



Peningkatan Pemahaman Konseptual Mahasiswa pada Materi Partikel dalam Kotak Tiga Dimensi melalui Simulasi *Schrödinger* 3D Berbasis Web

Ines Julwana Telaumbanua^{1*}, Rut Walle Lisna Telaumbanua¹, Cantika Maria W Seran¹, Howard Situmorang¹, Dewi Wulandari¹, Yuni Warty¹

¹ Pendidikan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Medan, Indonesia.

DOI: <https://doi.org/10.29303/goescienceed.v7i2.1784>

Article Info:

Received : 18 Maret 2026
Revised : 27 Maret 2026
Accepted : 18 April 2026
Published : 23 April 2026

Correspondence:

Ines Julwana Telaumbanua

Phone:

Abstract: This study aims to analyze the improvement of students' conceptual understanding of energy and wave functions in a three-dimensional particle-in-a-box system through the use of a web-based Schrödinger 3D simulation. This research employed a quantitative approach with a one-group pretest-posttest design involving 20 physics students. The instrument used was a conceptual understanding test administered in the form of pretest and posttest. Data were analyzed using descriptive quantitative analysis and the Normalized Gain calculation. The results showed a significant improvement in students' understanding. The average pretest score of 5.9 (39.3%) increased to 14 (93.3%) in the posttest. The N-Gain value of 0.89 was categorized as high, indicating that the web-based simulation is highly effective in enhancing students' conceptual understanding. Based on questionnaire responses, the simulation was found to effectively visualize abstract concepts, increase learning engagement, and facilitate understanding of the relationship between energy, wave functions, and quantum numbers. However, several limitations were identified, particularly in the deeper understanding of wave functions and the need for further feature development. Therefore, the use of a web-based Schrödinger 3D simulation can serve as an effective alternative learning medium to improve students' conceptual understanding in abstract quantum mechanics topics.

Keywords: Schrödinger 3D Simulation; Quantum Mechanics; Three-Dimensional Particle In A Box; Wave Function; Physics Visualization.

Citation: Julwana Telaumbanua, I., Telaumbanua, R. W. L., Seran, C. M. W., Situmorang, H., Wulandari, D., & Warty, Y. (2026). Peningkatan Pemahaman Konseptual Mahasiswa pada Materi Partikel dalam Kotak Tiga Dimensi melalui Simulasi Schrödinger 3D Berbasis Web. *Jurnal Pendidikan, Sains, Geologi, Dan Geofisika (GeoScienceEd Journal)*, 7(2), 992-1002. <https://doi.org/10.29303/goescienceed.v7i2.1784>

Pendahuluan

Mekanika kuantum merupakan salah satu cabang penting dalam fisika modern yang digunakan untuk menjelaskan perilaku partikel pada skala atom dan subatom. Berbeda dengan mekanika klasik yang mampu menjelaskan fenomena makroskopik secara deterministik, mekanika kuantum memperkenalkan konsep-konsep baru seperti kuantisasi energi, dualisme gelombang-partikel, serta probabilitas keberadaan partikel. Teori ini menjadi dasar bagi berbagai perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi modern seperti fisika atom, fisika nuklir, material

semikonduktor, serta teknologi kuantum (Ye, 2024). Meskipun memiliki peranan yang sangat penting, pembelajaran mekanika kuantum sering dianggap sulit oleh mahasiswa. Kesulitan ini disebabkan oleh sifat konsep mekanika kuantum yang sangat abstrak serta melibatkan formulasi matematis yang cukup kompleks (Purtscher et al., 2024).

Banyak mahasiswa mampu menyelesaikan persoalan matematis, namun belum sepenuhnya memahami makna fisis dari persamaan yang digunakan (Espinoza et al., 2023). Kondisi ini menunjukkan bahwa pemahaman konseptual mahasiswa terhadap konsep-

Email: inesjulwana@gmail.com

konsep dasar mekanika kuantum masih perlu ditingkatkan.

