

Penerapan Statistik Bose-Einstein pada Analisis Spektrum Radiasi Benda Hitam dan Hukum Pergeseran Wien

Adelyna Oktavia Nasution¹ Muhammad Reza Rafiqi Nasution² Elsa Shalsabilla³ Fatimah Az Zahra Hanifah Isma⁴ Aidina Seisila Yanti⁵ Nurul Fitria Miraza⁶ Lima Sukria Muktar Dalimunthe⁷ Marito⁸ Thania Sri Adristi⁹

Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Sumatera Utara, Medan,
Sumatera Utara, Indonesia^{1,2,3,4,5,6,7,8,9}

Email: adelyna1100000198@uinsu.ac.id¹ rezarafiqi500@gmail.com²
elsashalsabilla4@gmail.com³ fatimaaismaa@gmail.com⁴ aidinaseisila@gmail.com⁵
nurulfitria0209@gmail.com⁶ limasukriamuktar14@gmail.com⁷ maritohasibuan5@gmail.com⁸
thanasriadristi@gmail.com⁹

Abstrak

Radiasi benda hitam merupakan salah satu fenomena yang menjadi dasar perkembangan fisika kuantum. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis penerapan statistik Bose-Einstein pada spektrum radiasi benda hitam serta menguji kesesuaiannya dengan Hukum Pergeseran Wien. Penelitian menggunakan metode kuantitatif dengan pendekatan komputasi melalui simulasi numerik menggunakan Python pada Jupyter Notebook. Simulasi dilakukan pada delapan variasi temperatur, yaitu 2.500–6.000 K, dengan rentang panjang gelombang 0,1–5,0 μm sebanyak 2.000 titik data pada setiap temperatur. Perhitungan dilakukan menggunakan faktor distribusi Bose-Einstein dan persamaan Planck untuk memperoleh spektrum radiasi, kemudian ditentukan panjang gelombang maksimum (λ_{maks}) dan nilai $\lambda_{\text{maks}}T$. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan temperatur menyebabkan intensitas radiasi meningkat dan posisi puncak spektrum bergeser menuju panjang gelombang yang lebih pendek. Nilai λ_{maks} menurun dari 1,159 μm pada 2.500 K menjadi 0,482 μm pada 6.000 K, sedangkan nilai rata-rata $\lambda_{\text{maks}}T$ sebesar $2,898 \times 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{K}$. Hasil regresi antara λ_{maks} dan $1/T$ menghasilkan nilai R^2 sebesar 0,99999 dengan kemiringan $2,8965 \times 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{K}$. Hasil tersebut menunjukkan kesesuaian yang sangat baik antara hasil simulasi dengan Hukum Pergeseran Wien. Dengan demikian, statistik Bose-Einstein yang diterapkan dalam distribusi Planck dapat menjelaskan karakteristik spektrum radiasi benda hitam dan hubungan antara temperatur dengan panjang gelombang maksimum.

Kata Kunci: Radiasi Benda Hitam, Bose-Einstein, Distribusi Planck, Hukum Pergeseran Wien, Simulasi Numerik

Abstract

Blackbody radiation is a physical phenomenon that forms one of the foundations of the development of quantum physics. This study aims to analyze the application of Bose-Einstein statistics to the blackbody radiation spectrum and examine its consistency with Wien's displacement law. The study employs a quantitative method with a computational approach through numerical simulations using Python in Jupyter Notebook. The simulations were conducted at eight temperature variations ranging from 2,500 to 6,000 K, with a wavelength range of 0.1–5.0 μm consisting of 2,000 data points at each temperature. The calculations utilized the Bose-Einstein distribution factor and Planck's equation to obtain the radiation spectra, after which the peak wavelength (λ_{max}) and the product ($\lambda_{\text{max}}T$) were determined. The results show that increasing temperature leads to higher radiation intensity and shifts the spectral peak toward shorter wavelengths. The value of (λ_{max}) decreases from 1.159 μm at 2,500 K to 0.482 μm at 6,000 K, while the average value of ($\lambda_{\text{max}}T$) is (2.898×10^{-3}) $\text{m}\cdot\text{K}$. Regression analysis between (λ_{max}) and ($1/T$) yields an (R^2) value of 0.99999 and a slope of (2.8965×10^{-3}) $\text{m}\cdot\text{K}$. These results demonstrate excellent agreement between the simulation results and Wien's displacement law. Therefore, Bose-Einstein statistics applied in Planck's distribution can explain the characteristics of the blackbody radiation spectrum and the relationship between temperature and peak wavelength.

