

Carbon Footprint Optimization in The Palm Oil Industry

Wike Pratiwi^{1*}, Zulhalifah², Norma Juniati³

¹Politeknik Pertanian Negeri Samarinda, Kota Samarinda, Kalimantan Timur, Indonesia;

²Program Studi Magister Pendidikan IPA, Pascasarjana Universitas Mataram, Kota Mataram, Nusa Tenggara Barat, Indonesia;

³Program Studi Tadris IPA Biologi, Universitas Islam Negeri Mataram, Kota Mataram, Nusa Tenggara Barat, Indonesia;

Article History

Received : April 18th, 2026

Revised : April 27th, 2026

Accepted : April 28th, 2026

*Corresponding Author: **Wike Pratiwi**, Politeknik Pertanian Negeri Samarinda, Kota Samarinda, Kalimantan Timur, Indonesia;
Email: wikepratiwi72@gmail.com

Abstract: This optimization can be done through the application of carbon accounting methods, the use of renewable energy, efficient waste management, and low-emission technology innovation. This study aims to analyze the main sources of greenhouse gas (GHG) emissions and formulate a carbon footprint optimization model in the palm oil industry at PT X. The method used is a descriptive quantitative approach with optimization simulation based on methane capture on liquid waste (POME). The results show that POME is the largest emission contributor (45%), followed by fertilizer (30%), fuel (20%), and electricity (5%). The application of methane capture technology can reduce emissions from 16,400 tons of CO₂e/year to 3,280 tons of CO₂e/year or by 80%. Cost analysis shows a carbon cost of IDR 305,000 per ton of CO₂e and can be reduced to IDR 155,000 per ton of CO₂e with the presence of carbon credits. These results indicate that methane capture is an effective and efficient optimization strategy in reducing carbon emissions in the palm oil industry. In conclusion, the largest source of carbon emissions at PT X comes from POME liquid waste, making it a top priority in the mitigation strategy. The implementation of methane capture has proven effective in reducing emissions by 80%, or 13,120 tons of CO₂e per year.

Keywords: Carbon footprint; Carbon cost; Methane capture; POME; Palm oil industry.

Pendahuluan

Sektor perkebunan kelapa sawit menghasilkan sekitar 3,5% terhadap Produk Domestik Bruto (PDB) dan menjadi penyumbang devisa ekspor non-migas terbesar (Ghazouani *et al.*, 2020). Namun, di tengah performa ekonomi yang gemilang, industri ini menghadapi tantangan eksistensial berupa tekanan dekarbonisasi global (Saputra *et al.*, 2023). Sebagai salah satu produsen terbesar dunia, aktivitas industri kelapa sawit di Indonesia mulai dari hulu hingga hilir memberikan kontribusi signifikan terhadap emisi Gas Rumah Kaca (GRK) (Callan *et al.*, 2009). Hal ini menciptakan urgensi untuk menyelaraskan profitabilitas dengan tanggung jawab ekologis melalui analisis jejak karbon.

Jejak karbon dalam industri ini bersifat

multidimensi. Sumber emisi utama berasal dari perubahan penggunaan lahan terutama pada lahan gambut yang memiliki cadangan karbon tinggi (Callan *et al.*, 2009; Chen & Nie, 2016). Selain itu, fase operasional di pabrik kelapa sawit memberikan kontribusi besar melalui emisi metana dari limbah cair pabrik kelapa sawit (POME) yang memiliki potensi pemanasan global 28 kali lebih kuat (Metcalf & Weisbach, 2009). Tanpa adanya strategi mitigasi yang terukur, akumulasi emisi dari penggunaan pupuk nitrogen dan mekanisasi perkebunan akan terus memperlebar celah antara target *Net Zero Emission* (NZE) Indonesia 2060 dengan realitas di lapangan. Implementasi kebijakan internasional, seperti European Union Deforestation Regulation (EUDR) dan penguatan standar ISPO (*Indonesian Sustainable Palm Oil*) serta RSPO, menuntut transparansi

penyumbang atas jejak karbon produk.