Hasil penelitian oleh Espinoza et al. (2023) menunjukkan bahwa pada tahap awal pembelajaran, persentase jawaban benar mahasiswa pada beberapa konsep dualisme gelombang-partikel masih berada di bawah 50%, yang mengindikasikan rendahnya pemahaman konseptual. Namun, setelah diterapkan pembelajaran menggunakan media didaktik, terjadi peningkatan pemahaman yang ditunjukkan oleh persentase jawaban benar yang mencapai 70–90%. Temuan ini mengindikasikan bahwa penggunaan media pembelajaran efektif dalam membantu mahasiswa memahami konsep mekanika kuantum yang bersifat abstrak.

Salah satu konsep penting dalam mekanika kuantum yang perlu dipahami adalah hubungan antara energi dan fungsi gelombang. Dalam sistem kuantum, energi suatu partikel tidak bersifat kontinu seperti pada mekanika klasik, tetapi hanya dapat memiliki nilai-nilai tertentu yang disebut energi terkuantisasi (Hardiyati et al., 2022). Keadaan suatu partikel dalam sistem kuantum dinyatakan melalui fungsi gelombang yang menggambarkan informasi mengenai sistem tersebut (Abbas, 2023). Fungsi gelombang tidak secara langsung menunjukkan posisi partikel, tetapi berkaitan dengan probabilitas keberadaan partikel pada suatu posisi tertentu. Oleh karena itu, pemahaman mengenai hubungan antara energi, fungsi gelombang, dan probabilitas merupakan bagian penting dalam mempelajari mekanika kuantum.

Namun dalam praktik pembelajaran, mahasiswa sering mengalami kesulitan dalam memahami hubungan antara konsep-konsep tersebut. Kesulitan tersebut antara lain berkaitan dengan interpretasi fungsi gelombang, pemahaman mengenai bilangan kuantum, serta hubungan antara bentuk fungsi gelombang dan tingkat energi suatu sistem. Selain itu, konsep mekanika kuantum sering disajikan dalam bentuk persamaan matematis tanpa didukung oleh visualisasi yang memadai sehingga mahasiswa kesulitan menghubungkan representasi matematis dengan makna fisisnya.

Meskipun demikian, penelitian sebelumnya umumnya masih terbatas pada penggunaan visualisasi dua dimensi atau belum secara spesifik mengintegrasikan konsep energi, fungsi gelombang, dan probabilitas dalam satu media pembelajaran yang interaktif (Figueiras et al., 2019; Karomah et al., 2021). Selain itu, kajian yang secara khusus membahas pemahaman konseptual mahasiswa pada model partikel dalam kotak tiga dimensi berbasis simulasi interaktif masih relatif terbatas. Oleh karena itu, diperlukan pengembangan media pembelajaran yang mampu menghadirkan visualisasi tiga dimensi secara

interaktif untuk membantu mahasiswa memahami hubungan antara energi, fungsi gelombang, dan distribusi probabilitas secara lebih komprehensif.

Salah satu model yang sering digunakan untuk mempelajari konsep dasar mekanika kuantum adalah model partikel dalam kotak. Model ini menggambarkan suatu partikel yang terkurung dalam daerah tertentu dengan batas potensial yang sangat besar sehingga partikel tidak dapat keluar dari daerah tersebut (Widagda et al., 2025). Di dalam kotak, partikel dianggap bergerak bebas tanpa pengaruh energi potensial, sedangkan pada batas kotak energi potensialnya dianggap tak hingga. Kondisi ini menyebabkan partikel hanya dapat berada di dalam kotak dan tidak dapat melewati batasnya.

Pada kasus tiga dimensi, partikel dianggap berada dalam suatu kotak yang memiliki panjang tertentu pada masing-masing arah koordinat ruang, yaitu sumbu x , y , dan z . Keadaan partikel dalam sistem tersebut dinyatakan oleh fungsi gelombang yang bergantung pada ketiga koordinat ruang tersebut. Setiap keadaan partikel ditentukan oleh tiga bilangan kuantum yang berkaitan dengan masing-masing arah ruang. Bilangan kuantum tersebut menentukan bentuk fungsi gelombang serta nilai energi yang dimiliki oleh partikel dalam sistem tersebut (Firmansyah et al., 2025). Model partikel dalam kotak tiga dimensi memberikan gambaran sederhana mengenai bagaimana energi sistem menjadi terkuantisasi serta bagaimana distribusi probabilitas partikel dapat ditentukan melalui fungsi gelombang.

