

No. Urut: 159 A/UN7.F3.6.8.TL/DL/X/2024
160 A/UN7.F3.6.8.TL/DL/X/2024
161 A/UN7.F3.6.8.TL/DL/X/2024

Laporan Tugas Akhir

**PERENCANAAN STRATEGI REDUKSI EMISI
GAS RUMAH KACA (GRK) SEKTOR ENERGI
(INDUSTRI, TRANSPORTASI, DAN DOMESTIK)
DI KABUPATEN KLATEN**



Disusun Oleh:

Dhiya Ghazy Khairy	21080121140136
Dianne Christin Sianturi	21080121140142
Jihan Muthi'ah Amatulloh	21080121120017

**DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEMARANG
2025**

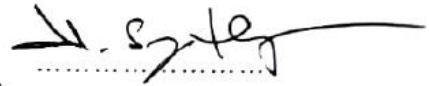
HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
NAMA : Dhiya Ghazy Khairy
NIM : 21080121140136
Jurusan/Departemen : Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Undip
Judul Skripsi : Perencanaan Strategi Reduksi Emisi Gas Rumah Kaca (GRK)
Sektor Energi (Industri, Transportasi, dan Domestik) di
Kabupaten Klaten

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Tim Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana pada Departemen Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro.

Pembimbing I:

Dr. Ir. Haryono Setiyo Huboyo, S.T., M.T., IPM., ASEAN Eng.
197402141999031002



Pembimbing II:

Dr. Ir. Nurandani Hardyanti, S.T., M.T., IPM., ASEAN Eng.
197301302000032001



Ketua Penguji:

Dr. Ing. Ir. Sudarno, S.T., M.Sc
197401311999031003



Anggota Penguji:

Prof. Dr. Ir. Badrus Zaman, S.T., M.T., IPM., ASEAN Eng.
197208302000031001



Semarang, 17 juni 2025

Program Studi Teknik Lingkungan

Fakultas Teknik Undip

Ketua



Prof. Dr. Ir. Badrus Zaman, S.T., M.T., IPM., ASEAN Eng.
NIP. 197208302000031001

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
NAMA : Dianne Christin Sianturi
NIM : 21080121140142
Jurusan/Departemen : Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Undip
Judul Skripsi : Perencanaan Strategi Reduksi Emisi Gas Rumah Kaca (GRK)
Sektor Energi (Industri, Transportasi, dan Domestik) di
Kabupaten Klaten

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Tim Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana pada Departemen Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro.

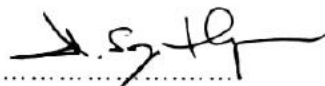
Pembimbing I:

Dr. Ir. Nurandani Hardyanti, S.T., M.T., IPM., ASEAN Eng.
197301302000032001


.....

Pembimbing II:

Dr. Ir. Haryono Setiyo Huboyo, S.T., M.T., IPM., ASEAN Eng.
197402141999031002


.....

Ketua Penguji:

Dr. Ing. Ir. Sudarno, S.T., M.Sc
197401311999031003


.....

Anggota Penguji:

Prof. Dr. Ir. Badrus Zaman, S.T., M.T., IPM., ASEAN Eng.
197208302000031001


.....

Semarang, 17 juni 2025

Program Studi Teknik Lingkungan

Fakultas Teknik Undip

Ketua



Prof. Dr. Ir. Badrus Zaman, S.T., M.T., IPM., ASEAN Eng.
NIP. 197208302000031001

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
NAMA : Jihan Muthi'ah Amatulloh
NIM : 21080121120017
Jurusan/Departemen : Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Undip
Judul Skripsi : Perencanaan Strategi Reduksi Emisi Gas Rumah Kaca (GRK)
Sektor Energi (Industri, Transportasi, dan Domestik) di
Kabupaten Klaten

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Tim Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana pada Departemen Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro.

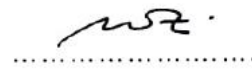
Pembimbing I:

Dr. Ir. Haryono Setiyo Huboyo, S.T., M.T., IPM., ASEAN Eng.
197402141999031002



Pembimbing II:

Dr. Ir. Nurandani Hardyanti, S.T., M.T., IPM., ASEAN Eng.
197301302000032001



Ketua Penguji:

Prof. Dr. Ir. Badrus Zaman, S.T., M.T., IPM., ASEAN Eng.
197208302000031001



Anggota Penguji:

Dr. Ing. Ir. Sudarno, S.T., M.Sc
197401311999031003



Semarang, 17 juni 2025

Program Studi Teknik Lingkungan

Fakultas Teknik Undip

Ketua



Prof. Dr. Ir. Badrus Zaman, S.T., M.T., IPM., ASEAN Eng.
NIP. 197208302000031001

ABSTRAK

Peningkatan jumlah penduduk serta aktivitas antropogenik di Kabupaten Klaten diproyeksikan meningkatkan konsumsi energi dan emisi gas rumah kaca (GRK). Tugas akhir ini bertujuan untuk melakukan inventarisasi emisi GRK, menganalisis distribusinya, serta merumuskan strategi untuk mereduksi emisi GRK di Kabupaten Klaten, khususnya pada subsektor industri, transportasi, dan domestik. Estimasi emisi GRK dilakukan berdasarkan pedoman IPCC 2006 dan diproyeksikan hingga 10 tahun kedepan dengan menggunakan skenario *Business-as-Usual* (BaU). Analisis pada subsektor industri dilakukan melalui pendekatan rasio jumlah tenaga kerja terhadap emisi yang dihasilkan serta pendekatan *Industrial Pollution Projection System* (IPPS). Untuk subsektor transportasi, digunakan pendekatan *Vehicle Kilometer Traveled* (VKT), sedangkan pada subsektor domestik menggunakan pendekatan *bottom-up*. Dispersi emisi GRK dimodelkan dengan menggunakan AERMOD, dan penentuan strategi reduksi emisi GRK ditentukan melalui analisis SWOT dan matriks IFAS-EFAS. Proyeksi emisi GRK pada tahun 2033 menunjukkan bahwa subsektor transportasi menjadi kontributor terbesar yang menghasilkan sekitar 965.415,73 ton CO₂eq, diikuti dengan subsektor industri sebesar 719.381,62 ton CO₂eq, dan subsektor domestik sebesar 144.344,09 ton CO₂eq. Hasil pemodelan AERMOD menunjukkan bahwa konsentrasi CO₂ tertinggi berada di Kecamatan Ceper dan Karanganyar. Prioritas utama strategi reduksi emisi GRK pada subsektor industri adalah penerapan tanur induksi. Sementara itu, pelatihan *Smart Eco-driving* menjadi strategi andalan di subsektor transportasi, dan pemasangan biogas *digester* menjadi strategi reduksi yang paling cocok diterapkan pada subsektor domestik.

Kata Kunci: Gas Rumah Kaca, IPCC, Subsektor Industri, Subsektor Transportasi, Sektor Domestik, AERMOD, IFAS-EFAS

ABSTRACT

The increasing population and anthropogenic activities in Klaten Regency are projected to raise energy consumption and greenhouse gas (GHG) emissions. This final project aims to conduct an inventory of GHG emissions, analyze their distribution, and develop strategies to reduce GHG emissions in the Klaten Regency, particularly in the industrial, transportation, and domestic subsectors. GHG emissions are estimated using the 2006 IPCC methods and projected over a 10-year period under a Business-as-Usual (BaU) scenario. The industrial subsector analyzes GHG emissions from the employee-to-emission ratio and Industrial Production and Process Statistics (IPPS) method approach. The transportation subsector uses the Vehicle Kilometer Traveled (VKT) approach, while the domestic subsector analyzes using a bottom-up approach. The dispersion of GHG emissions was modeled using AERMOD, and reduction strategies were prioritized through the combination of SWOT analysis and the IFAS-EFAS matrix framework. GHG emissions projections for 2033 show the transportation subsector is the largest contributor, emitting approximately 965.415,73 tons of CO₂eq, followed by the industrial subsector with 719.381,62 tons of CO₂eq, and the domestic subsector with 144.344,09 tons of CO₂eq. AERMOD modeling results indicate that the highest concentrations of CO₂ emissions are in Ceper and Karanganom Districts. The primary priority of the GHG emissions reduction strategy in the industrial subsector is the adoption of induction furnaces. In the transportation subsector, Smart Eco-driving training for passenger vehicle drivers is prioritized, while in the domestic subsector, the installation of biogas digesters becomes the most suitable strategy.

Keywords: *Greenhouse Gas, IPCC, Industry Subsector, Transportation Subsector, Domestic Subsector, AERMOD, IFAS-EFAS*

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Seiring berjalannya waktu, suatu wilayah dapat mengalami pertumbuhan penduduk yang disertai peningkatan konsumsi energi untuk menunjang berbagai aktivitas penduduk, serta mendorong kegiatan industri hingga perekonomian. Adanya pertumbuhan jumlah penduduk dan perekonomian dapat menyebabkan kebutuhan energi juga turut meningkat, khususnya bahan bakar (Sartika dan Amar, 2020). Energi tersebut umumnya berasal dari bahan bakar yang akan diubah menjadi energi panas, gerak, listrik, dan lainnya untuk mendukung aktivitas masyarakat di suatu wilayah. Namun, penggunaan energi tersebut menghasilkan dampak, salah satunya berupa emisi gas rumah kaca (GRK).