Keywords: *Blackbody Radiation, Bose–Einstein Statistics, Planck Distribution, Wien’s Displacement Law, Numerical Simulation*



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

PENDAHULUAN

Radiasi benda hitam merupakan salah satu fenomena penting dalam fisika yang berperan dalam perkembangan fisika modern, khususnya dalam perkembangan teori kuantum. Radiasi benda hitam menggambarkan radiasi elektromagnetik yang dipancarkan oleh suatu benda ideal yang mampu menyerap seluruh radiasi yang datang kepadanya. Spektrum radiasi yang dihasilkan dipengaruhi oleh temperatur, sehingga perubahan temperatur menyebabkan perubahan intensitas radiasi dan posisi panjang gelombang maksimum. Semakin tinggi temperatur, semakin besar intensitas radiasi yang dipancarkan dan semakin pendek panjang gelombang pada posisi maksimum spektrum (Yohakim et al., 2024). Permasalahan radiasi benda hitam menjadi salah satu dasar berkembangnya fisika kuantum karena teori klasik belum mampu menjelaskan distribusi energi radiasi secara menyeluruh. Pendekatan Rayleigh-Jeans menghasilkan prediksi energi yang semakin besar pada panjang gelombang pendek sehingga menimbulkan permasalahan yang dikenal sebagai bencana ultraviolet. Permasalahan tersebut kemudian dapat dijelaskan melalui konsep kuantisasi energi dalam distribusi Planck. Dalam mekanika kuantum, foton merupakan partikel boson sehingga distribusinya dapat dijelaskan menggunakan statistik Bose-Einstein (Spalek, 2020). Statistik tersebut menunjukkan bagaimana jumlah partikel boson menempati keadaan energi tertentu dan menjadi dasar dalam memahami distribusi foton pada radiasi benda hitam (Enders, 2021).

Kajian mengenai radiasi benda hitam telah dilakukan menggunakan berbagai pendekatan. Nasution dkk. (2023) menganalisis efisiensi energi radiasi benda hitam menggunakan metode integrasi numerik Simpson 1/3 berbasis Python dan menunjukkan bahwa pendekatan numerik dapat digunakan untuk memperoleh hasil yang mendekati perhitungan analitik. Sementara itu, Gomes dkk. (2025) membahas perkembangan konsep radiasi benda hitam dalam kaitannya dengan dualisme gelombang-partikel serta perkembangan konsep fisika modern. Kajian mengenai karakteristik spektrum juga menunjukkan bahwa perubahan temperatur dapat memengaruhi bentuk spektrum, intensitas radiasi, dan posisi puncak yang dihasilkan (Pakes, 2021). Hal ini menunjukkan bahwa temperatur menjadi salah satu parameter utama dalam analisis karakteristik radiasi benda hitam. Hubungan antara temperatur dan panjang gelombang maksimum dapat dijelaskan melalui Hukum Pergeseran Wien. Saad et al. (2023) menunjukkan bahwa hubungan tersebut dapat digunakan untuk menganalisis radiasi termal dan memperkirakan temperatur suatu benda berdasarkan radiasi yang dipancarkannya. Secara matematis, posisi panjang gelombang maksimum diperoleh dari kondisi ketika turunan pertama distribusi Planck terhadap panjang gelombang bernilai nol, sebagaimana ditunjukkan oleh Widagda dkk. (2023). Namun, penelitian-penelitian tersebut umumnya membahas karakteristik spektrum, pendekatan numerik, atau hubungan temperatur dan panjang gelombang secara terpisah. Keterkaitan antara statistik Bose-Einstein sebagai dasar distribusi foton, distribusi Planck sebagai bentuk spektrum radiasi, dan Hukum Pergeseran Wien sebagai penentu posisi maksimum masih perlu dijelaskan secara lebih terpadu. Oleh karena itu, terdapat gap penelitian berupa perlunya analisis yang menghubungkan ketiga konsep tersebut dalam satu kajian sehingga hubungan antara mekanika statistik kuantum dan karakteristik spektrum radiasi benda hitam dapat dipahami dengan lebih jelas.