Produk kelapa sawit yang tidak mampu membuktikan rendahnya intensitas karbon akan kehilangan daya saing di pasar global (Erdogan, 2024; Lin & Li, 2011). Oleh karena itu, penghitungan jejak karbon bukan lagi sekadar laporan keberlanjutan opsional, melainkan instrumen strategis untuk mempertahankan akses pasar global dan meningkatkan nilai tawar komoditas. Optimisasi ini dapat dilakukan melalui penerapan metode akuntansi karbon, penggunaan energi terbarukan, pengelolaan limbah yang efisien, dan inovasi teknologi rendah emisi. Analisis optimisasi jejak karbon bukan hanya memberikan solusi teknis, tetapi juga menjadi dasar pengambilan keputusan strategis bagi pelaku industri dan pembuat kebijakan (Balsalobre-Lorente *et al.*, 2024; Ozkan *et al.*, 2024).

Urgensi dalam penelitian ini dimana belum adanya data terkait sumber utama penyumbang emisi gas rumah kaca pada industri perkebunan kelapa sawit di PT X. selain itu, perlu optimisasi yang dapat diterapkan untuk menurunkan jejak karbon. Serta, berapa biaya untuk pengurangan emisi karbon. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis sumber utama emisi gas rumah kaca (GRK) serta merumuskan model optimisasi jejak karbon pada industri kelapa sawit di PT X.

Bahan dan Metode

Jenis penelitian

Jenis penelitian ini adalah kuantitatif deskriptif dan simulasi optimisasi. Pendekatan kuantitatif digunakan untuk mengukur emisi secara numerik, sedangkan simulasi digunakan untuk skenario optimisasi pengurangan emisi.

Teknik pengumpulan data

Data pada penelitian ini diperoleh melalui data primer dan data sekunder. Data primer terdiri dari 1) wawancara terstruktur dengan manajer operasional, lingkungan, dan teknisi pabrik; dan 2) observasi langsung proses produksi di kebun dan pabrik kelapa sawit. Sedangkan, data sekunder terdiri dari 1) Laporan emisi dan lingkungan perusahaan; 2) Data produksi tandan buah segar (TBS), pemakaian bahan bakar, energi listrik, pupuk, dan air; 3) Dokumen RSPO, ISPO, dan laporan

keberlanjutan; dan 4) Literatur dan pedoman IPCC untuk konversi emisi (Emission Factor).

Analisis data

Optimisasi Emisi Karbon

Untuk menghitung keberhasilan penangkapan metana (*Methane Capture*) dan dampaknya terhadap pengurangan emisi GRK di Pabrik Kelapa Sawit (PKS) didasarkan pada prinsip keseimbangan massa karbon. Fokus utamanya adalah menghitung berapa banyak gas metana yang berhasil ditangkap dari kolam limbah cair (POME) dan dialihkan (misalnya, dibakar habis/*flaring* atau digunakan untuk energi), dibandingkan dengan jumlah metana yang *seharusnya* terlepas ke atmosfer jika tidak ditangkap (Effendi dan Windiarko, 2023; Irwhantoko dan Basuki, 2016). Rumus ini menghitung total emisi yang gagal dilepaskan ke atmosfer karena adanya sistem penangkapan metana pada persamaan 1.

$$CH_4 = VS \times B_0 \times MCF \times 0.67 \quad (1)$$

Keterangan:

CH_4 = emisi metana (kg CH_4)

VS = volatile solids (kg bahan organik)

B_0 = kapasitas produksi metana maksimum ($m^3 CH_4/kg VS$)

MCF = methane correction factor (%)

0.67 = konversi $m^3 CH_4 \rightarrow kg CH_4$

Konversi ke CO_2e

$$CO_2e = CH_4 \times GWP_{CH_4} \quad (2)$$

Keterangan:

$$GWP_{CH_4} = 28 \text{ (IPCC terbaru)}$$

Rumus Methane Capture

$$Emisi_{setelah} = Emisi_{baseline} \times (1 - Efisiensi_{capture}) \quad (3)$$