Menurut Peraturan Presiden Nomor 98 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Nilai Ekonomi Karbon Untuk Pencapaian Target Kontribusi yang Ditetapkan secara Nasional dan Pengendalian Emisi Gas Rumah Kaca Dalam Pembangunan Nasional, Gas Rumah Kaca (GRK) adalah gas yang terkandung dalam atmosfer, baik alami maupun antropogenik yang menyerap dan memancarkan kembali radiasi inframerah. Keberadaan GRK pada lapisan atmosfer, yakni uap air (H_2O), CO_2 , O_3 , N_2O , dan CH_4 , mencegah lepasnya radiasi matahari yang telah direfleksikan oleh permukaan bumi ditransmisikan sepenuhnya keluar dari lapisan atmosfer (Borduas and Donahue, 2018). Menurut McCurdy dan Rhodes (2023), emisi GRK dipengaruhi oleh tingkat ekonomi, penggunaan energi, kondisi demografi penduduk, perkembangan teknologi, transportasi, dan kebijakan yang berlaku.

Kabupaten Klaten, berdasarkan Peraturan Daerah Kabupaten Klaten Kabupaten Klaten Nomor 10 Tahun 2021 tentang Rencana Tata Ruang Wilayah Kabupaten Klaten Tahun 2021-2041, memiliki beberapa kawasan strategis. Kawasan-kawasan tersebut meliputi kawasan perdagangan dan jasa, kawasan kegiatan industri, kawasan agropolitan, kawasan minapolitan, kawasan konservasi, serta kawasan pariwisata. Kabupaten Klaten juga termasuk ke dalam wilayah

pengembangan Subosukawonosraten, yang memiliki keterkaitan pengembangan secara ekonomi, sosial, dan/atau budaya. Kawasan ini meliputi Kota Surakarta, Kabupaten Boyolali, Kabupaten Sukoharjo, Kabupaten Karanganyar, Kabupaten Wonogiri, Kabupaten Sragen, dan Kabupaten Klaten.

Menurut BPS (2024), Kabupaten Klaten memiliki pertumbuhan penduduk dari 2020 hingga 2023 sebesar 0,63%, dan pada beberapa kecamatan dapat melebihi 0,9%. Hal tersebut juga didukung dengan laju pertumbuhan ekonomi sebesar 5,70% (BPS, 2024). Adanya pertumbuhan penduduk dan aktivitas perekonomian, maka dapat mendorong permintaan energi (bahan bakar) di wilayah Kabupaten Klaten.

Pada tahun 2023, menurut BPS (2024), Produk Domestik Regional Bruto (PDRB) Atas Dasar Harga Berlaku di Kabupaten Klaten mengalami peningkatan dari 46,59 triliun menjadi 51,27 triliun. Salah satu sektor yang memiliki peranan paling besar dalam PDRB Kabupaten Klaten merupakan sektor industri pengolahan, yaitu sebesar 37,93%. Berdasarkan RTRW Kabupaten Klaten, kawasan peruntukan industri memiliki luas kurang lebih 1.690 Ha yang tersebar di 23 kecamatan. Kegiatan industri ini menjadi salah satu penyumbang emisi GRK yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar untuk menjalankan proses produksi pada industri.

Selain itu, dengan adanya pertumbuhan penduduk juga menyebabkan aktivitas sektor domestik turut meningkat. Salah satu aktivitas domestik adalah memasak, baik menggunakan (*liquifield petroleum gas*) LPG, kayu bakar, minyak tanah, dsb. Menurut Yuliani *et al* (2023), penggunaan bahan bakar, seperti LPG, mempunyai pengaruh signifikan terhadap emisi, seperti emisi CO₂. Yoro dan Daramola (2020) menyebutkan bahwa gas CO₂ merupakan GRK yang dihasilkan dalam jumlah terbesar saat ini.

Lokasi yang cukup strategis, ditambah adanya kegiatan industri dan pariwisata, serta adanya pertumbuhan penduduk membuat kebutuhan transportasi turut meningkat. Secara geografis, terdapat jalan utama yang saling menghubungkan antara Kabupaten Klaten dengan Kota Surakarta dan Daerah Istimewa Yogyakarta (DIY). Jalan utama yang diperuntukkan sebagai jalur lintasan kendaraan logistik dalam kegiatan distribusi logistik antar daerah telah menciptakan

padatnya arus lalu lintas di Kabupaten Klaten. Apalagi dengan Kota Surakarta dan DIY yang termasuk kota wisata sehingga mendatangkan wisatawan dari berbagai daerah. Jalur tersebut banyak dilintasi oleh kendaraan umum dan kendaraan pribadi.

Hal ini juga didukung dengan pola perilaku masyarakat Kabupaten Klaten yang mengalami peningkatan mobilitas baik dalam kota maupun luar kota. Masyarakat Kabupaten Klaten juga cenderung menggunakan kendaraan pribadi dibanding menggunakan transportasi umum. Kegiatan transportasi turut serta dalam meningkatkan emisi GRK, dan tercatat pada tahun 2019, sektor transportasi di Indonesia berkontribusi 24,64% terhadap total emisi GRK (Sunarti et al, 2020).