Berdasarkan gap tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis penerapan statistik Bose-Einstein pada spektrum radiasi benda hitam serta hubungannya dengan Hukum Pergeseran Wien. Analisis dilakukan dengan mengkaji distribusi energi foton, distribusi Planck, serta perubahan intensitas dan panjang gelombang maksimum pada beberapa variasi temperatur. Pendekatan tersebut diharapkan dapat memberikan gambaran yang lebih sistematis mengenai hubungan antara statistik Bose-Einstein, distribusi radiasi Planck, temperatur, intensitas radiasi, dan pergeseran panjang gelombang maksimum pada spektrum radiasi benda hitam.

Penelitian Terdahulu yang Relevan

No	Penulis/ Tahun	Judul	Tujuan	Metode	Hasil	Kontribusi dan relevansi
1	Nasution dkk. (2023)	Analisis Efisiensi Energi Radiasi Benda Hitam Menggunakan Metode Integrasi Numerik Simpson 1/3 Berbasis Python	Menganalisis efisiensi energi radiasi benda hitam.	Integrasi numerik Simpson 1/3 menggunakan Python.	Metode numerik digunakan untuk menghitung efisiensi radiasi berdasarkan formulasi Planck.	Relevan dari sisi analisis komputasi, sedangkan penelitian ini lebih berfokus pada statistik Bose- Einstein dan Hukum Pergeseran Wien.
2	Pakes (2021)	Structural properties of generalised Planck distributions	Mengkaji sifat struktural dari distribusi Planck yang digeneralisasi.	Analisis matematis terhadap bentuk dan sifat distribusi Planck.	Membahas karakteristik matematis dan struktur distribusi Planck yang diperluas.	Relevan untuk memahami bentuk distribusi Planck yang menjadi dasar analisis spektrum radiasi benda hitam.
3	Gomes dkk. (2025)	Dualisme Gelombang- Partikel: Landasan Teori, Transformasi Konsep Ilmiah, dan Implikasi pada Fisika Modern	Membahas perkembangan konsep dualisme gelombang- partikel dan keterkaitannya dengan perkembangan fisika kuantum.	Kajian teoritis dan tinjauan konsep berdasarkan perkembangan teori fisika modern.	Menunjukkan bahwa perkembangan konsep kuantum, termasuk radiasi benda hitam, berperan dalam munculnya pemahaman mengenai sifat gelombang dan partikel pada objek mikroskopis.	Relevan sebagai dasar konseptual untuk menjelaskan perkembangan fisika kuantum dari permasalahan radiasi benda hitam menuju konsep foton dan statistik kuantum yang digunakan dalam penelitian ini.
4	Yohakim et al. (2024)	Kajian Radiasi Benda Hitam dan Hukum Pergeseran Wien	Menganalisis karakteristik radiasi benda hitam serta hubungan antara temperatur dan panjang gelombang maksimum.	Analisis teoritis dan matematis terhadap distribusi radiasi benda hitam dan Hukum Pergeseran Wien.	Menunjukkan bahwa peningkatan temperatur menyebabkan intensitas radiasi meningkat dan panjang gelombang maksimum bergeser ke arah panjang gelombang yang lebih pendek.	Menjadi dasar untuk menganalisis pengaruh temperatur terhadap intensitas dan pergeseran panjang gelombang maksimum pada penelitian ini.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif dengan pendekatan komputasi melalui simulasi numerik untuk menganalisis distribusi spektrum radiasi benda hitam berdasarkan statistik Bose-Einstein dan hukum radiasi Planck serta menguji kesesuaiannya dengan Hukum