Jika Efisiensi 80%

$$Emisi_{setelah} = Emisi_{baseline} \times 0.2 \quad (4)$$

Analisis biaya atas pengurangan emisi karbon
Model Carbon Cost (Biaya per Ton CO_2e)

$$\text{Carbon Cost} = \frac{\text{Total Biaya Investasi}}{\text{Total Penurunan Emisi (ton CO}_2\text{e)}} \quad (5)$$

Hasil dan Pembahasan

Penelitian ini dilakukan pada PT X industri perkebunan kelapa sawit yang berada di Kalimantan Timur tepatnya di kota Samarinda dengan luas lahan 12.000 hektar. Berdasarkan rumusan masalah dan pengujian data didapatkan hasil berikut ini:

Pengolahan Limbah Cair (POME) - Scope 1

Volume limbah cair (POME) yang dihasilkan pada PT X mencapai 1.200 - 1.600 ton per bulan. dengan presentase 45% dan menjadi penyebab utama emisi karbon pada PT X. Hal tersebut dapat terjadi dikarenakan POME yang diolah di kolam terbuka (*Anaerobic Pond*) menghasilkan gas metana yang memiliki potensi pemanasan global 28 kali lebih kuat (Amaliyah *et al.*, 2019; Luo *et al.*, 2013; Ahmadi dan Bouri, 2017).

Penggunaan Pupuk (Fertilizer) Scope 1

Penggunaan pupuk (seperti Urea, NPK, atau jenis mineral lainnya) pada PT X memiliki presentase 30% emisi karbon dan mejadi penghasil emisi karbon ke dua. Hal tersebut dikarenakan pupuk nitrogen melepaskan *Dinitrogen Oksida* ke atmosfer saat diaplikasikan ke tanah sehingga memiliki dampak pemanasan hampir 300 kali lipat lebih kuat dari karbon dioksida. Walaupun volumenya tidak sebesar POME tetapi efek gas dari penguraian pupuk sangat kuat (Effendi, 2023; Irwhantoko dan Basuki, 2016).

Konsumsi Bahan Bakar (Mobile & Stationary Combustion) - Scope 1

Data mencatat penggunaan solar untuk kendaraan operasional, alat berat, dan genset memiliki presentase 20% dan menjadi menyebabkan emisi karbon ke tiga di PT X. Hal tersebut dapat terjadi karena pembakaran bahan bakar fosil menghasilkan emisi langsung. Semakin jauh jarak angkut TBS (Tandan Buah Segar) ke pabrik, semakin tinggi emisi dari kategori ini (Ahmadi dan Bouri, 2017; Alhazaimah *et al.*, 2014).

Penggunaan Listrik (Electricity) - Scope 2

Data konsumsi listrik dari PLN atau pihak eksternal pada PT X didapatkan hasil 5% . Hal tersebut terjadi karena. Emisi ini berasal dari pembangkit listrik yang menyuplai energi ke kantor atau perumahan karyawan. Nilainya biasanya lebih kecil dibandingkan emisi operasional kebun jika perusahaan sudah menggunakan *biomass*(cangkang/serabut) sebagai bahan bakar utama pabrik (Amaliyah & Solikhah, 2019; Liesen *et al.*, 2017; Faisal *et al.*, 2018).

Berdasarkan hasil pengolahan data, sumber emisi karbon terbesar pada PT. X berasal dari limbah cair (POME) dengan kontribusi sebesar 45%. Tingginya kontribusi ini disebabkan oleh volume limbah yang besar serta proses dekomposisi anaerob yang menghasilkan gas metana (CH₄) dengan potensi pemanasan global yang tinggi. Selanjutnya, emisi dari pemupukan menyumbang sebesar 30%, yang berasal dari emisi dinitrogen oksida (N₂O) akibat penggunaan pupuk nitrogen. Emisi dari bahan bakar alat berat berada pada urutan ketiga sebesar 20%, sedangkan penggunaan listrik dan aktivitas domestik memberikan kontribusi paling kecil yaitu 5%. Hasil ini menunjukkan bahwa fokus utama strategi mitigasi emisi karbon sebaiknya diarahkan pada pengelolaan limbah cair dan efisiensi pemupukan.