Dasar teoritis dari model partikel dalam kotak berasal dari persamaan Schrödinger yang merupakan persamaan fundamental dalam mekanika kuantum. Persamaan ini digunakan untuk menggambarkan keadaan suatu sistem kuantum melalui fungsi gelombang yang bergantung pada koordinat ruang (Sarwono, 2024). Untuk sistem tiga dimensi yang tidak bergantung pada waktu, persamaan Schrödinger dapat dinyatakan sebagai berikut.

Sistem partikel dalam kotak tiga dimensi dianalisis menggunakan persamaan Schrödinger tak bergantung waktu, yaitu :

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2\psi + V\psi = E\psi$$

Dengan: ψ = fungsi gelombang, m = massa partikel, V = energi potensial, E = energi partikel.

Potensial Partikel dalam Kotak

Pada model partikel dalam kotak, energi potensial didefinisikan sebagai

$$V(x, y, z) = \begin{cases} 0 & 0 < x < L, 0 < y < L, 0 < z < L \\ \infty & \text{di luar kotak} \end{cases}$$

Karena di dalam kotak $V = 0$ maka dari (1) persamaan Schrödinger menjadi:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi = E \psi$$

Operator Laplace dalam koordinat Kartesius adalah:

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

Sehingga dari (2.1) dan (2.2) diperoleh:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} \right) = E \psi$$

Metode Separasi Variabel

Fungsi gelombang diasumsikan dapat dipisahkan menjadi

$$\psi(x, y, z) = X(x)Y(y)Z(z)$$

Turunan kedua dari (3) menjadi :

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = YZ \frac{d^2 X}{dx^2}$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = XZ \frac{d^2 Y}{dy^2}$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = XY \frac{d^2 Z}{dz^2}$$

Substitusi ke persamaan Schrödinger menghasilkan

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \left(YZ \frac{d^2 X}{dx^2} + XZ \frac{d^2 Y}{dy^2} + XY \frac{d^2 Z}{dz^2} \right) = EXYZ$$

Kemudian dari (3.4) dibagi dengan XYZ , diperoleh :

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{1}{X} \frac{d^2 X}{dx^2} + \frac{1}{Y} \frac{d^2 Y}{dy^2} + \frac{1}{Z} \frac{d^2 Z}{dz^2} \right) = E$$

Pemisahan Persamaan

Dari (3.5), Setiap suku hanya bergantung pada satu variabel sehingga diperoleh

$$\frac{1}{X} \frac{d^2 X}{dx^2} = -k_x^2$$

$$\frac{1}{Y} \frac{d^2 Y}{dy^2} = -k_y^2$$

$$\frac{1}{Z} \frac{d^2 Z}{dz^2} = -k_z^2$$

yang menghasilkan tiga persamaan diferensial

$$\frac{d^2 X}{dx^2} + k_x^2 X = 0$$

$$\frac{d^2 Y}{dy^2} + k_y^2 Y = 0$$

$$\frac{d^2 Z}{dz^2} + k_z^2 Z = 0$$

$$E = \frac{\hbar^2}{2m} (k_x^2 + k_y^2 + k_z^2)$$

Ini menghubungkan konstanta separasi dengan energi sistem.

Solusi Persamaan Diferensial

Karena fungsi gelombang harus memenuhi kondisi batas :

$$\psi(0) = 0, \psi(L) = 0, \text{ diperoleh}$$

$$k_x = \frac{n_x \pi}{L}, k_y = \frac{n_y \pi}{L}, k_z = \frac{n_z \pi}{L}, n_x, n_y, n_z = 1, 2, 3, \dots (5)$$

Solusi umum untuk persamaan tersebut adalah

$$X(x) = A \sin(k_x x) + B \cos(k_x x)$$

Namun karena fungsi gelombang harus nol pada batas kotak

$$\psi(0) = 0, \psi(L) = 0$$

maka diperoleh

$$X(x) = A \sin\left(\frac{n_x \pi x}{L}\right)$$

Demikian juga untuk arah y dan z

$$Y(y) = B \sin\left(\frac{n_y \pi y}{L}\right)$$

$$Z(z) = C \sin\left(\frac{n_z \pi z}{L}\right)$$

dengan

$$n_x, n_y, n_z = 1, 2, 3, \dots$$

Fungsi Gelombang Partikel dalam Kotak 3D

Dari (5.2), (5.3), dan (5.4), Fungsi gelombang total diperoleh dari perkalian ketiga solusi (6) dibawah ini :

$$\psi_{n_x, n_y, n_z}(x, y, z) = \sqrt{\frac{8}{L^3}} \sin\left(\frac{n_x \pi x}{L}\right) \sin\left(\frac{n_y \pi y}{L}\right) \sin\left(\frac{n_z \pi z}{L}\right)$$

