

Simulasi Efek Rumah Kaca dalam Skala Laboratorium: Analisis Kenaikan Suhu Menggunakan MATLAB

Tesalonika Yakomina Gahansa¹⁾, Kamaruddin²⁾*, Jeane Cornelda Rende³⁾, Patricia Mardiana Silangen⁴⁾, Treesje Katrina Londa⁵⁾

^{1,3}Program Studi Pendidikan Fisika, Universitas Negeri Manado, Kabupaten Minahasa, 95618, Indonesia

^{2,4}Program Studi Fisika, Universitas Negeri Manado, Kabupaten Minahasa, 95618, Indonesia

⁵Program Studi Ilmu Lingkungan, Universitas Negeri Manado, Kabupaten Minahasa, 95618, Indonesia

*Corresponding author. E-mail: kamaruddin@unima.ac.id

Diterima 24 April 2025; Disetujui 29 April 2025

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mensimulasikan dan menganalisis kenaikan suhu akibat efek rumah kaca melalui eksperimen sederhana dan pemodelan numerik berbasis MATLAB. Dua sistem, yaitu toples kaca tertutup (simulasi atmosfer dengan efek rumah kaca) dan toples terbuka (kontrol), dipapar sinar matahari selama 30 menit dengan suhu dicatat setiap interval 5 menit. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa toples tertutup mengalami kenaikan suhu lebih tinggi (24°C ke 28,5°C) dibandingkan toples terbuka (24°C ke 28°C), membuktikan terjadinya pemerangkapan panas. Data dianalisis menggunakan MATLAB dengan Curve Fitting Toolbox untuk pemodelan regresi dan visualisasi grafik. Simulasi numerik menunjukkan konsistensi dengan data eksperimen, mengonfirmasi akurasi model dalam memprediksi tren kenaikan suhu. Penelitian ini menyimpulkan bahwa MATLAB efektif sebagai alat komputasi untuk simulasi fenomena fisika terkait pemanasan global, sekaligus menegaskan urgensi mitigasi dampak lingkungan. Temuan ini dapat menjadi dasar pengembangan praktikum fisika terapan atau model iklim skala laboratorium

Kata kunci : Efek rumah kaca, MATLAB, pemodelan numerik, kenaikan suhu, fisika terapan

ABSTRACT

This study aims to simulate and analyze temperature rise due to the greenhouse effect through a simple experiment and numerical modeling using MATLAB. Two systems—a sealed glass jar (simulating a greenhouse gas-trapping atmosphere) and an open jar (control)—were exposed to sunlight for 30 minutes, with temperature recorded at 5-minute intervals. Experimental results showed that the sealed jar experienced a higher temperature increase (24°C to 28.5°C) compared to the open jar (24°C to 28°C), demonstrating heat-trapping. Data were analyzed using MATLAB's Curve Fitting Toolbox for regression modeling and graphical visualization. Numerical simulations exhibited strong consistency with experimental data, confirming the model's accuracy in predicting temperature trends. The study concludes that MATLAB is an effective computational tool for simulating physics phenomena related to global warming while highlighting the urgency of environmental mitigation. These findings can serve as a foundation for developing applied physics experiments or small-scale climate models.

Keywords : Greenhouse effect, MATLAB, numerical modeling, temperature rise, applied physics

1. PENDAHULUAN

Pemanasan global saat ini merupakan salah satu tantangan lingkungan yang paling besar dihadapi dunia, ditandai dengan peningkatan suhu rata-rata Bumi yang terjadi di atmosfer, laut, dan daratan. Peningkatan ini sebagian besar disebabkan oleh konsentrasi gas rumah kaca, khususnya karbon dioksida (CO₂), metana (CH₄), dan nitrogen oksida (N₂O), yang meningkat akibat aktivitas manusia seperti pembakaran bahan bakar fosil, deforestasi, dan industrialisasi (Ardiansyah & Permadi, 2022). Dampak dari pemanasan global ini sangat nyata, terlihat dari mencairnya es di kutub,

naiknya permukaan laut, serta meningkatnya frekuensi dan intensitas cuaca ekstrem (Ainurrohman & Sudarti, 2022).