Otimisasi yang dapat diterapkan untuk menurunkan jejak karbon

Optimisasi yang digunakan pada penelitian ini berkonsentrasi pada limbah cair POME dimana menghasilkan 45% penyumbang emisi karbon. Skenario yang digunakan menggunakan skenario "Methane Capture". Dengan berinvestasi pada sistem penangkapan metana untuk kolam POME, PT X dapat mengurangi jejak karbon perusahaan secara substansial tanpa mengganggu target produksi CPO (Faisal *et al.*, 2018; Stanny dan Ely, 2008). Hal ini tidak hanya memberikan manfaat lingkungan, tetapi juga dapat meningkatkan citra perusahaan sebagai perusahaan yang berkelanjutan. Berdasarkan data produksi TBS bulanan dari file "Tbs Inti-Eksternal.csv", saya telah menghitung potensi pengurangan emisi gas rumah kaca (GRK) dari limbah cair (POME) dengan menerapkan skenario "Methane Capture". Asumsi yang digunakan dalam perhitungan ini adalah:

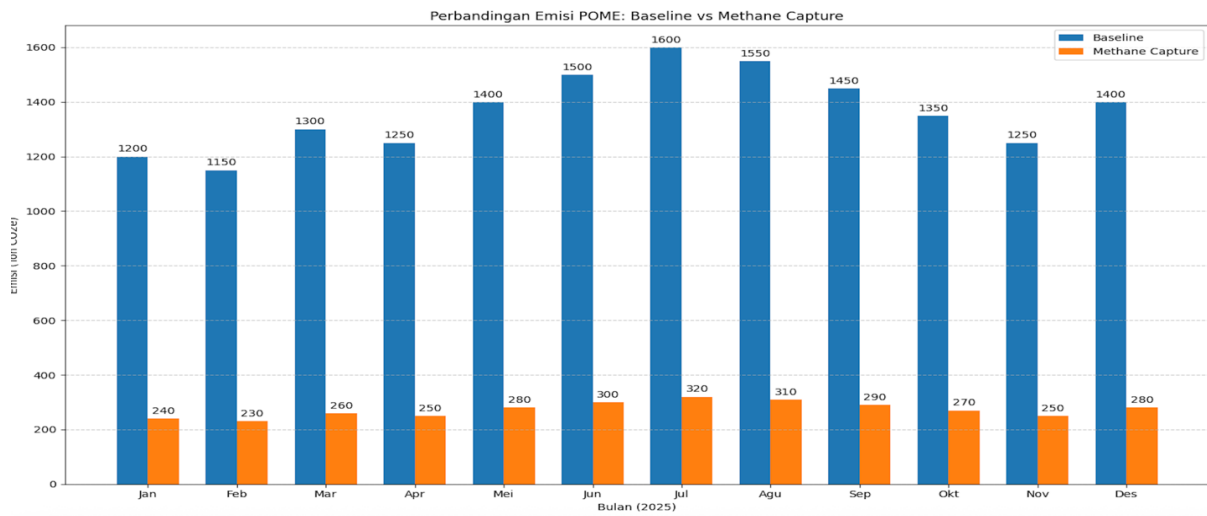
- Rasio POME: 0.65 POME per ton TBS (berdasarkan rata-rata industri).
- Faktor Emisi POME *Baseline*: 18.06 kg / POME (berdasarkan standar RSPO untuk kolam anaerobik tanpa penangkapan metana).

Faktor Emisi POME *Methane Capture*: 3.612 kg/POME (asumsi pengurangan 80% dengan penangkapan metana).

