

Visualisasi Komputasi Fungsi Gelombang dan Probabilitas Partikel Kuantum dalam Sumur Potensial Tak Hingga Satu Dimensi

Faizah Istisania⁽¹⁾, Vina Yanti⁽¹⁾, Hamdi Akhsan^{(1,a)*} dan Melly Ariska⁽¹⁾

⁽¹⁾Pendidikan Fisika, Universitas Sriwijaya, Indralaya, Indonesia, 30862

Email : ^(a*)hamdiakhsan@fkip.unsri.ac.id

Disubmisi: 25 November 2025, Direvisi: 22 Mei 2026, Diterima: 10 Juli 2026

Abstract.

Background: Wave functions and particle probability distributions in a one-dimensional infinite potential well can be visualized computationally.

Aims: This research aims to develop a computational visualization of wave functions and particle probability distributions in a one-dimensional infinite potential well.

Methods: The wave functions were obtained from the time-independent Schrödinger equation and visualized using Python with the NumPy and Matplotlib libraries.

Results: The simulation results show quantized energy levels, sinusoidal wave functions, and probability distributions that are always positive and depend on the quantum number. The visualization also demonstrates the relationship between wave function nodes and zero probability, as well as the increasing oscillation complexity at higher quantum numbers.

Conclusion: The results are consistent with quantum mechanics theory and indicate that the computational approach is effective for visualizing abstract concepts and clarifying the relationship between mathematical formulations and physical interpretations.

Keywords: Wave Function, Probability Distribution, Infinite Potential Well, Computational Simulation.

Abstrak.

Latar Belakang: Fungsi gelombang dan distribusi probabilitas partikel pada sumur potensial tak hingga satu dimensi dapat divisualisasikan secara komputasi.

Tujuan: Penelitian ini bertujuan mengembangkan visualisasi komputasi fungsi gelombang dan distribusi probabilitas partikel pada sumur potensial tak hingga satu dimensi.

Metode: Fungsi gelombang diperoleh dari persamaan Schrödinger tak bergantung waktu dan divisualisasikan menggunakan Python dengan *library* NumPy dan Matplotlib.

Hasil: Hasil simulasi menunjukkan tingkat energi yang terkuantisasi, bentuk fungsi gelombang sinusoidal, serta distribusi probabilitas yang selalu bernilai positif dan bergantung pada bilangan kuantum. Visualisasi juga memperlihatkan hubungan antara simpul fungsi gelombang dan probabilitas nol, serta meningkatnya kompleksitas osilasi pada bilangan kuantum yang lebih tinggi.

Kesimpulan: Hasil penelitian konsisten dengan teori mekanika kuantum dan menunjukkan bahwa pendekatan komputasi efektif untuk memvisualisasikan konsep abstrak serta memperjelas hubungan antara formulasi matematis dan interpretasi fisik.

Kata kunci: Fungsi Gelombang, Distribusi Probabilitas, Sumur Potensial Tak Hingga, Simulasi Komputasi.

PENDAHULUAN

Fisika kuantum merupakan pendekatan modern dalam memahami perilaku partikel pada skala atomik dan subatomik yang bersifat probabilistik [1]. Pendekatan ini berbeda secara fundamental dari fisika klasik yang memandang posisi dan momentum partikel dapat ditentukan secara pasti (deterministik) [2] serta menjelaskan fenomena pada objek makroskopik menggunakan hukum Newton dengan dimensi $R \geq 10^{-10} m$ [3]. Salah satu konsep utama dalam fisika kuantum adalah superposisi, yang menyatakan bahwa partikel dapat berada dalam lebih dari satu keadaan secara simultan [4]. Pada skala ini, deskripsi alam tidak lagi dapat dijelaskan sepenuhnya menggunakan pendekatan deterministik.

Prinsip ketidakpastian menegaskan bahwa posisi dan momentum partikel tidak dapat diukur secara bersamaan dengan ketelitian absolut [5]. Fenomena kuantum tersebut direpresentasikan melalui fungsi gelombang ψ , yang menggambarkan amplitudo probabilitas keberadaan partikel pada ruang dan waktu tertentu. Melalui fungsi gelombang, probabilitas temuan partikel dalam suatu posisi dapat diprediksi, meskipun fungsi gelombang itu sendiri tidak merepresentasikan wujud fisik partikel [1].