Untuk memahami efek rumah kaca secara lebih komprehensif, tidak hanya teori yang dibutuhkan tetapi juga eksperimen praktis dan pemodelan komputasi. Eksperimen sederhana, seperti penggunaan toples kaca untuk menunjukkan perbedaan suhu pada sistem tertutup dan terbuka, dapat menjadi alat bantu yang efektif (Khumaira, 2024). Pendekatan berbasis komputer, seperti penggunaan perangkat lunak MATLAB, juga terbukti mampu memberikan visualisasi yang lebih baik

serta perhitungan yang akurat terkait pemodelan transfer panas (Muhyiddin et al., 2023). Beberapa penelitian yang telah menggunakan pemrograman MATLAB untuk konversi suhu dalam pembelajaran fisika (Wahyuni & Suharmanto, 2022), komparasi numerik dan analitik dalam konduktivitas termal (Rifa'i et al., 2023), dan memprediksi perubahan suhu secara lebih tepat (Shaumi et al., 2024).

Pemahaman tentang perubahan iklim atau efek rumah kaca dari beragam sudut pandang tentu perlu dilakukan, seperti mengembangkan model dalam memprediksi cuaca menggunakan pemrograman MATLAB (Megalina, 2014), mengintegrasikannya dalam pembelajaran fisika komputasi (Kamaruddin & Silangen, 2025), termasuk sebagai upaya dalam meningkatkan pemahaman siswa sejak dini (Londa & Kamaruddin, 2023). Namun, penelitian yang secara langsung menggabungkan eksperimen sederhana dengan analisis komputasi menggunakan MATLAB masih tergolong sedikit. Penelitian ini berusaha untuk menjembatani kesenjangan tersebut dengan mengintegrasikan kedua pendekatan ini untuk mensimulasikan efek rumah kaca agar lebih mudah dipahami.

Penelitian ini bertujuan untuk mensimulasikan efek rumah kaca melalui eksperimen sederhana, menganalisis perubahan suhu dengan bantuan MATLAB, dan menyajikan hasilnya dalam bentuk visualisasi yang menarik dan informatif. Diharapkan, hasil dari penelitian ini tidak hanya memberi kontribusi pada pengembangan metode komputasi dalam studi fisika lingkungan, tetapi juga bisa menjadi bahan ajar praktikum yang aplikatif, serta mendorong kesadaran akan pentingnya upaya mitigasi perubahan iklim melalui pendekatan ilmiah yang mudah diakses.

2. KAJIAN LITERATUR

Pemanasan global merupakan fenomena yang semakin mendesak untuk ditangani, berdasarkan peningkatan konsentrasi gas rumah kaca (GRK) di atmosfer. Proses pemanasan ini terjadi ketika radiasi matahari terperangkap oleh gas-gas tersebut, yang tidak sepenuhnya dipantulkan kembali ke luar angkasa (Leu, 2021). Menurut laporan IPCC 2021, peningkatan gas rumah kaca disebabkan oleh aktivitas manusia yang berkontribusi

signifikan terhadap perubahan iklim (Ketaren, 2023; Leu, 2021).

Di sisi lain, penelitian mutakhir menunjukkan bahwa pemodelan numerik berperan penting dalam memperkirakan dampak pemanasan global. Beberapa peneliti telah menggunakan metode simulasi finite difference yang mencapai tingkat akurasi yang signifikan, memberikan pandangan yang lebih akurat tentang perubahan suhu akibat GRK (Ketaren, 2023). Sementara itu, efektivitas perangkat lunak MATLAB dalam pemodelan suhu dan analisis data lingkungan memiliki fitur seperti *Curve Fitting Toolbox* untuk regresi dan penyelesaian persamaan diferensial parsial klasik menjadi alat yang sangat diperlukan untuk menganalisis dan memvisualisasikan hasil eksperimen (Ketaren, 2023; Praptyanti et al., 2022).