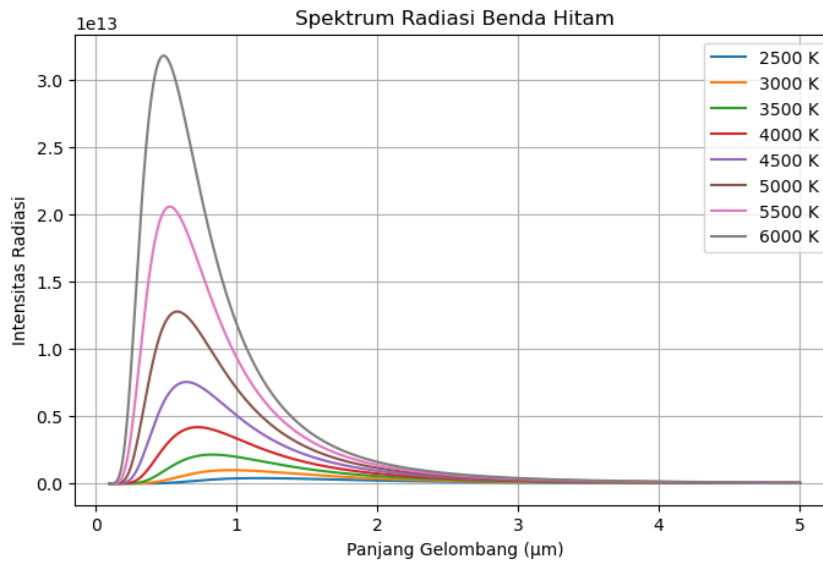
Pergeseran Wien. Penelitian dilakukan pada tahun 2026 di Laboratorium Fisika UINSU Medan menggunakan Python melalui Jupyter Notebook. Parameter penelitian berupa temperatur dan panjang gelombang. Temperatur divariasikan pada 2.500–6.000 K dengan delapan variasi, sedangkan panjang gelombang berada pada rentang 0,1–5,0 μm dengan 2.000 titik data. Perhitungan menggunakan konstanta Planck, kecepatan cahaya, konstanta Boltzmann, dan konstanta Wien. Hasil yang dianalisis meliputi intensitas radiasi, panjang gelombang maksimum (λ_{maks}), hasil kali $\lambda_{\text{maks}}T$, serta kesesuaiannya dengan konstanta Wien. Adapun prosedur penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menentukan parameter penelitian. Tahap awal dilakukan dengan menentukan konstanta fisika, variasi temperatur, dan rentang panjang gelombang. Temperatur yang digunakan adalah 2.500–6.000 K, sedangkan panjang gelombang berada pada rentang 0,1–5,0 μm .
2. Melakukan perhitungan dengan Python. Perhitungan dilakukan menggunakan Python melalui Jupyter Notebook. Statistik Bose–Einstein digunakan untuk menghitung rata-rata jumlah foton, sedangkan persamaan Planck digunakan untuk menghitung intensitas radiasi benda hitam.
3. Membuat grafik spektrum radiasi. Hasil perhitungan kemudian dibuat dalam bentuk grafik untuk setiap temperatur. Grafik digunakan untuk melihat perubahan intensitas dan pergeseran puncak spektrum akibat perubahan temperatur.
4. Menentukan panjang gelombang maksimum. Panjang gelombang maksimum (λ_{maks}) ditentukan dari titik yang memiliki intensitas paling tinggi pada setiap kurva menggunakan fungsi `argmax()` dari NumPy. Nilai λ_{maks} kemudian dikalikan dengan temperatur untuk memperoleh nilai $\lambda_{\text{maks}}T$.
5. Menyusun tabel dan grafik hasil. Hasil perhitungan disusun dalam tabel dan digunakan untuk membuat grafik hubungan antara λ_{maks} dan $1/T$.
6. Membandingkan hasil dengan Hukum Wien. Nilai $\lambda_{\text{maks}}T$ dibandingkan dengan konstanta pergeseran Wien untuk melihat tingkat kesesuaian hasil simulasi dengan Hukum Pergeseran Wien.

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Hasil Penelitian

Penelitian dilakukan menggunakan Python melalui Jupyter Notebook dengan delapan variasi temperatur, yaitu 2.500–6.000 K dengan interval 500 K. Panjang gelombang yang digunakan berada pada rentang 0,1–5 μm dengan 2.000 titik data untuk setiap temperatur. Analisis meliputi spektrum radiasi, panjang gelombang maksimum (λ_{maks}), nilai $\lambda_{\text{maks}}T$, serta hubungan λ_{maks} dengan $1/T$. Hasil perhitungan menggunakan persamaan Planck ditampilkan pada Gambar 1. Setiap temperatur menghasilkan kurva dengan satu puncak. Semakin tinggi temperatur, intensitas radiasi semakin besar dan puncak spektrum bergeser ke arah panjang gelombang yang lebih pendek.