Salah satu model dasar dalam mekanika kuantum adalah sumur potensial tak hingga satu dimensi, di mana partikel memiliki tingkat energi diskrit dan fungsi gelombang yang memenuhi persamaan Schrödinger [6] [6]. Model ini penting untuk memahami kuantisasi energi, bentuk fungsi gelombang sinusoidal, jumlah simpul, dan distribusi probabilitas partikel. Namun, konsep-konsep tersebut sering sulit dipahami jika hanya disajikan dalam bentuk matematis.

Beberapa penelitian sebelumnya telah membahas solusi analitik maupun numerik persamaan Schrödinger serta visualisasi fungsi gelombang pada sistem sumur potensial satu dimensi [7,8,9]. Akan tetapi, sebagian besar penelitian masih berfokus pada aspek matematis tanpa visualisasi terintegrasi yang menunjukkan hubungan antara fungsi gelombang, distribusi probabilitas, jumlah simpul, dan perubahan bilangan kuantum secara interaktif. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan visualisasi komputasi yang lebih intuitif untuk mendukung pemahaman konsep dasar mekanika kuantum.

Dalam konteks tersebut, pendekatan komputasi menjadi penting karena mampu menggabungkan hukum fisika, metode numerik, dan pemrograman komputer untuk menyelesaikan permasalahan berbasis model matematis. Visualisasi komputasi memberikan cara yang lebih intuitif dalam memahami hubungan antara kuantisasi energi, bentuk fungsi gelombang, dan distribusi probabilitas. Selain itu, manipulasi parameter seperti panjang sumur dan bilangan kuantum memungkinkan karakteristik sistem kuantum dianalisis secara lebih mendalam.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan mengembangkan visualisasi komputasi fungsi gelombang ψ , dan distribusi probabilitas $|\psi|^2$ pada sumur potensial tak hingga satu dimensi menggunakan Python dengan library NumPy dan Matplotlib. Keterbaruan penelitian terletak pada integrasi solusi analitik dan visualisasi interaktif yang menunjukkan hubungan antara simpul fungsi gelombang, titik berprobabilitas nol, serta peningkatan kompleksitas osilasi seiring bertambahnya bilangan kuantum. Pendekatan ini diharapkan dapat

memperjelas hubungan antara formulasi matematis dan interpretasi fisik dalam mekanika kuantum.

METODE PENELITIAN

Model Fisis

Model penelitian menggunakan partikel dalam kotak satu dimensi yang diselesaikan secara analitik menggunakan persamaan Schrödinger tak bergantung waktu untuk memperoleh fungsi gelombang dan distribusi probabilitas partikel.

Simulasi Numerik

Simulasi dilakukan menggunakan Python dengan bantuan library NumPy untuk komputasi numerik dan Matplotlib untuk visualisasi grafik. Domain posisi $0 \leq x \leq L$ didiskretisasi menjadi grid numerik dengan parameter $L = 1$, bilangan kuantum $n = 1$ hingga $n = 5$, serta resolusi grid 1000–2000 titik. Tahapan simulasi meliputi penentuan parameter, pembangkitan grid posisi menggunakan linspace, perhitungan fungsi gelombang dan rapat probabilitas, serta visualisasi hasil dalam bentuk grafik.

Visualisasi

Visualisasi dilakukan dalam bentuk grafik dua dimensi untuk menampilkan fungsi gelombang dan distribusi probabilitas partikel pada berbagai nilai bilangan kuantum dan panjang kotak.

Validasi Model

Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil numerik terhadap solusi teoritis melalui kesesuaian bentuk fungsi gelombang, pemenuhan syarat batas pada dinding kotak, normalisasi probabilitas, serta perbandingan energi keadaan partikel. Hasil validasi menunjukkan bahwa simulasi numerik

sesuai dengan solusi teoritis dan dapat digunakan sebagai media visualisasi konsep mekanika kuantum.