Meskipun berbagai simulasi dan eksperimen telah dilakukan, pendekatan yang menggabungkan eksperimen fisik dengan analisis numerik kadang kala kurang dieksplorasi. Sebelumnya, peneliti lain telah mengembangkan eksperimen yang menggabungkan pemodelan Python, meskipun hasil visualisasi masih terbatas (Ketaren, 2023)n, 2023). Hal ini membuka peluang penelitian baru yang mengintegrasikan rancangan eksperimen yang bisa direplikasi dengan analisis berbasis MATLAB untuk meningkatkan akurasi validasi antara data eksperimen dan model simulasi (Ketaren, 2023; Praptyanti et al., 2022).

Berdasarkan penelitian sebelumnya, ditemukan bahwa ada kekurangan yang perlu diisi dalam integrasi eksperimen sederhana dengan pemodelan numerik yang presisi. Penelitian ini berusaha untuk mengisi kekosongan tersebut dengan menyediakan paket kode MATLAB yang dapat digunakan kembali, baik untuk penelitian maupun pendidikan. Selain itu, diharapkan hipotesis yang diajukan—bahwa sistem tertutup menunjukkan peningkatan suhu signifikan dibandingkan sistem terbuka—dapat divalidasi dengan model transfer panas berbasis MATLAB (Praptyanti et al., 2022).

Dengan demikian, kesimpulan dari berbagai penelitian menunjukkan bahwa eksperimen laboratorium, pemodelan numerik, dan teknik analisis yang tepat, seperti yang tersedia dalam MATLAB, merupakan kombinasi yang tangguh dalam memahami dan mengatasi pemanasan global yang disebabkan

oleh gas rumah kaca (Ketaren, 2023; Leu, 2021). Selain itu, kemampuan MATLAB dalam menyajikan visualisasi 3D distribusi panas maupun animasi dinamika suhu menjadi nilai tambah yang signifikan dalam menyampaikan hasil secara intuitif. Untuk validasi model, MATLAB memungkinkan perhitungan metrik seperti *Root Mean Square Error* (RMSE) dan koefisien determinasi (R^2), serta mendukung uji sensitivitas parameter untuk mengevaluasi kestabilan prediksi.

Dari hasil kajian literatur, ditemukan beberapa kekosongan dalam penelitian sebelumnya. Pertama, masih jarang studi yang mengintegrasikan eksperimen sederhana dengan analisis numerik presisi tinggi. Kedua, pemanfaatan MATLAB untuk validasi model efek rumah kaca skala laboratorium masih sangat terbatas. Ketiga, belum banyak penelitian yang menghubungkan hasil eksperimen skala kecil dengan parameter-parameter iklim nyata.

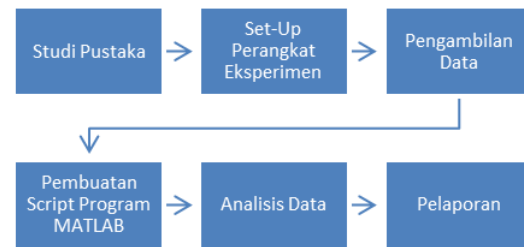
Penelitian ini memberikan kontribusi melalui tiga pendekatan utama: (1) rancangan eksperimen terkontrol yang mudah direplikasi, (2) pengambilan data yang lengkap dari pengukuran suhu hingga visualisasi dan validasi model numerik, serta (3) penyediaan paket kode MATLAB terbuka yang dapat digunakan kembali dalam penelitian dan pengajaran. Hipotesis yang diajukan dalam penelitian ini adalah bahwa sistem tertutup akan menunjukkan peningkatan suhu yang signifikan dibandingkan sistem terbuka, dan bahwa data suhu hasil eksperimen dapat divalidasi secara numerik menggunakan model transfer panas berbasis MATLAB dengan akurasi tinggi.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental dan komputasional sederhana untuk mensimulasikan pengaruh efek rumah kaca terhadap perubahan suhu dalam dua kondisi lingkungan yang berbeda: sistem tertutup dan sistem terbuka. Tujuan dari eksperimen ini adalah untuk mengamati perbedaan kenaikan suhu akibat terperangkapnya panas dalam sistem yang menyerupai atmosfer bumi dengan konsentrasi gas rumah kaca tinggi.