Dengan kondisi tersebut, tidak ditemui upaya pengendalian emisi GRK di Kabupaten Klaten yang terencana dan terintegrasi pada sektor energi. Ketiadaan strategi ini berpotensi menimbulkan berbagai dampak negatif, seperti penurunan kualitas udara, peningkatan risiko gangguan kesehatan masyarakat, serta percepatan perubahan iklim yang dapat mengancam ketahanan ekonomi dan lingkungan daerah. Selain itu, pengurangan emisi GRK di Kabupaten Klaten juga diperlukan untuk mendukung pemerintah dalam mencapai target nasional yang disebutkan dalam Peraturan Presiden Nomor 98 Tahun 2021, yang menargetkan pengurangan emisi GRK sebesar 29% pada 2030 atau setara dengan 834 juta ton CO₂eq untuk seluruh sektor. Dengan demikian, Tugas Akhir ini berusaha melengkapi perencanaan mengenai strategi reduksi emisi GRK pada sektor energi, khususnya pada subsektor industri, transportasi, dan domestik di Kabupaten Klaten.

1.2 Identifikasi Masalah

Identifikasi masalah pada perencanaan tugas akhir ini meliputi:

1. Peningkatan aktivitas sektor energi yang mengakibatkan meningkatnya kebutuhan energi, sehingga dapat meningkatkan emisi GRK di Kabupaten Klaten
2. Peningkatan strategi pengendalian pencemaran udara di Kabupaten Klaten dalam sektor energi.
3. Mengkaji ulang pengendalian pencemaran udara, khususnya emisi GRK pada sektor energi di Kabupaten Klaten.

1.3 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada perencanaan tugas akhir ini meliputi:

1. Bagaimana hasil inventarisasi emisi GRK dan beban emisi setiap kecamatan dari sektor energi (industri, transportasi, dan domestik) di Kabupaten Klaten?
2. Bagaimana sebaran emisi GRK dari sektor energi (industri, transportasi, dan domestik) di Kabupaten Klaten?
3. Bagaimana strategi reduksi emisi GRK yang dapat diterapkan pada sektor energi (industri, transportasi, dan domestik) di Kabupaten Klaten?

1.4 Rumusan Tujuan

Rumusan tujuan pada perencanaan tugas akhir ini meliputi:

1. Menginventarisasi emisi GRK dan memetakan beban emisi tiap kecamatan dari sektor energi (industri, transportasi, dan domestik) di Kabupaten Klaten.
2. Membuat sebaran emisi GRK dari sektor energi (industri, transportasi, dan domestik) di Kabupaten Klaten.
3. Merancang usulan rencana strategi reduksi emisi GRK yang dapat diterapkan pada sektor energi (industri, transportasi, dan domestik) di Kabupaten Klaten.

1.5 Pembatasan Masalah

Batasan masalah pada perencanaan tugas akhir ini meliputi:

1. Perencanaan dilakukan pada cakupan wilayah administrasi Kabupaten Klaten.
2. Parameter emisi GRK yang diinventarisasikan adalah CO₂, N₂O, dan CH₄.
3. Sektor energi yang akan dilakukan perhitungan emisi gas rumah kaca terdapat pada subsektor industri, transportasi, dan domestik.
4. Inventarisasi emisi GRK pada subsektor industri dilakukan dengan menggunakan data jumlah bahan bakar serta tenaga kerja dari sumber titik, yakni industri yang terdaftar di Kabupaten Klaten.
5. Sumber emisi GRK yang diinventarisasikan pada sektor transportasi darat merupakan transportasi *on-road* dengan perhitungan emisi menggunakan metode *Vehicle Kilometer Travelled* (VKT).

6. Jenis transportasi *on-road* yang termasuk dalam inventarisasi emisi GRK pada subsektor transportasi yaitu sepeda motor, mobil penumpang, mobil bus, dan mobil barang.
7. Inventarisasi emisi GRK pada subsektor domestik dilakukan berdasarkan penggunaan bahan bakar untuk aktivitas memasak pada rumah tangga di Kabupaten Klaten.
8. Kegiatan dalam perhitungan inventarisasi emisi GRK berlangsung dengan tahun dasar 2019-2023.
9. Perhitungan inventarisasi emisi GRK dilakukan proyeksi hingga tahun 2033.