HASIL DAN PEMBAHASAN

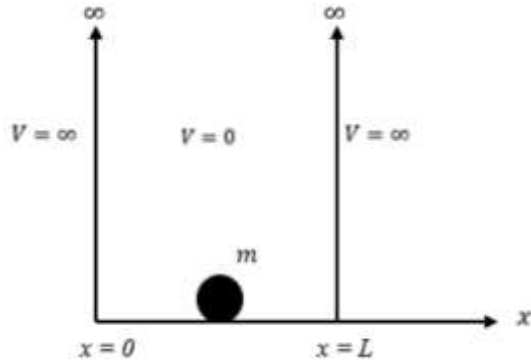
Persamaan Schrödinger merupakan persamaan fundamental yang mampu menyelesaikan permasalahan dalam skala mikroskopik. Persamaan ini menjelaskan keadaan objek mikro yang tidak dapat dijelaskan secara tuntas oleh mekanika klasik, salah satunya adalah perilaku partikel dalam kotak atau sumur potensial tak hingga [10]. Dalam mekanika kuantum, keadaan partikel dinyatakan oleh fungsi gelombang $\psi(x, t)$ yang memenuhi Persamaan Schrödinger. Untuk sistem stasioner (tidak bergantung waktu), digunakan bentuk persamaan Schrödinger tak-bergantung-waktu yang berperan sebagai persamaan eigen energi, yaitu:

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dx^2} + V(x) \right) \psi(x) = E \psi(x) \quad (1)$$

dengan keterangan: $\hbar$ adalah konstanta Planck tereduksi, m adalah massa partikel $V(x)$ adalah energi potensial, E adalah energi total partikel, dan $\psi(x)$ adalah fungsi gelombang yang hanya bergantung pada posisi [11].

Dalam sumur potensial tak berhingga, partikel hanya dapat bergerak bebas pada daerah $0 < x < L$. Di luar daerah tersebut potensial bernilai tak hingga ($V = \infty$), sehingga partikel sama sekali tidak mungkin berada di luar batas tersebut [12]. Secara matematis potensial ini dituliskan:

$$V(x) = \begin{cases} 0 \rightarrow 0 \leq x \leq L \\ \infty \rightarrow x < 0 \text{ atau } x > L \end{cases} \quad (2)$$



Gambar 1. Sebuah partikel yang bergerak bebas dalam kotak 1 dimensi.

Akibat potensial tak berhingga ini, nilai fungsi gelombang di luar domain kotak dipaksa bernilai nol sehingga probabilitas menemukan partikel di luar kotak adalah nol. Ilustrasi skematik dari model ini sering digambarkan sebagai partikel yang terperangkap” di antara dua dinding tak terpenetrasi (Gambar 1).

Karena $V(x)=0$ untuk $0 < x < L$, persamaan Schrödinger tak bergantung waktu menjadi sederhana:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2\psi(x)}{dx^2} + V(x) = E\psi(x) \quad (3)$$

atau ditulis ulang sebagai

$$\frac{d^2\psi(x)}{dx^2} = -k^2\psi(x), \quad k = \sqrt{\frac{2mE}{\hbar^2}} \quad (4)$$

Persamaan diferensial ini memiliki solusi umum berupa kombinasi sinus dan cosinus:

$$\psi(x) = A \sin(kx) + B \cos(kx) \quad (5)$$

di mana A dan B adalah konstanta yang ditentukan dari syarat batas fisik.

Syarat batas hasil dari potensial tak berhingga adalah $\psi(x)=0$ dan $\psi(L)=0$. Syarat $\psi(x)=0$ mengharuskan $B=0$, sehingga bentuk fungsi gelombang di dalam kotak menjadi:

$$\psi(x) = A \sin(kx) \quad (6)$$

Syarat $\psi(L)=0$ memberikan kondisi:

$$\sin(kL) = 0 \rightarrow kL = n\pi, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (7)$$

Dengan demikian k menjadi terkuantisasi $k = n\pi/L$ dan substitusi ke hubungan $k = \sqrt{2mE}/\hbar$ menghasilkan nilai energi diskrit:

$$E_n = \frac{n^2 \pi^2 \hbar^2}{2mL^2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (8)$$

Hasil ini menunjukkan bahwa energi partikel di dalam sumur potensial tak berhingga tidak kontinu seperti pada mekanika klasik, melainkan terdiskritisasi sesuai bilangan kuantum n . Nilai $n=1$ disebut keadaan dasar (ground state), sedangkan $n < 1$ merupakan keadaan tereksitasi [13].