Agar fungsi gelombang memenuhi kondisi normalisasi $\int |\psi|^2 dV = 1$ dari sini diperoleh konstanta $\sqrt{\frac{8}{L^3}}$ yang muncul pada fungsi gelombang.

Energi Partikel dalam Kotak Tiga Dimensi

Energi total merupakan penjumlahan kontribusi dari masing-masing arah

$$E = \frac{\hbar^2}{2m} (k_x^2 + k_y^2 + k_z^2)$$

Karena

$$k_x = \frac{n_x \pi}{L}, k_y = \frac{n_y \pi}{L}, k_z = \frac{n_z \pi}{L}$$

maka diperoleh persamaan energi

$$E_{n_x, n_y, n_z} = \frac{\hbar^2 \pi^2}{2mL^2} (n_x^2 + n_y^2 + n_z^2)$$

atau dalam bentuk menggunakan h

$$E_{n_x, n_y, n_z} = \frac{h^2}{8mL^2} (n_x^2 + n_y^2 + n_z^2)$$

dengan n_x, n_y, n_z adalah bilangan kuantum yang menentukan tingkat energi partikel.

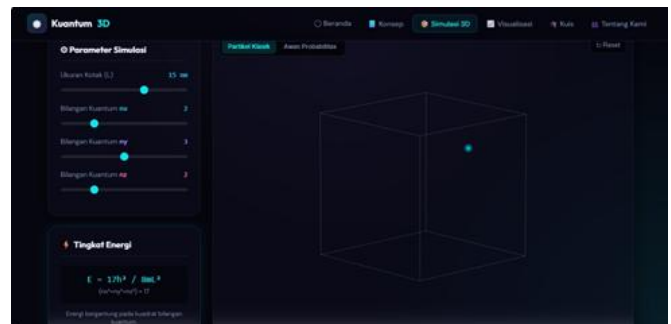
Metode

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan desain one group pretest-posttest yang bertujuan untuk menganalisis pemahaman konseptual mahasiswa pada materi energi dan fungsi gelombang partikel dalam kotak tiga dimensi dalam kajian Fisika Kuantum. Subjek dalam penelitian ini terdiri dari 20 mahasiswa Jurusan Fisika dari berbagai stambuk 2016 hingga 2022. Pemilihan responden dilakukan dengan teknik purposive sampling, yaitu pemilihan sampel secara sengaja berdasarkan kriteria tertentu, yakni mahasiswa yang telah mempelajari atau memiliki pengetahuan dasar mengenai materi Fisika Kuantum.

Instrumen yang digunakan dalam penelitian ini berupa tes pemahaman konseptual yang terdiri atas soal pretest dan posttest. Instrumen tersebut terlebih dahulu diuji validitasnya melalui validasi ahli (expert judgment) oleh dosen bidang Fisika Kuantum untuk

memastikan kesesuaian butir soal dengan indikator konsep yang diukur. Selain itu, uji reliabilitas instrumen dilakukan untuk mengetahui konsistensi butir soal yang dianalisis menggunakan koefisien Cronbach's Alpha pada data pretest. Hasil uji menunjukkan bahwa instrumen yang digunakan memiliki tingkat konsistensi yang memadai sehingga layak digunakan dalam penelitian.