1.6 Rumusan Manfaat

Berdasarkan perencanaan yang akan dilakukan penulis, diperoleh beberapa manfaat sebagai berikut:

1. Bagi Penulis:
 - a. Memperoleh pengetahuan dan pemahaman terkait inventarisasi dan proyeksi emisi GRK di sektor energi.
 - b. Memperoleh pengetahuan dan pemahaman terkait perencanaan strategi reduksi emisi GRK di sektor energi.
2. Bagi IPTEK:
 - a. Perencanaan ini dapat menjadi referensi terkait perencanaan strategi untuk mereduksi emisi GRK dalam suatu wilayah serta menjadi landasan yang dapat dikembangkan lebih lanjut dalam penelitian selanjutnya.
 - b. Memberikan informasi pengaruh emisi GRK khususnya pada sektor energi dan pengaruhnya terhadap lingkungan.
3. Bagi Pemerintah:
 - a. Tersedianya profil inventarisasi emisi GRK khususnya dari sektor energi di Kabupaten Klaten.
 - b. Membantu Pemerintah Kabupaten Klaten dalam menentukan strategi reduksi emisi GRK pada sektor energi.

DAFTAR PUSTAKA

- Agustin, A. W., Sudarti, Yushardi, 2023. *Potensi Pemanfaatan Biogas dari Sampah Organik sebagai Sumber Energi Terbarukan*. INSOLOGI : Jurnal Sains dan Teknologi, 1109-1116.
- Alibaba, 2023. *Industrial Furnaces*. <https://www.alibaba.com/>. Akses Tanggal 24 Mei 2025
- Aryanta, W.R., Maharani, S.E., 2023. *Dampak Buruk Polusi Udara Bagi Kesehatan dan Cara Meminimalkan Risikonya*. Jurnal Ecocentrism. 3(2): 47-58.
- Badan Meteorologi, Klimatologi, Dan Geofisika (BMKG), 2024. *Catatan Iklim Dan Kualitas Udara Indonesia 2024*.
- Badan Standarisasi Nasional, 2012. *SNI 7826:2012 Unit Penghasil Biogas Dengan Tangki Pencerna (Digester) Tipe Kubah Tetap dari Beton*.
- Bedarkar, S.S., 2024. *Carbon Flow and CO₂ Emission in Induction Furnace Steelmaking*. Journal of Powder Metallurgy & Mining. 13(434).
- Bhattacharya, S., Abdulsalam, P., 2002. *Low Greenhouse Gas Biomass Options for Cooking in The Developing Countries*. Biomass Bioenergy 22(4): 305–317
- Borduas, N., Donahue, N.M., 2018. *The Natural Atmosphere, Green Chemistry: An Inclusive Approach*. Elsevier Inc.
- BPS Indonesia, 2020. *Peraturan Kepala Badan Pusat Statistik Nomor 120 Tahun 2020 Tentang Klasifikasi Desa Perkotaan dan Perdesaan di Indonesia 2020*.
- BPS Kabupaten Klaten, 2024. *Kabupaten Klaten Dalam Angka 2024*.
- BPS Kabupaten Klaten, 2023. *Kabupaten Klaten Dalam Angka 2023*.
- BPS Kabupaten Klaten, 2022. *Kabupaten Klaten Dalam Angka 2022*.
- BPS Kabupaten Klaten, 2021. *Kabupaten Klaten Dalam Angka 2021*.
- BPS Kabupaten Klaten, 2020. *Kabupaten Klaten Dalam Angka 2020*.
- BPS Provinsi Jawa Tengah, 2024. *Provinsi Jawa Tengah Dalam Angka 2024*.
- BPS Provinsi Jawa Tengah, 2023. *Provinsi Jawa Tengah Dalam Angka 2023*.
- BPS Provinsi Jawa Tengah, 2022. *Provinsi Jawa Tengah Dalam Angka 2022*.
- BPS Provinsi Jawa Tengah, 2021. *Provinsi Jawa Tengah Dalam Angka 2021*.
- BPS Provinsi Jawa Tengah, 2020. *Provinsi Jawa Tengah Dalam Angka 2020*.
- Budihardjo, M.A., Zaman, B., Rezagama, A., Kurnianto, N.T., Aulia, T., Ramadan, B.S., Fitria, S., Muhammad, F.I., 2020. *Potential Use of Biogas to Initiate Low Carbon Society in Thekelan Village-Indonesia*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 448(1).
- Cahyo, N., Triani, M., Sitanggang, R., Supriyanto, E., 2025. *Simulasi Karakteristik Co-Firing Sekam Padi pada PLTU Batubara Pulverized Coal Kapasitas 400 Mwe*. 24, 43–54.