Gambar 1. Spektrum Radiasi Benda Hitam pada Temperatur 2500–6000 K

Intensitas puncak pada setiap temperatur ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Intensitas Puncak Spektrum Radiasi Benda Hitam

T (K)	$B_{\text{maks}} (\times 10^{12} \text{ W}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{sr}^{-1})$	Rasio terhadap 2500 K	$(T/2500)^5$
2500	0,400	1,00	1,00
3000	0,994	2,49	2,49
3500	2,149	5,38	5,38
4000	4,191	10,49	10,49
4500	7,552	18,90	18,90
5000	12,789	32,00	32,00
5500	20,597	51,54	51,54
6000	31,823	79,63	79,63

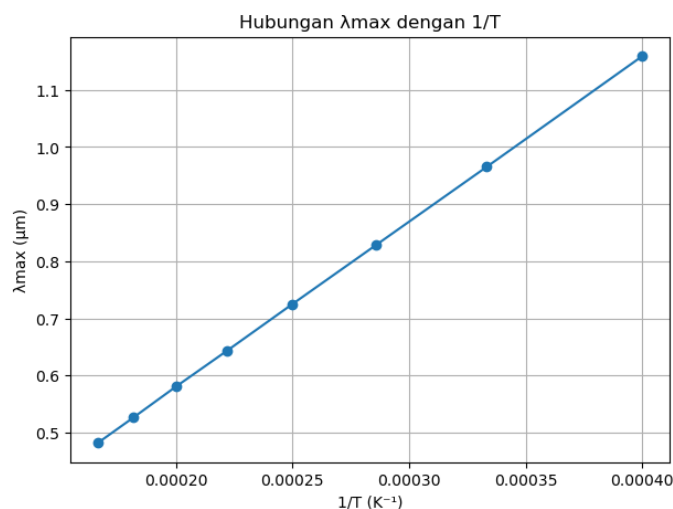
Berdasarkan Tabel 1. intensitas puncak meningkat seiring kenaikan temperatur. Dari 2.500 K hingga 6.000 K, temperatur meningkat 2,4 kali, sedangkan intensitas puncak meningkat sekitar 79,6 kali. Hasil ini menunjukkan bahwa intensitas puncak memiliki ketergantungan yang kuat terhadap temperatur. Panjang gelombang maksimum ditentukan dari titik intensitas tertinggi menggunakan `np.argmax()`. Hasil perhitungan λ_{maks} dan $\lambda_{\text{maks}}T$ disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Panjang Gelombang Maksimum dan Hasil Kali $\lambda_{\text{maks}}T$

T (K)	$\lambda_{\text{maks}} (\mu\text{m})$	$\lambda_{\text{maks}}T (\times 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{K})$	Selisih terhadap b (%)
2500	1,159	2,897	-0,03
3000	0,965	2,896	-0,07
3500	0,828	2,898	0,00
4000	0,725	2,900	+0,07
4500	0,644	2,899	+0,03
5000	0,580	2,902	+0,14
5500	0,527	2,896	-0,07
6000	0,482	2,894	-0,14
Rata-rata	–	2,898	-0,01

Berdasarkan Tabel 2. λ_{maks} menurun dari 1,159 μm pada 2.500 K menjadi 0,482 μm pada 6.000 K. Sementara itu, nilai $\lambda_{\text{maks}}T$ relatif konstan dengan rata-rata $2,898 \times 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{K}$. Nilai

tersebut sangat dekat dengan konstanta Wien sebesar $2,898 \times 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{K}$, dengan selisih terbesar hanya 0,14%. Setelah diperoleh nilai panjang gelombang maksimum pada masing-masing temperatur, selanjutnya dilakukan analisis untuk melihat hubungan antara panjang gelombang maksimum (λ_{maks}) dan temperatur. Analisis ini dilakukan dengan memplot nilai λ_{maks} terhadap kebalikan temperatur ($1/T$). Hubungan tersebut digunakan untuk mengetahui apakah perubahan λ_{maks} mengikuti pola yang sesuai dengan Hukum Pergeseran Wien. Hasil hubungan antara λ_{maks} dan $1/T$ untuk delapan variasi temperatur ditampilkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Grafik Hubungan λ_{maks} dengan $1/T$

Berdasarkan Gambar 2, kedelapan titik data membentuk hubungan yang hampir linear. Hasil regresi menghasilkan kemiringan sebesar $2,8965 \times 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{K}$, dengan nilai $R^2 \approx 0,99999$ dan intersep yang mendekati nol. Hasil tersebut menunjukkan bahwa λ_{maks} berbanding lurus dengan $1/T$, sehingga semakin tinggi temperatur, semakin kecil panjang gelombang maksimumnya. Hubungan ini sesuai dengan Hukum Pergeseran Wien.