Pengumpulan data dilakukan melalui beberapa tahap. Tahap pertama adalah pemberian pretest kepada responden untuk mengetahui tingkat pemahaman awal mahasiswa mengenai konsep energi dan fungsi gelombang partikel dalam kotak tiga dimensi sebelum menggunakan media pembelajaran. Selanjutnya, responden diberikan kesempatan untuk mempelajari materi melalui web simulasi Schrödinger 3D yang dikembangkan sebagai media pembelajaran interaktif. Tampilan media simulasi berbasis web yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Tampilan simulasi Schrödinger 3D berbasis web pada materi partikel dalam kotak tiga dimensi

Setelah proses penggunaan simulasi selesai, responden diminta untuk mengerjakan posttest guna mengetahui perubahan pemahaman konseptual setelah menggunakan media simulasi tersebut. Data yang diperoleh dari hasil pretest dan posttest kemudian dianalisis menggunakan analisis deskriptif kuantitatif dengan membandingkan nilai rata-rata sebelum dan sesudah penggunaan simulasi. Selain itu, peningkatan pemahaman konseptual mahasiswa juga dianalisis menggunakan Normalized Gain (N-Gain) yang dihitung dengan rumus:

$$g = \frac{Posttest - Pretest}{Skor Maksimum - Pretest}$$

Di mana N-Gain menyatakan tingkat peningkatan, *Posttest* merupakan skor setelah pembelajaran, dan *Pretest* merupakan skor sebelum pembelajaran. Nilai N-Gain yang diperoleh selanjutnya diklasifikasikan ke dalam tiga kategori, yaitu tinggi ($g \geq 0,7$), sedang ($0,3 \leq g < 0,7$), dan rendah ($g < 0,3$) untuk

mengetahui tingkat peningkatan pemahaman konseptual mahasiswa setelah menggunakan simulasi berbasis web.

Hasil dan Diskusi

Hasil Pretest

Hasil pretest digunakan untuk mengetahui bagaimana tingkat pemahaman awal responden sebelum penggunaan media pembelajaran berbasis web. Penelitian ini melibatkan 20 responden dengan jumlah

soal sebanyak 15 butir, sehingga total kemungkinan jawaban adalah 300.

Berdasarkan hasil pretest, diperoleh 118 jawaban benar (39,3%) dan 182 jawaban salah (60,7%). Rata-rata nilai pretest responden diperoleh sebesar 5,9 dari skor maksimum 15, yang dihitung dari total jawaban benar (118) dibagi jumlah responden (20). Hal ini menunjukkan bahwa secara rata-rata responden hanya mampu menjawab kurang dari setengah jumlah soal dengan benar.

Tabel 1. Hasil Pretest Pemahaman Responden

No	Nama Responden	Skor	Persentase (%)	Pretest
1	R1	5	33.3%	
2	R2	7	46.6%	
3	R3	6	40%	
4	R4	8	53.3%	
5	R5	5	33.3%	
6	R6	4	26.6%	
7	R7	5	33.3%	
8	R8	4	26.6%	
9	R9	4	26.6%	
10	R10	7	46.6%	
11	R11	4	26.6%	
12	R12	6	40%	
13	R13	5	33.3%	
14	R14	10	66.6%	
15	R15	5	33.3%	
16	R16	7	46.6%	
17	R17	6	40%	
18	R18	7	46.6%	
19	R19	6	40%	
20	R20	7	46.6%	
Jumlah Keseluruhan		118	39.3%	

Secara konseptual, hasil tersebut mengindikasikan bahwa pemahaman awal mahasiswa terhadap konsep energi dan fungsi gelombang dalam mekanika kuantum masih tergolong rendah. Mahasiswa cenderung belum mampu memahami hubungan antara energi terkuantisasi dengan bentuk fungsi gelombang serta interpretasi probabilitas keberadaan partikel. Selain itu, rendahnya skor juga menunjukkan bahwa mahasiswa masih mengalami kesulitan dalam menghubungkan representasi matematis dengan makna fisisnya, yang merupakan karakteristik umum dalam pembelajaran mekanika kuantum yang bersifat abstrak.

Kondisi ini menunjukkan bahwa sebelum diberikan perlakuan, sebagian besar mahasiswa masih berada pada tahap pemahaman yang terbatas dan memerlukan bantuan visualisasi atau media pembelajaran yang lebih interaktif untuk membantu

membangun pemahaman konseptual yang lebih baik. Hasil tersebut menunjukkan bahwa tingkat pemahaman awal responden terhadap konsep partikel dalam kotak tiga dimensi masih tergolong rendah. Hal ini terlihat dari dominannya jumlah jawaban salah dibandingkan jawaban benar, serta nilai rata-rata yang masih berada di bawah setengah dari skor maksimum. Kondisi ini mengindikasikan bahwa sebagian besar responden belum memahami konsep dasar secara optimal sebelum diberikan perlakuan menggunakan media pembelajaran.