Agar $\psi_n(x)$ memiliki makna probabilistik, fungsi gelombang harus dinormalisasi sehingga total probabilitas menemukan partikel di seluruh domain $[0, L]$ bernilai satu:

$$\int_0^L |\psi_n(x)|^2 dx = 1$$

Dengan memasukkan bentuk $\psi(x) = A \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right)$ dan menghitung

integral normalisasi diperoleh konstanta $A = \sqrt{2/L}$. Oleh karena itu fungsi gelombang ternormalisasi bagi keadaan n adalah:

$$\psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{L}} \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right), \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (9)$$

Kuadrat nilai absolut fungsi gelombang $|\psi_n(x)|^2$, merepresentasikan rapat probabilitas keberadaan partikel pada posisi x . Semakin besar $|\psi_n(x)|^2$, semakin besar peluang partikel ditemukan pada posisi tersebut [14]. Probabilitas menemukan partikel pada interval $[a, b] \subset [0, L]$ dinyatakan sebagai integral rapat probabilitas:

$$P(a \leq x \leq b) = \int_a^b |\psi_n(x)|^2 dx \quad (10)$$

Distribusi $|\psi_n(x)|^2$ bergantung pada bilangan kuantum n . Keadaan dasar $n=1$ membentuk satu setengah gelombang tanpa nodus internal, sedangkan keadaan tereksitasi memiliki jumlah nodus yang meningkat sehingga pola probabilitas menjadi lebih kompleks [15]. Hubungan antara bentuk fungsi gelombang, tingkat energi, dan distribusi probabilitas inilah yang menjadi dasar visualisasi komputasi dalam penelitian ini.

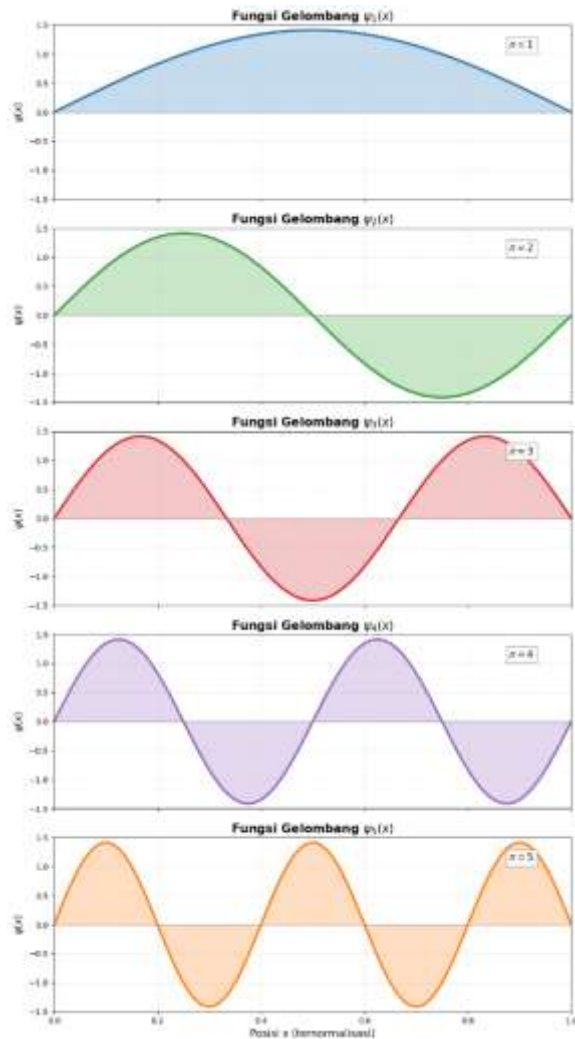
Hasil Visualisasi Fungsi Gelombang

Simulasi komputasi pada Gambar 2 berhasil memvisualisasikan fungsi gelombang $\psi_n(x)$ untuk bilangan kuantum ($n=1$) hingga ($n=5$). Hasil menunjukkan bahwa peningkatan bilangan kuantum menghasilkan pola osilasi gelombang yang semakin kompleks. Keadaan dasar $n=1$ membentuk satu setengah gelombang tanpa simpul (node) di dalam kotak. Pola ini

menunjukkan bahwa jumlah simpul selalu mengikuti hubungan $(n-1)$, sehingga dapat digunakan sebagai indikator tingkat energi partikel.