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Februari-April 2025 di lingkungan kampus Jurusan Fisika Universitas Negeri Manado. Tahapan penelitian dimulai dari studi pustaka,

perancangan perangkat eksperimen, pembuatan script program MATLAB, dan Analisis Data seperti ditampilkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Tahapan Penelitian

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi dua buah toples kaca transparan sebagai wadah simulasi atmosfer, dua buah termometer untuk mengukur suhu, lakban bening besar untuk menutup rapat salah satu toples, sumber cahaya alami berupa sinar matahari langsung, serta stopwatch atau timer untuk mengatur interval pencatatan suhu. MATLAB Online digunakan untuk simulasi dan visualisasi data yang menyediakan berbagai fitur dan fungsi yang dapat membantu dalam pemodelan, simulasi, dan analisis data dalam konteks Fisika Komputasi (Kamaruddin & Silangen, 2025).

Langkah-langkah yaitu: (1) Kedua toples diisi dengan air bersih dalam jumlah yang sama. (2) Salah satu toples ditutup rapat menggunakan lakban bening agar kedap udara. Toples ini merepresentasikan atmosfer dengan efek rumah kaca. (3) Toples kedua dibiarkan dalam keadaan terbuka sebagai kontrol, menggambarkan atmosfer normal tanpa perangkat panas. (4) Satu buah termometer diletakkan di dalam masing-masing toples untuk mengukur suhu internal. (5) Kedua toples diletakkan berdampingan di bawah sinar matahari langsung selama kurang lebih 30 menit. (6) Suhu pada masing-masing termometer diamati dan dicatat setiap 5–10 menit dengan bantuan *stopwatch*. (7) Setelah 30 menit, seluruh data suhu dikumpulkan dan dibandingkan untuk mengetahui perbedaan peningkatan suhu pada kedua sistem. Penentuan waktu 30 menit yang digunakan mengikuti penelitian yang dilakukan (Ainy & Hadi, 2021) dalam mensimulasikan konsep efek rumah kaca.

Data dikumpulkan dengan mencatat suhu dari masing-masing termometer secara berkala, sesuai dengan interval waktu yang telah ditentukan. Hasil pengukuran suhu tersebut

dicatat dalam bentuk tabel untuk memudahkan proses analisis selanjutnya. Analisis data dilakukan dengan cara membandingkan perubahan suhu yang terjadi pada toples tertutup dan toples terbuka. Selisih suhu yang terukur dari kedua sistem menunjukkan seberapa besar kontribusi efek rumah kaca dalam meningkatkan suhu. Selain itu, data juga dianalisis secara numerik menggunakan MATLAB untuk membangun model kenaikan suhu dan memvalidasi hasil eksperimen dengan pendekatan komputasi berbasis persamaan transfer panas.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Eksperimen sederhana seperti penggunaan toples kaca untuk menunjukkan perbedaan suhu antara sistem tertutup dan terbuka disertai pendekatan komputasional telah berhasil dilakukan. Gambar 2 menunjukkan kondisi dua toples yang digunakan dalam eksperimen.



Gambar 2. Peneliti Melakukan Pengambilan Data Dibawah Sinar Matahari

Pada Gambar 2. kondisi awal eksperimen: toples tertutup (kiri) dan toples terbuka (kanan) di bawah sinar matahari langsung. Kedua toples diletakkan berdampingan di halaman depan Laboratorium Fisika UNIMA pada pukul 12.00 WITA dan diamati selama 30 menit. Salah satu toples ditutup rapat menggunakan lakban untuk mensimulasikan atmosfer dengan efek rumah kaca, sedangkan yang lain dibiarkan terbuka sebagai kontrol. Eksperimen yang dilakukan mengilustrasikan efek rumah kaca pada sistem tertutup dan terbuka dengan menggunakan toples kaca sebagai medium, serta memperlihatkan hasil pemodelan numerik menggunakan MATLAB.