- David, F.R., David, F.R., 2017. *Strategic Management: A Competitive Advanatege Approach, Concepts and Cases (Sixteenth Edition)*. Pearson Education Inc.
- Dewi, S.P., Alsakinah, R., Sara, S.A., Amrina, D.H., 2022. *Pajak Lingkungan Sebagai Upaya Pengendalian Pencemaran Udara dari Gas Buang Kendaraan Bermotor di Indonesia*. Jurnal Ilmiah Ekonomi dan Pajak. 2(1): 7-13.
- Filonchyk, M., Peterson, M.P., Zhang, L., Hurynovich, V., He, Y., 2024. *Greenhouse gases emissions and global climate change: Examining the influence of CO₂, CH₄, and N₂O*. Sci. Total Environ. 935.
- Foltran, F., 2016. *Standard Design Procedure For Low-Cost Biodigester Technologies: Design, Construction and Monitoring of A Tubular Digester in Puerto Matilde, Colombia*.
- Gao, Y., Lee, X., Liu, S., Hu, N., Wei, X., Hu, C., Liu, C., Zhang, Z., Yang, Y., 2018. *Spatiotemporal variability of the near-surface CO₂ concentration across an industrial-urban-rural transect, Nanjing, China*. Science of The Total Environment, 631–632, 1192–1200.
- Gould, C. F., Bejarano, M. L., De La Cuesta, B., Jack, D. W., Schlesinger, S. B., Valarezo, A., Burke, M., 2023. *Climate and health benefits of a transition from gas to electric cooking*. Proceedings of the National Academy of Sciences, 120(34).
- Groover, M.P., 2019. *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems, Seventh Ed.* ed. John Wiley & Sons, Inc.
- Haryanto, A., Cahyani, D., Triyono, S., Murdapa, F., Haryono, D., 2017. *Economic Benefit and Greenhouse Gas Emission Reduction Potential of A Family-Scale Cowdung Anaerobic Biogas Digester*. International Journal of Renewable Energy Development, 6(1), 29–36.
- Hasanuddin, M., Herdianto., 2023. *Sistem Monitoring dan Deteksi Dini Pencemaran Udara Berbasis Internet of Things (IoT)*. Journal of Computer System and Informatics. 4(4): 976-984.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., Thépaut, J-N., 2023. *ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present*. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). Accessed 25 Mar 2025
- Hettige, H., Martin, P., Singh, M., Wheeler, D., 1994. *IPPS: The Industrial Pollution Projection System, 1431st ed.* World Bank Publications.
- Huboyo, H. S., Manullang, O. R., Samadikun, B. P., 2022. *Identifying Concentration of Carbon Dioxide at Heights of 1.5 M and 15 M in Six Locations in Urban Areas*. Jurnal Riset Teknologi Pencegahan Pencemaran Industri, 13(2), 1–9.

- Ilham, M.F., Widodo, S., Suedy, A., 2025. *Pengaruh Co-Firing Menggunakan Sawdust Terhadap Nilai Heat Rate PLTU*. 3, 121–127.
- Im, H., Kim, Y., 2020. *The Electrification of Cooking Methods in Korea—Impact on Energy Use and Greenhouse Gas Emissions*. *Energies*, 13(3).
- Intergovernmental Panel On Climate Change (IPCC), 2023. *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (1st ed.)*.
- Irfan, A., Harkaneri, Rimet, Febria, D., 2023. *Memajukan Ekonomi melalui Pemanfaatan Biogas dari Kotoran Sapi di Desa Makmur Sejahtera (Advancing the Economy through Utilizing Biogas from Cow Manure in Makmur Sejahtera Village)*. *Yumary : Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat*, 125-136.
- Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC), 2019. *2019 Refinement To The 2006 IPCC Guidelines For National Greenhouse Gas Inventories*.
- Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC), 2006. *IPCC Guidelines For National Greenhouse Gas Inventories 2006*.
- IQAir, 2024. *World Air Quality Report: Region & City PM2.5 Ranking*.
- Jones, M.W., Peters, G.P., Gasser, T., Andrew, R.M., Schwingshackl, C., Gütschow, J., Houghton, R.A., Friedlingstein, P., Pongratz, J., Quéré, C. Le, 2023. *National contributions to climate change due to historical emissions of carbon dioxide, methane, and nitrous oxide since 1850*. 1–23.
- Jørgensen, P. J., 2009. *Biogas: Green Energy, 2nd edition*. PlanEnergi and Researcher for a Day
- Kanazawa, M., 2017. *Research Methods for Environmental Studies: A Social Science Approach, 1st ed*. Routledge.
- Kementrian ESDM, 2023. *Peraturan Menteri Energi Dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia Nomor 9 Tahun 2023 Tentang Perubahan Atas Peraturan Menteri Energi Dan Sumber Daya Mineral Nomor 16 Tahun 2020 Tentang Rencana Strategis Kementerian Energi Dan Sumber Daya Mineral Tahun 2020 – 2024*.
- Kementrian Lingkungan Hidup, 2013. *Pedoman Penyusunan Inventarisasi Emisi Pencemar Udara Di Perkotaan*.
- Kementrian Lingkungan Hidup, 2012. *Buku I Pedoman Umum: Pedoman Penyelenggaraan Inventarisasi Gas Rumah Kaca Nasional*.
- Kementrian Lingkungan Hidup, 2012. *Metodologi Penghitungan Tingkat Emisi Gas Rumah Kaca: Pengadaan dan Penggunaan Energi*. In: *Pedoman Penyelenggaraan Inventarisasi Gas Rumah Kaca Nasional*.