Hasil Uji Metana Capture

Hasil analisis menunjukkan bahwa emisi gas rumah kaca dari limbah cair kelapa sawit (POME) pada kondisi baseline berada pada

kisaran 1.150–1.600 ton CO₂e per bulan dengan total tahunan sebesar 16.400 ton CO₂e. Setelah penerapan teknologi methane capture, emisi berhasil ditekan secara signifikan menjadi 230–320 ton CO₂e per bulan atau total 3.280 ton CO₂e per tahun. Penurunan emisi sebesar 13.120 ton CO₂e atau 80% menunjukkan efektivitas yang sangat tinggi dari teknologi methane capture dalam mengendalikan emisi metana dari POME. Pola penurunan yang konsisten di seluruh periode menunjukkan bahwa model reduksi bersifat stabil dan tidak dipengaruhi oleh fluktuasi produksi. Dengan demikian, pengolahan POME berbasis biogas dapat dikategorikan sebagai strategi mitigasi emisi paling optimal dalam industri kelapa sawit.



Gambar 1. Hasil optimisasi menggunakan metana capture

Biaya atas pengurangan emisi karbon

Diketahui : hasil pengolahan efisiensi emisi karbon

- Total emisi baseline = 16.400 ton CO₂e/tahun
- Total emisi setelah methane capture = 3.280 ton CO₂e/tahun
- Total reduksi emisi = 13.120 ton CO₂e/tahun
- Efisiensi reduksi = 80%

Asumsi harga karbon:

- Rp 150.000 / ton CO₂e
- $$\text{Pendapatan} = 13.120 \times 150.000 = 1.968.000.000$$

Net Carbon Cost

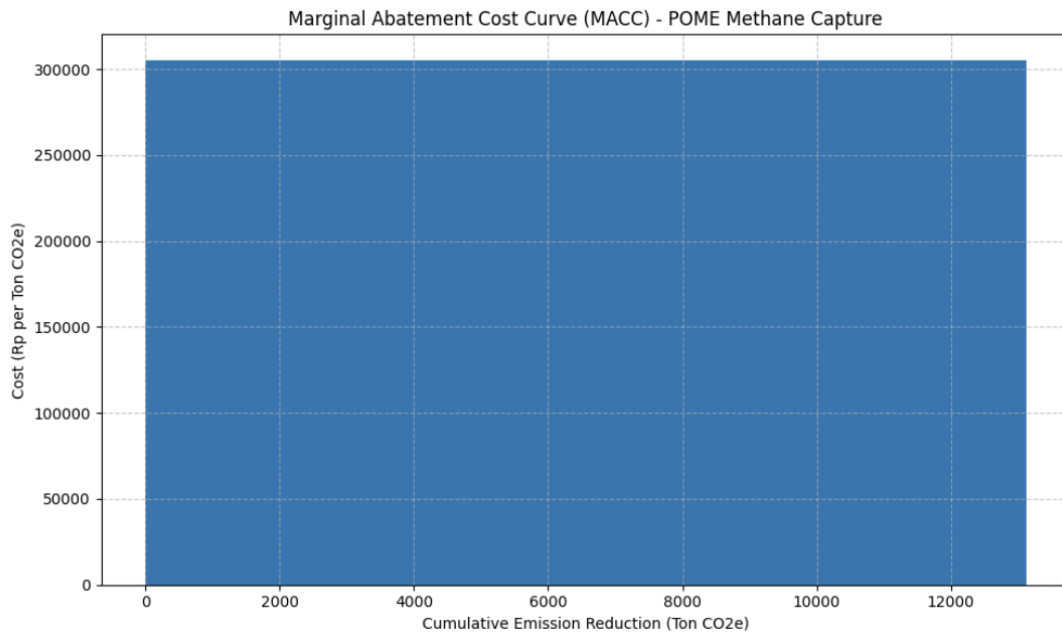
$$\begin{aligned} \text{Net Cost} &= 4.000.000.000 - 1.968.000.000 \\ &= 2.032.000.000 \\ \text{Carbon Cost} &= \frac{2.032.000.000}{13.120} = 155.000 \end{aligned}$$