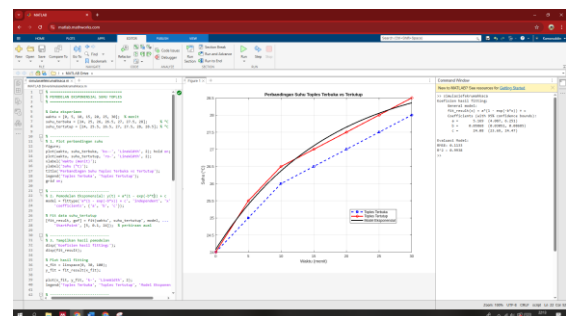
Pengukuran suhu yang dilakukan mencerminkan dua mekanisme perpindahan panas yang berbeda antara toples terbuka dan

tertutup. Dalam toples terbuka, perpindahan panas didominasi oleh konveksi, yang menyebabkan energi hilang lebih cepat ke lingkungan luar, sementara pada toples tertutup, dominasi perpindahan panas terjadi melalui radiasi termal dan konduksi. Hal ini sejalan dengan temuan dalam literatur yang menjelaskan bahwa radiasi dapat mendominasi dalam sistem yang terisolasi; penelitian menunjukkan bahwa radiasi dan konveksi beroperasi secara bersamaan dalam sistem tertutup (Maksimov et al., 2016; Ren et al., 2021). Data suhu yang dicatat dari kedua toples selama eksperimen berlangsung dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Pengamatan Perubahan Suhu Pada Toples Terbuka dan Tertutup dibawah Sinar Matahari

Waktu (menit)	Suhu Toples		Selisih Suhu (°C)
	Terbuka (°C)	Tertutup (°C)	
0	24.0	24.0	0.0
5	25.0	25.5	0.5
10	26.0	26.5	0.5
15	26.5	27.0	0.5
20	27.0	27.5	0.5
25	27.5	28.0	0.5
30	28.0	28.5	0.5

Berdasarkan Tabel 1 dapat terlihat bahwa kedua kondisi menunjukkan peningkatan suhu yang relatif serupa, tetapi terdapat kecenderungan bahwa suhu pada toples tertutup mengalami peningkatan lebih halus dan lambat namun terprediksi dengan model eksponensial. Data suhu eksperimen kemudian dimodelkan secara numerik menggunakan MATLAB. Grafik berikut menunjukkan hasil visualisasi simulasi peningkatan suhu berdasarkan model eksponensial sederhana. Hasil simulasi numerik menggunakan MATLAB dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Simulasi Numerik Menggunakan MATLAB Online

Berdasarkan Gambar 2, hasil analisis simulasi memperlihatkan adanya perbedaan mencolok pada pola kenaikan suhu antara toples terbuka dan tertutup, sebagaimana divisualisasikan dalam grafik perbandingan. Toples terbuka menunjukkan pola kenaikan suhu yang relatif linear dengan gradien sekitar 0.13°C per menit, mencapai suhu maksimum 28°C pada menit ke-30. Sebaliknya, toples tertutup menunjukkan karakteristik kenaikan suhu yang bersifat eksponensial, dengan laju awal sebesar 0.15°C per menit dan suhu maksimum mencapai 28.5°C pada menit ke-30. Pola ini secara matematis sangat sesuai dengan model eksponensial yang diterapkan, terbukti dari nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0.9938, yang mengindikasikan bahwa mekanisme trapping panas pada sistem tertutup bekerja secara signifikan. Hal ini mencerminkan penerapan model matematis yang sangat relevan dalam memprediksi perubahan suhu dalam konteks pengaruh gas rumah kaca yang mirip dengan skenario di lingkungan nyata. Model ini lebih lanjut didukung oleh hasil penelitian yang menunjukkan bahwa model perhitungan suhu dapat secara akurat merepresentasikan sistem dengan karakteristik radiasi dan konveksi yang rumit (Kurilenko et al., 2015; Li et al., 2016). Model eksponensial yang digunakan seperti pada Persamaan 1.

$$T(t) = a \cdot (1 - e^{-bt}) + c \quad (1)$$

menghasilkan parameter yang diperoleh melalui fitting MATLAB: amplitudo maksimal $a=4.169$, konstanta laju pemanasan $b=0.08688$, dan suhu awal $c=24.08$. Interpretasi nilai parameter b yang positif menunjukkan bahwa sistem mendekati suhu maksimum secara asimtotik, dengan waktu karakteristik $\tau = 1/b \approx 11.5$ menit, yang berarti 63.2% dari total kenaikan suhu terjadi dalam rentang waktu tersebut.