Visualisasi juga memperlihatkan perubahan tanda amplitudo fungsi gelombang pada beberapa daerah. Nilai positif dan negatif tersebut tidak menunjukkan probabilitas negatif, melainkan fase gelombang kuantum. Pergantian fase menjadi semakin sering seiring bertambahnya n , yang menandakan meningkatnya energi dan frekuensi osilasi partikel di dalam sumur potensial.

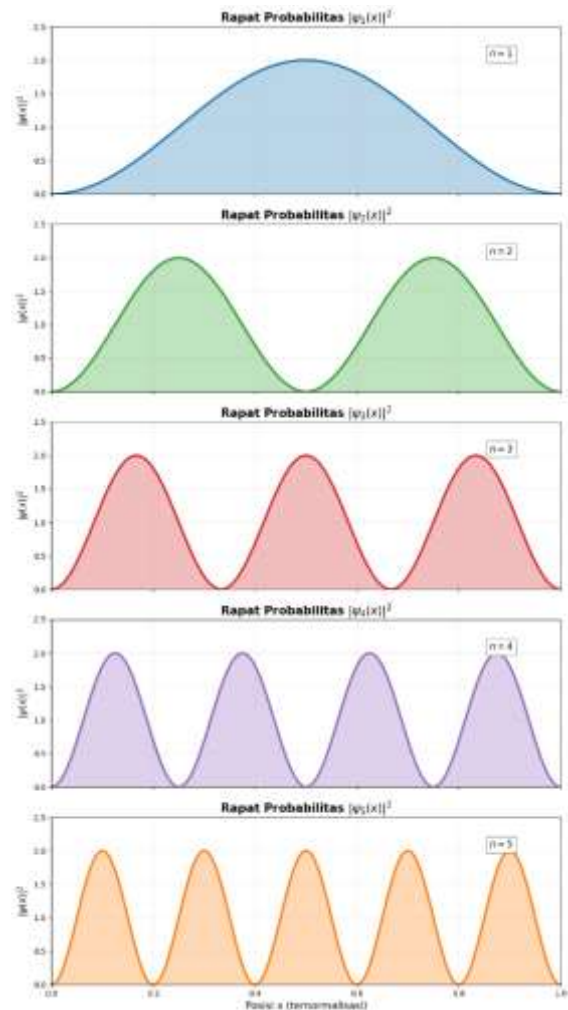
Amplitudo maksimum setiap grafik tampak relatif konsisten pada rentang $-1.5 \leq \psi(x) \leq 1.5$, menunjukkan bahwa fungsi gelombang telah ternormalisasi dengan baik, yang memastikan total probabilitas keberadaan partikel di dalam sumur bernilai satu. Selain memenuhi syarat normalisasi, seluruh fungsi gelombang juga bernilai nol di batas $x=0$ dan $x=L$, sesuai syarat batas sumur potensial tak hingga.



Gambar 2. Visualisasi fungsi gelombang $\psi_n(x)$ untuk $n = 1$ sampai $n = 5$.

Secara keseluruhan, Gambar 2 menunjukkan hubungan antara peningkatan bilangan kuantum dengan bertambahnya jumlah osilasi dan simpul fungsi gelombang, sehingga bentuk spasial gelombang menjadi semakin kompleks pada tingkat energi yang lebih tinggi.

Hasil Visualisasi Distribusi Probabilitas



Gambar 3. Visualisasi rapat probabilitas $|\psi_n(x)|^2$ untuk untuk $n = 1$ sampai $n = 5$.

Gambar 5 menunjukkan bahwa peningkatan bilangan kuantum n menyebabkan jumlah puncak rapat probabilitas $|\psi_n(x)|^2$ bertambah mengikuti nilai n . Pada keadaan dasar ($n=1$), probabilitas maksimum terletak di tengah kotak, sedangkan pada keadaan eksitasi jumlah puncak meningkat secara bertahap hingga lima puncak pada ($n=5$). Hasil ini menegaskan bahwa perubahan tingkat energi secara langsung memengaruhi pola

distribusi peluang partikel di dalam kotak potensial.