Turun menjadi ± Rp 155.000 / ton CO₂e

Analisis menunjukkan bahwa biaya efisiensi karbon dari implementasi methane capture pada limbah POME sebesar Rp 305.000 per ton CO₂e. Nilai ini diperoleh dari total biaya tahunan sebesar Rp 4 miliar terhadap reduksi emisi sebesar 13.120 ton CO₂e per tahun. Dalam skenario adanya insentif berupa carbon credit, biaya efisiensi karbon dapat ditekan hingga Rp 155.000 per ton CO₂e, sehingga meningkatkan kelayakan ekonomi proyek. Hal ini menunjukkan bahwa teknologi methane capture tidak hanya

efektif dalam menurunkan emisi secara signifikan (80%) (Stanny dan Ely, 2008; Lee *et al.*, 2015), tetapi juga cukup efisien secara biaya,

terutama dalam kerangka kebijakan ekonomi karbon.



Gambar 2. Biaya efisiensi karbon dari implementasi methane capture pada limbah POME

Kurva Marginal Abatement Cost (MACC) menunjukkan bahwa teknologi methane capture pada limbah POME memiliki potensi pengurangan emisi sebesar 13.120 ton CO₂e per tahun dengan biaya mitigasi sebesar Rp 305.000 per ton CO₂e. Posisi teknologi ini dalam kurva menunjukkan karakteristik high abatement potential dengan biaya menengah, sehingga termasuk dalam kategori opsi mitigasi yang cost-effective. Dengan kontribusi pengurangan emisi yang signifikan, methane capture menjadi prioritas utama dalam strategi optimisasi jejak karbon industri kelapa sawit.

Kesimpulan

Sumber emisi karbon terbesar pada PT X berasal dari limbah cair POME (45%), sehingga menjadi prioritas utama dalam strategi mitigasi. Penerapan methane capture terbukti efektif menurunkan emisi sebesar 80% atau 13.120 ton CO₂e per tahun. Biaya efisiensi karbon sebesar Rp 305.000/ton CO₂e menunjukkan bahwa teknologi ini cukup ekonomis, dan menjadi lebih layak dengan adanya insentif carbon credit. Secara keseluruhan, methane capture merupakan

solusi optimal yang mampu menyeimbangkan aspek lingkungan dan ekonomi dalam industri kelapa sawit

Ucapan Terima kasih

Terima kasih kepada Politeknik Pertanian Negeri Samarinda yang telah memfasilitasi penulis dalam menyelesaikan artikel ini.

Referensi

- Ahmadi, A., & Bouri, A. (2017). The relationship between financial attributes, environmental performance and environmental disclosure: Empirical investigation on French firms listed on CAC 40. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 28(4), 490-506. 10.1108/MEQ-07-2015-0132.
- Alhazaimah, A., Palaniappan, R., & Almsafir, M. (2014). The impact of corporate governance and ownership structure on voluntary disclosure in