- Kirk-Davidoff, D., 2018. *The Greenhouse Effect, Aerosols, and Climate Change, Green Chemistry: An Inclusive Approach*. Elsevier Inc.
- Kusumaningrum, W., Wisnajaya, R., Ramadiantio, Y., Firrizqi, J., Adhiarahmawati, S., Pratama, K.A., 2024. *Climate Risk Management & Skneario Analysis Perbankan: Buku 1 Panduan Umum*. Departemen Pengaturan dan Pengembangan Perbankan Otoritas Jasa Keuangan.
- Loha, C., Chattopadhyay, H., Chatterjee, P., Majumdar, G., 2018. *Co-Firing of Biomass to Reduce CO2 Emission*. *Encycl. Renew. Sustain. Mater.*
- Mar, K.A., Unger, C., Walderdorff, L., Butler, T., 2022. *Beyond CO2 equivalence: The impacts of methane on climate, ecosystems, and health*. *Environ. Sci. Policy* 134, 127–136.
- McCurdy, J., Rhodes, E., 2023. *What drives greenhouse gas emissions? An international scoping review of academic studies in 2010–2019*. *Clim. Resil. Sustain.* 2, 6.
- Mohan, R. R., 2018. *Time series GHG emission estimates for residential, commercial, agriculture and fisheries sectors in India*. *Atmospheric Environment*.
- Müller, R., 2021. *The impact of the rise in atmospheric nitrous oxide on stratospheric ozone: This article belongs to Ambio's 50th Anniversary Collection*. Theme: Ozone Layer. *Ambio* 50, 35–39.
- NASA, 2024. *The Power Project*. <https://power.larc.nasa.gov/>. Akses Tanggal 25 Mar 2023.
- Mutiara, P.B., 2021. *Analisis Matriks IFAS dan EFAS PT Unilever Tbk Pada Pandemi Covid-19*. *Jurnal Bina Bangsa Ekonomika*. 14(2): 363-371.
- Pemerintah Kabupaten Klaten, 2024. *Rancangan Teknokratik Rencana Pembangunan Jangka Menengah Daerah (RPJMD) Kabupaten Klaten Tahun 2025 – 2029*. Badan Perencanaan Pembangunan, Riset dan Inovasi Daerah Kabupaten Klaten.
- Pemerintah Kabupaten Klaten, 2024. *Peraturan Daerah Kabupaten Klaten Nomor 14 Tahun 2024 tentang Rencana Pembangunan Jangka Panjang Daerah Tahun 2025 – 2045*.
- Pemerintah Kabupaten Klaten, 2021. *Peraturan Daerah Kabupaten Klaten Nomor 10 Tahun 2021 Tentang Rencana Tata Ruang Wilayah Kabupaten Klaten Tahun 2021 – 2041*.
- Pemerintah Provinsi Jawa Tengah, 2024. *Peraturan Daerah Provinsi Jawa Tengah Nomor 6 Tahun 2024 Tentang Rencana Pembangunan Jangka Panjang Daerah Tahun 2025 – 2045*.