Evaluasi terhadap performa model menghasilkan nilai RMSE sebesar 0.1133°C , lebih kecil dari akurasi alat ukur ($\pm 0.5^{\circ}\text{C}$), dan R^2 sebesar 0.9938, memperkuat kesimpulan bahwa model sangat akurat dalam memprediksi pola kenaikan suhu pada sistem tertutup yang mengalami efek rumah kaca mini. Dari sisi fisika, mekanisme perpindahan panas berbeda untuk kedua sistem: pada toples terbuka dominasi perpindahan terjadi melalui konveksi yang menyebabkan energi mudah hilang ke lingkungan, sedangkan pada toples tertutup

perpindahan panas didominasi oleh radiasi termal dan konduksi, di mana panas yang masuk sebagai radiasi gelombang pendek terperangkap setelah dipantulkan sebagai gelombang panjang—analogi yang sangat relevan dengan fenomena perubahan iklim global. Eksperimen ini juga menunjukkan bahwa selisih suhu sebesar 0.5°C cukup menggambarkan proyeksi kenaikan suhu global sebesar 1.5°C akibat gas rumah kaca, sebagaimana diprediksi oleh IPCC (Le Treut et al., 2007). Bahkan, konstanta waktu τ dalam model ini dapat merepresentasikan inersia dalam sistem iklim.

Namun, simulasi ini memiliki keterbatasan, seperti asumsi intensitas cahaya yang konstan dan pengabaian efek kelembaban di dalam toples. Oleh karena itu, direkomendasikan pengembangan eksperimen lebih lanjut dengan variasi ketebalan isolasi dan pengukuran kelembaban secara simultan, serta penggunaan pendekatan pemodelan yang lebih kompleks. Simulasi numerik menggunakan MATLAB memberikan pemahaman lebih lanjut tentang bagaimana parameter seperti koefisien laju perpindahan panas dapat diterapkan dan dioptimalkan dalam pengaturan laboratorium. Hasil eksperimen menunjukkan nilai RMSE yang lebih rendah dari batas akurasi alat pengukur, sehingga menunjukkan bahwa model yang digunakan dalam simulasi ini cukup akurat untuk memprediksi perilaku suhu di kedua sistem (Nee, 2016). Pengembangan penelitian lebih lanjut memang dibutuhkan untuk mengeksplorasi faktor-faktor seperti kelembaban dan variasi ketebalan isolasi, yang dapat mempengaruhi hasil. Hal ini sejalan dengan temuan penelitian yang menyarankan pada penggunaan simulasi yang lebih kompleks, termasuk *Computational Fluid Dynamics* (CFD), untuk memperbaiki representasi pengalihan panas dalam sistem dengan karakteristik yang lebih realistis (Aacharya et al., 2023; Rahimi & Sabernaeemi, 2010).

Secara keseluruhan, penelitian ini tidak hanya menampilkan manfaat eksperimen sederhana dalam memahami konsep fisika yang kompleks seperti efek rumah kaca, tetapi juga menekankan pentingnya pemodelan numerik dalam memperkaya wawasan tentang dinamika suhu di lingkungan yang terkendali. Temuan ini dapat berkontribusi pada pengembangan praktikum di bidang fisika klimatologi yang lebih aplikatif dan relevan di masa depan,

sekaligus menawarkan cakrawala baru untuk penelitian lebih lanjut mengenai efek perubahan iklim global.

5. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mensimulasikan efek rumah kaca melalui eksperimen sederhana menggunakan toples kaca tertutup dan terbuka, serta pemodelan numerik berbasis MATLAB. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa toples tertutup mengalami kenaikan suhu lebih tinggi ($0,5^{\circ}\text{C}$) dibandingkan toples terbuka, membuktikan terjadinya pemerangkapan panas. Analisis data dengan MATLAB menghasilkan model eksponensial yang akurat ($R^2 = 0,9938$) dalam memprediksi tren kenaikan suhu, dengan RMSE sebesar $0,1133^{\circ}\text{C}$. Simulasi ini juga mengungkap perbedaan mekanisme perpindahan panas antara sistem tertutup (dominan radiasi dan konduksi) dan sistem terbuka (dominan konveksi).

Temuan penelitian ini menegaskan bahwa MATLAB merupakan alat komputasi yang efektif untuk simulasi fenomena fisika terkait pemanasan global. Selain itu, penelitian ini memberikan kontribusi praktis berupa metodologi yang dapat diaplikasikan dalam pengembangan praktikum fisika klimatologi atau model iklim skala laboratorium. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan untuk mempertimbangkan variasi parameter seperti ketebalan isolasi, kelembaban, dan penggunaan pemodelan yang lebih kompleks seperti *Computational Fluid Dynamics* (CFD) guna meningkatkan akurasi dan relevansi hasil. Secara keseluruhan, penelitian ini tidak hanya memperkuat pemahaman tentang efek rumah kaca melalui pendekatan eksperimental dan komputasional, tetapi juga menyoroti pentingnya upaya mitigasi dampak perubahan iklim.

6. REFERENSI

Aacharya, A., Koirala, R., Khanal, S., & Baral, B. (2023). Comparative Analysis of Radiant and Radiator Heating System for a Residential Building. *Iop Conference Series Materials Science and Engineering*, 1279(1), 12001. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1279/1/012001>

Ainurrohman, S., & Sudarti, S. (2022). Analisis Perubahan Iklim Dan Global Warming Yang Terjadi Sebagai Fase Kritis. *Jurnal Phi Jurnal Pendidikan Fisika Dan Fisika*

Terapan, 3(3), 1. <https://doi.org/10.22373/p-jpft.v3i3.13359>

Ainy, N. S., & Hadi, N. (2021). Making Learning Media for Greenbox Effect Simulator To Improve Understanding of the Concept of the Greenhouse Effect. *Jhss (Journal of Humanities and Social Studies)*, 5(1), 11–16. <https://doi.org/10.33751/jhss.v5i1.3198>

Ardiansyah, R. F., & Permadi, D. A. (2022). Estimasi Emisi Metana Dari Fermentasi Enterik Terhadap Potensi Pemanasan Global Pada Sektor Peternakan Sapi Perah Di Kecamatan Lembang Kabupaten Bandung Barat. *Jurnal Serambi Engineering*, 7(4). <https://doi.org/10.32672/jse.v7i4.4727>

Kamaruddin, K., & Silangen, P. M. (2025). Buku Ajar: PjBL Fisika Komputasi. In *Tahta Media Group*. Tahta Media Group.

Ketaren, D. G. K. (2023). Peranan Kawasan Mangrove Dalam Penurunan Emisi Gas Rumah Kaca Di Indonesia. *Jurnal Kelautan Dan Perikanan Terapan (Jkpt)*, 1, 73–79. <https://doi.org/10.15578/jkpt.v1i0.12050>

Khumaira, A. S. (2024). LKPD Berbasis Model Pembelajaran Challenge-Based Learning Terintegrasi Stem Pada Materi Pemanasan Global. *Prosiding Seminar Nasional Fisika (E-Journal)*, XII(Januari), 33–40. <https://doi.org/10.21009/03.1201.pf06>

Kurilenko, N. I., Mamontov, G. Y., & Mikhaylova, L. Y. (2015). Temperature Patterns in the Gas Infrared Radiator Heating Area. *Epj Web of Conferences*, 82, 1006. <https://doi.org/10.1051/epjconf/20158201006>

Le Treut, H., Somerville, R., & Allen, M. (2007). Historical Overview of Climate Change Science Contributing Authors. In S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor, & H. L. Miller (Ed.), *Climate Change* (hal. 93–127). Cambridge University Press.

Leu, B. (2021). Dampak Pemanasan Global Dan Upaya Pengendalian Melalui Pendidikan Lingkungan Hidup Dan Pendidikan Islam. *Jurnal at Tadbir Journal of Islamic Education Management (Iem)*, 1(2), 1–15.