Selain itu, semakin besar nilai n , distribusi probabilitas menunjukkan pola osilasi yang semakin rapat dengan lebih banyak titik minimum [16]. Kondisi ini mengindikasikan bahwa partikel pada tingkat energi tinggi memiliki variasi posisi yang lebih kompleks dibandingkan keadaan dasar. Dengan demikian, visualisasi rapat probabilitas tidak hanya memperlihatkan lokasi peluang maksimum partikel, tetapi juga menunjukkan pengaruh kenaikan energi terhadap karakter distribusi spasial partikel.

Tabel 1. Karakteristik kuantum partikel dalam sumur potensial tak hingga satu dimensi untuk berbagai bilangan kuantum (n).

n	Energi (eV)	Jumlah simpul	Jumlah puncak	Posisi puncak
1	1.0	0	1	0.5000
2	4.0	1	2	0.2500
3	9.0	2	3	0.1667
4	16.0	3	4	0.1250
5	25.0	4	5	0.1000

Tabel 1 menunjukkan bahwa energi partikel mengikuti hubungan kuadratik terhadap bilangan kuantum n , sehingga kenaikan n menghasilkan lonjakan energi yang semakin besar. Sebagai contoh, energi pada $n = 5$ mencapai atau 25 kali lipat energi keadaan dasar ($n = 1$), sedangkan jumlah puncak rapat probabilitas bertambah sebesar n . Hasil ini menunjukkan bahwa keadaan energi tinggi menghasilkan pola distribusi probabilitas yang semakin berosilasi dan kompleks.

Distribusi probabilitas juga memperlihatkan perubahan lokasi peluang maksimum partikel seiring peningkatan n . Pada $x = 0,5000$, sedangkan pada keadaan ($n = 5$), puncak distribusi bergeser mendekati tepi kotak, yaitu pada $x = 0,1000$. Perubahan ini menunjukkan bahwa

kenaikan energi memengaruhi karakteristik spasial partikel di dalam sumur potensial.

Perbandingan antara $\psi_n(x)$ dan $|\psi_n(x)|^2$ menunjukkan bahwa setiap titik simpul fungsi gelombang selalu berkorespondensi dengan probabilitas nol. Fenomena ini menjadi ciri khas sistem kuantum yang tidak dijumpai pada mekanika klasik [17].

Secara keseluruhan, hasil simulasi numerik berhasil memvalidasi solusi analitik persamaan Schrödinger untuk sumur potensial tak hingga satu dimensi. Simulasi tidak hanya menunjukkan kuantisasi energi $E_n \propto n^2$ tetapi juga memperjelas hubungan antara bentuk fungsi gelombang dan distribusi probabilitas partikel. Penggunaan Python dengan bantuan NumPy dan Matplotlib terbukti efektif untuk menganalisis serta memvisualisasikan karakteristik sistem kuantum secara lebih intuitif dan terukur [18].

