment of Municipal Solid Waste (MSW) Disposal: A Case Study of Mumbai, India. *Waste Management and Research*, 36(12), 1177–1189. <https://doi.org/10.1177/0734242X18790354>
- Monice, & Perinov. (2018). Analisis Pemanfaatan Energi Dari Pengolahan Metode Landfill di TPA Muara Fajar Pekanbaru. *Rang Teknik Journal*, 1(2), 215–220.
- Njoku, P. O., Odiyo, J. O., Durowoju, O. S., & Edokpayi, J. N. (2018). A Review of Landfill Gas Generation and Utilisation in Africa. *Open Environmental Sciences*, 10, 1–15. <https://doi.org/10.2174/1876325101810010001>
- Occupational Safety and Health Administration (OSHA). (2012). *Chemical Sampling Information: Carbon Dioxide*.

- Pawar, P. M., Balasubramaniam, R., Ronge, B. P., Salunkhe, S. B., Vibhute, A. S., & Melinamath, B. (2021). *Techno-Societal 2020: Proceedings of the 3rd International Conference on Advanced Technologies for Societal Applications—Volume 2*. Springer International Publishing.
- Pawlowska, M. (2014). *Mitigation of Landfill Gas Emissions*. Taylor & Francis.
- Peraturan Daerah Kota Pekanbaru Nomor 8 Tahun 2014 Tentang Pengelolaan Sampah, (2014).
- Rahmanto, E., Rahmabudhi, S., & Kustia, T. (2022). Analisis Spasial Penentuan Tipe Iklim Menurut Klasifikasi Schmidt – Ferguson Menggunakan Metode Thiessen – Polygon di Provinsi Riau Spatial Analysis of Climate Type Determination by Schmidt – Ferguson Classification Using the Thiessen – Polygon Method in. *Buletin GAW Bariri*, 3(1), 35–42.
- Rahmi, H., Sasmita, A., & Yenie, E. (2017). Analisis Produksi Gas Metana (CH₄) dan Karbon Dioksida (CO₂) dari Tempat Pembuangan Akhir Kota Pekanbaru Herfi. *Jom FTEKNIK*, 4(1), 1–8.
- Ramadhan, D. (2019). Kebijakan Pemerintah Daerah Kota Pekanbaru Dalam Pengelolaan Sampah dengan Konsep 3R Tahun 2017. *Jom Fisip*, 6(2), 1–13.
- Ramprasad, C., & Gopalakrishnan, A. N. (2013). Electrochemical Treatment of Wetland Water Contaminated by Landfill Leachate. *Springer*, 83(1), 1–6. <https://doi.org/10.1007/s40010-012-0048-2>
- Ramprasad, C., Teja, H. C., Gowtham, V., & Vikas, V. (2022). MethodsX Quantification of Landfill Gas Emissions and Energy Production Potential in Tirupati Municipal Solid Waste Disposal Site by LandGEM Mathematical Model. *MethodsX*, 9, 2–12. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2022.101869>
- Sari, E. G., & Sofwan, M. (2021). Carbon Dioxide (CO₂) Emissions Due to Motor Vehicle Movements in Pekanbaru City , Indonesia. *Journal of Geoscience, Engineering, Environment, and Technology*, 6(4). <https://doi.org/10.25299/jgeet.2021.6.4.7692>
- Sarnoff, J. D. (2016). *Research Handbook on Intellectual Property and Climate Change*. Edward Elgar Publishing, Incorporated.
- Sasmita, A., Andesgur, I., & Rahmi, H. (2016). Potensi Produksi Gas Metana Dari Kegiatan Landfilling di TPA Muara Fajar , Pekanbaru. *Seminar Nasional Teknik Kimia –Teknologi Oleo Petro Kimia Indonesia*, 169–176. <https://www.researchgate.net/publication/319006888%0APotensi>
- Sasmita, A., Yenie, E., & Khairani, S. (2022). Estimasi Emisi Gas Rumah Kaca dari Limbah Padat dan Air Limbah Domestik di Kota Pekanbaru. *Jurnal Sains & Teknologi Lingkungan*, 14(1), 50–64. <https://doi.org/10.20885/jstl.vol14.iss1.art8>
- Sehol, M., Armus, R., Gumirat, M. I. I. G., Purnomo, T., Riyanti, Mamede, M., Samai, S., Satriawan, D., Wahyuni, S., Lutfi, Erika, H., Pramudianto, A., Pertiwi, N., & Indrawati, A. (2022). *Biologi Lingkungan*. PT Global Eksekutif Teknologi.
- Sharma, V., & Singh, D. (2021). *Magbook India & World Geography for Civil services prelims/state PCS & other Competitive Exam 2022*. Arihant Publications India limited.
- Shen, S., Chen, Y., Zhan, L., Xie, H., Bouazza, A., He, F., & Zuo, X. (2018). Methane Hotspot Localization and Visualization at A Large-Scale Xi 'an Landfill in China : Effective Tool for Landfill Gas Management. *Journal of Environmental Management*, 225, 232–241. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.08.012>
- Shiddieq, D., Sudira, P., & Tohari. (2018). *Aspek Dasar Agronomi Berkelanjutan*. Gajah Mada University Press.
- Sil, A., Kumar, S., & Kumar, R. (2014). Formulating LandGem Model for Estimation of Landfill Gas Under Indian Scenario Avick Sil * Sunil Kumar Rakesh Kumar. *Environmental Technology and Management*, 17, 293–299.
- Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional. (2023). *Komposisi Sampah*. <https://sipsn.menlhk.go.id/sipsn/>
- Surtinah, S. (2020). Increasing Sweet Corn Production : Fertilizing Zea Mays Saccharata , Sturt Context in Pekanbaru . Increasing Sweet Corn Production : Fertilizing Zea Mays Saccharata , Sturt Context in Pekanbaru. Indonesia. *Earth and Environmental Science PAPER*, 469, 1–5. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/469/1/012114>
- Syafrudin, & Ramadan, B. S. (2023). *Pemodelan Rekayasa Lingkungan*. Jakad Media Publishing.
- Wijaya, T., & Cahyawati, A. N. (2022). *Transformasi Dan Inovasi Digital Business Models Dalam Berbagai Sektor Publik*. Deepublish.
- Yaman, C. (2019). Investigation of Greenhouse Gas Emissions and Energy Recovery Potential from Municipal Solid Waste Management Practices. *Environmental Development*, 1–16.

<https://doi.org/10.1016/j.envdev.2019.100484>

Younes, M. K., Nopiah, Z. M., Basri, N. E. A., Basri, H., Abushammala, M. F. M., & Younes, M. Y. (2015). Landfill Area Estimation Based on Integrated Waste Disposal Options and Solid Waste Forecasting Using Modified ANFIS Model. *Waste Management*, 2-9.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.10.020>