Pembahasan

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa perubahan temperatur memberikan pengaruh yang jelas terhadap spektrum radiasi benda hitam. Ketika temperatur meningkat dari 2500 K hingga 6000 K, intensitas radiasi maksimum meningkat secara signifikan. Intensitas puncak bertambah dari sekitar $0,400 \times 10^{12} \text{ W}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{sr}^{-1}$ pada 2500 K menjadi $31,823 \times 10^{12} \text{ W}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{sr}^{-1}$ pada 6000 K. Hal ini menunjukkan bahwa semakin tinggi temperatur, semakin besar energi yang dipancarkan oleh benda hitam. Selain itu, peningkatan intensitas tidak hanya terjadi pada daerah puncak, tetapi juga terlihat pada hampir seluruh rentang panjang gelombang yang dianalisis. Peningkatan temperatur juga menyebabkan posisi puncak spektrum bergeser ke arah panjang gelombang yang lebih pendek. Pada temperatur 2500 K, panjang gelombang maksimum diperoleh sebesar $1,159 \mu\text{m}$, sedangkan pada 6000 K nilainya menurun menjadi $0,482 \mu\text{m}$. Pergeseran tersebut menunjukkan bahwa benda yang semakin panas memancarkan radiasi maksimum pada panjang gelombang yang semakin kecil. Hasil ini sesuai dengan Hukum Pergeseran Wien yang menyatakan bahwa hasil perkalian antara panjang gelombang maksimum dan temperatur memiliki nilai yang hampir konstan. Dari hasil perhitungan, nilai $\lambda_{\text{maks}}T$ berada pada kisaran $2,894\text{--}2,902 \times 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{K}$, dengan nilai rata-rata $2,898 \times 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{K}$, sehingga sangat dekat dengan konstanta Wien sebesar $2,898 \times 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{K}$.

Hubungan antara λ_{maks} dan $1/T$ juga menunjukkan kesesuaian yang sangat baik dengan Hukum Wien. Hasil regresi menghasilkan kemiringan sebesar $2,8965 \times 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{K}$ dengan nilai $R^2 \approx 0,99999$, sedangkan intersepnya mendekati nol. Nilai R^2 yang hampir sama dengan satu menunjukkan bahwa data memiliki hubungan linear yang sangat kuat antara λ_{maks} dan $1/T$. Dengan demikian, semakin besar temperatur, nilai $1/T$ semakin kecil dan panjang gelombang maksimum juga semakin kecil. Perbedaan kecil antara hasil perhitungan dan konstanta Wien terutama disebabkan oleh penggunaan titik-titik panjang gelombang yang bersifat diskrit serta pembulatan nilai konstanta fisika dalam perhitungan numerik. Hasil tersebut juga memperlihatkan hubungan antara statistik Bose–Einstein, hukum radiasi Planck, dan Hukum Pergeseran Wien. Faktor Bose–Einstein menentukan rata-rata jumlah foton yang menempati suatu keadaan energi, sedangkan faktor jumlah mode radiasi menentukan banyaknya keadaan yang tersedia pada setiap panjang gelombang. Kedua faktor tersebut menghasilkan bentuk spektrum radiasi benda hitam melalui persamaan Planck. Ketika temperatur meningkat, populasi keadaan energi yang lebih tinggi menjadi lebih besar sehingga intensitas radiasi meningkat dan puncak spektrum bergeser ke panjang gelombang yang lebih pendek. Oleh karena itu, hasil simulasi menunjukkan bahwa penerapan statistik Bose–Einstein dalam persamaan Planck mampu menghasilkan karakteristik spektrum benda hitam yang konsisten dengan Hukum Pergeseran Wien.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa penerapan statistik Bose-Einstein dalam persamaan Planck mampu menggambarkan karakteristik spektrum radiasi benda hitam dengan baik. Peningkatan temperatur dari 2.500 K hingga 6.000 K menyebabkan intensitas radiasi meningkat secara signifikan, dengan intensitas puncak meningkat dari $0,400 \times 10^{12}$ menjadi $31,823 \times 10^{12} \text{ W}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{sr}^{-1}$. Temperatur juga berpengaruh terhadap posisi panjang gelombang maksimum. Semakin tinggi temperatur, semakin kecil nilai λ_{maks} , yaitu dari $1,159 \text{ }\mu\text{m}$ pada 2.500 K menjadi $0,482 \text{ }\mu\text{m}$ pada 6.000 K. Nilai $\lambda_{\text{maks}}T$ memiliki rata-rata sebesar $2,898 \times 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{K}$ dengan selisih maksimum hanya 0,14% terhadap konstanta Wien. Hal ini menunjukkan bahwa hasil simulasi memiliki kesesuaian yang sangat baik dengan Hukum Pergeseran Wien. Hubungan λ_{maks} dengan $1/T$ menghasilkan pola linear dengan nilai R^2 sebesar 0,99999 dan kemiringan $2,8965 \times 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{K}$. Hasil tersebut memperkuat bahwa panjang gelombang maksimum berbanding terbalik dengan temperatur. Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan keterkaitan yang jelas antara statistik Bose-Einstein, distribusi Planck, dan Hukum Pergeseran Wien dalam menjelaskan perubahan intensitas serta pergeseran puncak spektrum radiasi benda hitam.