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil memvalidasi solusi analitik persamaan Schrödinger pada model sumur potensial tak hingga satu dimensi melalui simulasi komputasi menggunakan Python. Hasil penelitian menunjukkan bahwa energi partikel bersifat terkuantisasi ($E_n \propto n^2$), fungsi gelombang berbentuk sinusoidal dengan jumlah simpul bergantung pada bilangan kuantum, serta rapat probabilitas menggambarkan distribusi keberadaan partikel di dalam sumur potensial. Visualisasi numerik juga memperlihatkan kesesuaian antara titik simpul fungsi gelombang dan probabilitas nol. Dengan demikian, pendekatan komputasi berbasis NumPy dan Matplotlib terbukti efektif untuk memvisualisasikan dan memperjelas konsep-konsep dasar mekanika kuantum secara lebih intuitif dan terukur.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] N. Gunantara, A. A. N. Gunawan, I. G. A. A. Ratnawati, I. G. A. P. Adnyana, and N. Wendri, *Fisika Modern: Misteri Alam Semesta dan Teori Keajaiban Quantum*. bali: Mutiara Intelektual Indonesia Press, 2024.
- [2] M. A. Kamal and F. S, “Antara Teori dan Realitas : Refleksi Filosofis dan Interpretasi Kosmologi Kuantum,” *INSOLOGI Junal Sains dan Teknol.*, vol. 4, no. 1, pp. 44–57, 2025.
- [3] M. Taufiq and I. Kaniawati, “Mekanika Newtonian dan Signifikansi Filosofisnya,” *J. Filsafat Indones.*, vol. 6, no. 2, pp. 246–257, 2023.
- [4] M. A. Man and V. I. Man, “Probability Distributions Describing Qubit-State Superpositions,” *Entropy*, vol. 25, no. 10, pp. 1–17, 2023.
- [5] H. Akhsan, T. Ramadhona, M. Lestari, D. R. Oktavia, and R. Hafitri, “Implementasi Fomalisme: Prinsip Ketidakpastian Heisenberg dan Notasi Dirac dalam Teknologi Modern,” *J. Teor. dan Apl. Fis.*, vol. 13, no. 02, pp. 123–132, 2025.
- [6] N. Tuljannah, I. Setiawan, D. Desy, H. Putri, P. Fisika, and U. Bengkulu, “Fase Dan Potensial Adiabatik Pada Sistem Kuantum Dengan Sumur Potensial Berhingga,” *Navig. Phys. J. Phys. Educ.*, vol. 6, pp. 138–147, 2024.
- [7] W. W. Kui and Chris, “Solving 3D Time Independent Schrodinger Equation Using Numerical Method,” pp. 1–60, 2021.
- [8] A. M. Halpern, Y. Ge, and E. D. Glendening, “Visualizing Solutions of the One-Dimensional Schrödinger Equation Using,” *J. Chem. Educ.*, no. 99, pp. 3053–3060, 2022.
- [9] M. Ostrowski, “Application of the QDST algorithm for the Schrödinger particle simulation in the infinite potential well,” *EPJ Quantum Technol.*, 2024.
- [10] A. Beiser, “Concepts of Modern Physics (Clear, but error-prone),” *Am. J. Phys.*, vol. 33, no. 8, p. 667, 1965.
- [11] A. S. G. Dima, H. f Lalus, and Fakhruddin, “Review Nilai Rata-Rata Operator Gaya Potensial Step Pada Partikel Satu Dimensi Dalam Tinjauan Persamaan Schrödinger, Klein-Fock-Gordon, Dan Dirac,” *J. Online Physic*, vol. 9, no. 2, pp. 112–121, 2024.
- [12] U. Isdamayanti and D. Wulandari, “Einstein (E-Journal) Simulasi Sumur Potensial Tak Hingga Dengan Metode Numerov Berbasis Gui (Graphical User Interface) Matlab,” *J. Has. Penelit. Bid. Fis.*, vol. 9, no. 3, pp. 1–5, 2021.
- [13] A. H. K. Amrulloh, “Studi Persamaan Klein-Gordon Dan Persamaan Dirac Dalam Sumur Potensial Persegi Ganda Simetri,” Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim, 2021.
- [14] U. Rufaidha, “Studi Efisiensi Mesin Carnot Kuantum Berbasis Sistem 2

- Partikel Simetri Dan Antisimetri Dalam Sumur Potensial 1 Dimensi,” Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang, 2023.
- [15] E. . Jafarov, “Exact quantum-mechanical solution for the one-dimensional harmonic oscillator model asymmetrically confined into the infinite well,” *Phys. E Low-dimensional Syst. Nanostructures*, vol. 139, no. 115160, 2022.
- [16] I. G. A. Widagda, I. N. Artawan, W. G. Suharta, and I. G. Antha Kasmawan, “Solusi Persamaan Schrodinger Tidak Bergantung Waktu Dengan Metode Finite Difference,” *J. Fis. Flux J. Ilm. Fis. FMIPA Univ. Lambung Mangkurat*, vol. 21, no. 3, p. 231, 2025.
- [17] A. M. Nugraha, “Modelling the Tunneling in 1D Schrodinger Equation Using Graphical User Interface,” *Navigation Physics: Journal of Physics Education*, vol. 7, no. 1, 2025.
- [18] H. Akhsan, M. Ariska, N. K. Lekati, and Z. Ayanna, “De Broglie Waves In Electron Microscopy : Contributions To Atomic-Scale Visualization And Material Characterization – A Prisma Based Review,” vol. 10, no. 2, pp. 40–47, 2025.