- Pemerintah Provinsi Jawa Tengah, 2024. *Peraturan Daerah Provinsi Jawa Tengah Nomor 8 Tahun 2024 Tentang Rencana Tata Ruang Wilayah Provinsi Jawa Tengah Tahun 2024 – 2044*.
- Pemerintah Provinsi Jawa Tengah, 2021. *Peraturan Gubernur Jawa Tengah Nomor 29 Tahun 2021 Tentang Petunjuk Pelaksanaan Peraturan Daerah Provinsi Jawa Tengah Nomor 12 Tahun 2018 Tentang Rencana Umum Energi Daerah Provinsi Jawa Tengah*.
- Pemerintah Provinsi Jawa Tengah, 2018. *Peraturan Daerah Provinsi Jawa Tengah Nomor 12 Tahun 2018 Tentang Rencana Umum Energi Daerah Provinsi Jawa Tengah*.
- Pemerintah Provinsi Jawa Tengah, 2012. *Peraturan Gubernur Jawa Tengah Nomor 43 Tahun 2012 Tentang Rencana Aksi Daerah Penurunan Emisi Gas Rumah Kaca Provinsi Jawa Tengah Tahun 2010 – 2020*.
- Pemerintah Pusat, 2021. *Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 98 Tahun 2021 Tentang Penyelenggaraan Nilai Ekonomi Karbon Untuk Pencapaian Target Kontribusi Yang Ditetapkan Secara Nasional Dan Pengendalian Emisi Gas Rumah Kaca Dalam Pembangunan Nasional*.
- Pemerintah Pusat, 2021. *Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 Tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup*.
- Pemerintah Pusat, 2011. *Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 61 Tahun 2011 Tentang Rencana Aksi Nasional Penurunan Emisi Gas Rumah*.
- Prismulanda, S., 2022. *Analisis Prakiraan Kebutuhan Bahan Bakar Minyak Transportasi Darat dengan Skenario BAU serta Kajian Emisi CO₂ yang Dihasilkan*. Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau.
- Salva, J., Poništ, J., Rasulov, O., Schwarz, M., Vanek, M., Sečkář, M., 2023. *The impact of heating systems scenarios on air pollution at selected residential zone: a case study using AERMOD dispersion model*. Environ. Sci. Eur. 35, 1–17.
- Sartika, Y., Amar, S., 2020. *Pengaruh Perekonomian dan Jumlah Penduduk Terhadap Permintaan Bahan Bakar Minyak di Indonesia*. Jurnal Kajian Ekonomi dan Pembangunan, 2(4), 7–14.
- Setyono, A.E., Kiono, B.F.T., 2021. *Dari Energi Fosil Menuju Energi Terbarukan: Potret Kondisi Minyak dan Gas Bumi Indonesia Tahun 2020-2050*. Jurnal Energi Baru & Terbarukan. 2(3): 154-162.
- Sinaga, N., 2013. *Pelatihan Teknik Mengemudi Smart Driving untuk Menurunkan Emisi Gas Rumah Kaca dan Menekan Biaya Transportasi Angkutan Darat*. Proceeding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XII. Universitas Lampung. Bandar Lampung

- Smalley, R., Laureate, N., Roberts, P., Revolution, I., 2015. *Energy, economics, and climate change. In: Climate Change: A Wicked Problem*. Cambridge University Press, pp. 1–17.
- Suganal, Hudaya, G.K., 2019. *Bahan Bakar Co-Firing dari Batubara dan biomassa Tertorefaksi dalm Bentuk Briket (Skala Laboratorium)*. J. Teknol. Miner. dan Batubara 15, 31–48
- Suharyati, Pambudi, S.H., Wibowo, J.L., Pratiwi, N.I., 2019. *Indonesia Energy Outlook 2019*. Secretariat General National Energy Council.
- Sukamto, U., Anam, M.C., 2021. *Proses dan Analisis Kinerja Peleburan Menggunakan Dapur Induksi di PT M (Pengecoran Logam 7) Klaten*. J. Metall. Eng. Process. Technol. 47–53.
- Sunarti, Sunaryo, F.K., Prasetyo, B.E., Kurniadi, C.B., Setiadi, I., Rabbani, Q., Fajarwati, P.A., Hernawati, S., 2020. *Inventarisasi Emisi GRK Bidang Energi*. Pusat Data dan Teknologi Informasi Energi dan Sumber Daya Mineral Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.
- Tiandho, Y., Indriawati, A., Putri, A. K., Afriani, F., 2021. *Induction stoves: An option for clean and efficient cooking in Indonesia*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1034(1), 012068.
- Triani, M., Tanbar, F., Cahyo, N., Sitanggang, R., Sumiarsa, D., Utama, G.L., 2022. *The Potential Implementation of Biomass Co-firing with Coal in Power Plant on Emission and Economic Aspects : A Review*. J. Sci. Data Anal. 3, 83–94.
- United States Forces – Afghanistan, 2011. *Biogas Plant Construction Manual*.
- Xu, N., Li, X., Liu, Q., Zhao, D., 2021. *An Overview of Eco-Driving Theory, Capability Evaluation, and Training Applications: Review*. Sensors. 21, 6547.
- Yanela, L., María, D., Balmori, H.-, Max, A., 2015. *Design guide for biodigester treatment plant in cowshed housing*.
- Yang, M., Wang, E., Hou, Y., 2021. *The Relationship Between Manufacturing Growth and CO2 Emissions: Does Renewable Energy Consumption Matter?*. Energy 232, 121032
- Yoro, K.O., Daramola, M.O., 2020. *CO2 emission sources, greenhouse gases, and the global warming effect, Advances in Carbon Capture: Methods, Technologies and Applications*. Elsevier Inc.
- Yuliani, A.R., Sari, M.M., Suryawan, I.W.K., 2023. *Carbon Footprint Assessment of LPG Gas Usage in Small Industries: A Case Study of Sami Laris Swalayan Shopping Center*. Journal of Earth and Marine Technology, 3(2), 98–103.
- Zou, Y., Yang, T., 2019. *Rice Husk, Rice Husk Ash and Their Applications, Rice Bran and Rice Bran Oil*. Elsevier Inc., Shanghai.