Kebaruan (novelty) penelitian ini terletak pada penerapan statistik Bose–Einstein melalui simulasi numerik berbasis Python untuk menganalisis karakteristik spektrum radiasi benda hitam pada delapan variasi temperatur, sekaligus menguji kesesuaiannya dengan Hukum Pergeseran Wien secara kuantitatif. Penelitian ini tidak hanya menggambarkan perubahan intensitas dan pergeseran puncak spektrum akibat peningkatan temperatur, tetapi juga mengevaluasi hubungan antara panjang gelombang maksimum (λ_{maks}) dan kebalikan temperatur ($1/T$) melalui analisis regresi. Hasil simulasi menghasilkan koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,99999 dan konstanta pergeseran Wien sebesar ($2,8965 \times 10^{-3}$) $\text{m}\cdot\text{K}$, yang menunjukkan kesesuaian numerik yang sangat baik dengan hukum tersebut. Kontribusi penelitian ini terletak pada penyajian pendekatan komputasional yang terukur dan dapat direproduksi untuk menghubungkan distribusi Planck, statistik Bose–Einstein, dan Hukum Pergeseran Wien dalam analisis radiasi benda hitam. Pendekatan ini juga berpotensi dimanfaatkan sebagai media pembelajaran fisika modern berbasis komputasi untuk membantu memahami hubungan antara temperatur dan spektrum radiasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Enders, P. (2021). Statistical mechanics and thermodynamics: Boltzmann's versus Planck's state definitions and counting. *Entropy*, 23(7), 875. <https://doi.org/10.3390/e23070875>
- Gomes, M. J. D., Simbolon, E. E. P., Lingga, L. I., Jannah, M., Batubara, R. S., Panggabean, D. D., & Sitinjak, L. (2025). Dualisme gelombang-partikel: Landasan teori, transformasi konsep ilmiah, dan implikasi pada fisika modern. *Kappa Journal*, 9(3), 393–403. <https://doi.org/10.29408/kpj.v9i3.32457>
- Nasution, H. A., Mesyadi, M., Kencana, M., Indriani, S., Amanda, E., Hutahuruk, S. A., Sari, R. I., Siregar, A. D., & Nasution, B. (2023). Analisis nilai efisiensi radiasi benda hitam dengan penerapan metode Simpson 1/3 menggunakan pemrograman Python. *EINSTEIN (e-Journal)*, 11(2). <https://doi.org/10.24114/eins.v11i2.46460>
- Pakes, A. G. (2021). Structural properties of generalised Planck distributions. *Journal of Statistical Distributions and Applications*, 8, 12. <https://doi.org/10.1186/s40488-021-00124-1>
- Spalek, J. (2020). The Bose-Einstein statistics: Remarks on Debye, Natanson, and Ehrenfest contributions and the emergence of indistinguishability principle for quantum particles. *Studia Historiae Scientiarum*, 19, 423–441. <https://doi.org/10.4467/2543702XSHS.20.013.12569>
- Widagda, I. G. A., Trisnawati, N. L. P., & Suharta, I. W. G. (2023). Perancangan aplikasi metode Newton-Raphson termodifikasi dalam pembuktian panjang gelombang maksimum pada Hukum Pergeseran Wien. *Buletin Fisika*.
- Yohakim, Y. R. R., Maodjud, S. H., Ngaga, E. J., Jufriansah, A., & Sahlan. (2024). Exploration of Wien Displacement Law: A fundamental concept in quantum physics. *Bincang Sains dan Teknologi*, 3(3), 85–96. <https://doi.org/10.56741/bst.v3i03.648>