- annual reports among listed Jordanian companies. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 129, 341-348. 10.1016/J.SBSPRO.2014.03.686.
- Amaliyah, I., & Solikhah, B. (2019). Pengaruh kinerja lingkungan dan karakteristik corporate governance terhadap pengungkapan emisi karbon. *Journal of Economic, Management, Accounting and Technology*, 2(2), 129-141. 10.32500/JEMATECH.V2I2.720.
- Amaliyah, I., & Solikhah, B. (2019). Pengaruh kinerja lingkungan dan karakteristik corporate governance terhadap pengungkapan emisi karbon. *Journal of Economic, Management, Accounting and Technology*, 2(2), 129-141. <https://ojs.unsiq.ac.id/index.php/jematech/article/view/720>
- Balsalobre-Lorente, D., Shah, S. A. R., & Huseynova, R. (2024). Do circular economy, public-private Partnership and carbon policy manage the environmental stress? Developed countries' situation under the Prism of COP27. *Heliyon*, 10(13). 10.1016/j.heliyon.2024.e33532.
- Callan, T., Lyons, S., Scott, S., Tol, R. S., & Verde, S. (2009). The distributional implications of a carbon tax in Ireland. *Energy Policy*, 37(2), 407-412. 10.1016/J.ENPOL.2008.08.034.
- Chen, Z. Y., & Nie, P. Y. (2016). Effects of carbon tax on social welfare: A case study of China. *Applied energy*, 183, 1607-1615. 10.1016/J.APENERGY.2016.09.111.
- Effendi, B. E. (2023). Kesiapan Bank Syariah dalam Menghadapi Resesi 2023. *Jurnal Ilmiah Ekonomi Islam*, 9(1), 637-645. 10.29040/jiei.v9i1.8015.
- Erdogan, S. (2024). Linking green fiscal policy, energy, economic growth, population dynamics, and environmental degradation: Empirical evidence from Germany. *Energy Policy*, 189, 114110. 10.1016/j.enpol.2024.114110.
- Faisal, F., Andiningtyas, E. D., Achmad, T., Haryanto, H., & Meiranto, W. (2018). The content and determinants of greenhouse gas emission disclosure: Evidence from Indonesian companies. *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*, 25(6), 1397-1406. 10.1002/CSR.1660.
- Ghazouani, A., Xia, W., Ben Jebli, M., & Shahzad, U. (2020). Exploring the role of carbon taxation policies on CO2 emissions: contextual evidence from tax implementation and non-implementation European Countries. *Sustainability*, 12(20), 8680. 10.3390/SU12208680.
- Irwhantoko, I., & Basuki, B. (2016). Carbon emission disclosure: Studi pada perusahaan manufaktur Indonesia. *Jurnal akuntansi dan Keuangan*, 18(2), 92-104. 10.9744/JAK.18.2.92-104.
- Lee, S. Y., Park, Y. S., & Klassen, R. D. (2015). Market responses to firms' voluntary climate change information disclosure and carbon communication. *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*, 22(1), 1-12. 10.1002/CSR.1321.
- Liesen, A., Figge, F., Hoepner, A., & Patten, D. M. (2017). Climate change and asset prices: are corporate carbon disclosure and performance priced appropriately?. *Journal of Business Finance & Accounting*, 44(1-2), 35-62. 10.1111/JBFA.12217.
- Lin, B., & Li, X. (2011). The effect of carbon tax on per capita CO2 emissions. *Energy policy*, 39(9), 5137-5146. 10.1016/J.ENPOL.2011.05.050.

- Luo, L., Tang, Q., & Lan, Y. C. (2013). Comparison of propensity for carbon disclosure between developing and developed countries: A resource constraint perspective. *Accounting Research Journal*, 26(1), 6-34. 10.1108/ARJ-04-2012-0024.
- Metcalf, G. E., & Weisbach, D. (2009). The design of a carbon tax. *Harv. Envtl. L. Rev.*, 33, 499. <https://heinonline.org/HOL/Page?handle=hein.journals/helr33&id=503&div=&collection=>
- Ozkan, O., Adebayo, T. S., & Usman, O. (2024). Dynamic connectedness of clean energy markets, green markets, and sustainable markets: The role of climate policy uncertainty. *Energy*, 303, 131957. 10.1016/j.energy.2024.131957.
- Saputra, K. A. K., Dharmawan, N. A. S., Kawisana, P. G. W. P., & Larasdiputra, G. D. (2023). Potential carbon tax in Indonesia: A literature review. *International Journal of Environmental, Sustainability, and Social Science*, 4(6), 1670-1677. 10.38142/IJESS.V4I6.891.
- Serda, M. (2013). Synteza i aktywność biologiczna nowych analogów tiosemikarbazonowych chelatorów żelaza. *Uniwersytet śląski*, vol. 7, no. 1, pp. 343–354, 2013, doi: 10.2/JQUERY.MIN.JS.
- Stanny, E., & Ely, K. (2008). Corporate environmental disclosures about the effects of climate change. *Corporate social responsibility and environmental management*, 15(6), 338-348. 10.1002/CSR.175.