- <https://doi.org/10.51700/attadbir.v1i2.207>
- Li, X., Gong, Y., Zhou, Z., Dai, Z., & Yu, G. (2016). Simulation of Radiant Syngas Coolers and Comparison With Various Arrangements of the Entrained-Flow Gasifier. *Chemical Engineering & Technology*, 39(8), 1457–1467. <https://doi.org/10.1002/ceat.201400396>
- Londa, T. K., & Kamaruddin. (2023). The Implementation of Project Based Learning to Enhance Students' Understanding of Environmental Conservation and Disaster Mitigation. *Jurnal Pendidikan Fisika*, 11(2), 153–160. <https://doi.org/10.26618/jpf.v11i2.10574>
- Maksimov, V. I., Nagornova, T. A., & Kurilenko, N. I. (2016). Verification of Conjugate Heat Transfer Models in a Closed Volume With Radiative Heat Source. *Matec Web of Conferences*, 72, 1061. <https://doi.org/10.1051/matecconf/20167201061>
- Megalina, Y. (2014). Prediksi Cuaca Ekstrim Dengan Model Jaringan Syaraf Tiruan Menggunakan Program Matlab. *Jurnal Einstein*, 2(1), 19–27.
- Muhyiddin, R., Hutahaeen, S. D., & Hartanto, T. J. (2023). Pengembangan Media Pembelajaran Handout Berbasis Infografis Untuk Meningkatkan Kemampuan Literasi Sains Peserta Didik Pada Materi Pemanasan Global Di Kelas VII SMP. *BPJPS*, 5(1), 1–6. <https://doi.org/10.37304/bpjps.v5i1.8363>
- Nee, A. (2016). Numerical Modeling of Conjugate Thermogravitational Convection in a Closed System With a Radiant Energy Source in Conditions of Convective-Radiative Heat Exchange at the External Boundary. *Epj Web of Conferences*, 110, 1043. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201611001043>
- Praptyanti, D. A. U. R., Barchi, M. F., Utama, S. P., Suharyanto, S., & Yansen, Y. (2022). Strategi Mitigasi Emisi Gas Rumah Kaca (Grk) Sektor Persampahan Di Kabupaten Lebong (Studi Kasus Kecamatan Amen). *Naturalis Jurnal Penelitian Pengelolaan Sumber Daya Alam Dan Lingkungan*, 11(1), 29–39. <https://doi.org/10.31186/naturalis.11.1.207>
- 828
- Rahimi, M., & Sabernaeemi, A. (2010). Experimental Study of Radiation and Free Convection in an Enclosure With a Radiant Ceiling Heating System. *Energy and Buildings*, 42(11), 2077–2082. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.06.017>
- Ren, J., Su, M., Zhao, X., Liu, J., & Song, S. (2021). Experimental Study on the Dynamic Thermal Response of a Radiant Floor System in an Office Building. *E3s Web of Conferences*, 246, 10003. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202124610003>
- Rifa'i, A. I., Anwar, Z., Hidayati, B., Dzaky, M. I., Okviyanto, T., & ... (2023). Komparasi Studi Numerik Dan Analitik Konduktivitas Termal Dua Dimensi Pada Kondisi Steady-State. *Rotasi*, 25(3), 16–22.
- Shaumi, B. P., Mitrakusuma, W. H., Setyawan, A., & Kurniasetiawati, A. S. (2024). Kaji Eksperimental Pengaruh Variasi Panjang Pipa Kapiler Terhadap Kinerja AC Split Dengan Variasi Massa Refrigeran. *Prosiding Industrial Research Workshop and National Seminar*, 15(1), 502–506. <https://doi.org/10.35313/irwns.v15i1.6239>
- Wahyuni, S. E., & Suharmanto, P. (2022). Pengantar Matlab Untuk Materi Konversi Suhu Pada Pembelajaran Fisika Info. *Schrodinger Jurnal Ilmiah Mahasiswa Pendidikan Fisika*, 3(2), 158–166.