Persentase:

$$\text{Persentase} = \frac{\text{Jumlah}}{\text{Total}} \times 100\%$$

Hasil Posttest

Hasil posttest digunakan untuk mengukur tingkat pemahaman responden setelah menggunakan media pembelajaran berbasis web yang telah dikembangkan. Setelah penggunaan media simulasi berbasis web, hasil posttest menunjukkan adanya peningkatan pemahaman mahasiswa. Jumlah jawaban benar meningkat menjadi 93,3%, dengan rata-rata nilai posttest sebesar 14 dari skor maksimum 15. Hal ini menunjukkan bahwa sebagian besar responden telah mencapai tingkat pemahaman yang sangat baik setelah penggunaan media pembelajaran. Berdasarkan hasil posttest, diperoleh 280 jawaban benar (93,3%) dan 20 jawaban salah (6,7%) dari total 300 kemungkinan jawaban. Rata-rata nilai posttest responden adalah sebesar 14 dari skor maksimum 15.

Jika dibandingkan dengan hasil pretest, terjadi peningkatan yang baik dari segi jumlah jawaban benar maupun rata-rata nilai. Hampir seluruh responden mampu menjawab sebagian besar soal dengan benar setelah penggunaan media pembelajaran. Hal ini menunjukkan bahwa responden telah mengalami peningkatan pemahaman yang sangat baik terhadap materi yang dipelajari.

Tabel 2. Hasil Posttest setelah menggunakan simulasi

No	Nama Responden	Skor	Persentase (%)
1	R1	15	100%
2	R2	15	100%
3	R3	15	100%
4	R4	14	93.3%
5	R5	14	93.3%
6	R6	14	93.3%
7	R7	13	86.6%
8	R8	15	100%
9	R9	13	86.6%
10	R10	14	93.3%
11	R11	14	93.3%
12	R12	12	80%
13	R13	12	80%
14	R14	15	100%
15	R15	14	93.3%
16	R16	15	100%
17	R17	13	86.6%
18	R18	15	100%
19	R19	14	93.3%
20	R20	14	93.3%
Jumlah Keseluruhan		280	93.3%

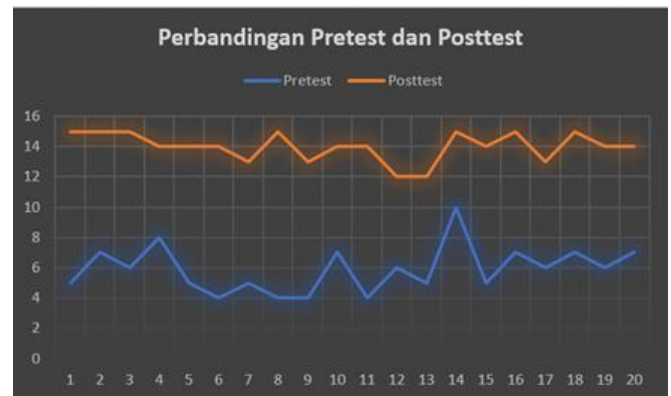
Perbandingan antara hasil pretest dan posttest dilakukan untuk mengevaluasi perubahan tingkat pemahaman responden setelah penggunaan media pembelajaran berbasis web. Indikator yang

dibandingkan meliputi jumlah jawaban benar, persentase keberhasilan, serta rata-rata skor yang diperoleh responden. Ringkasan hasil perbandingan tersebut disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Perbandingan Pretest dan Posttest

Kategori	Pretest	Posttest
Total Benar	118	280
Persentase	39,3%	93,3%
Rata-rata	5,9	14

Untuk memperkuat penyajian data, hasil perbandingan pretest dan posttest juga divisualisasikan dalam bentuk grafik pada gambar 2. Penyajian ini bertujuan untuk memberikan gambaran yang lebih intuitif mengenai peningkatan pemahaman responden setelah penggunaan media pembelajaran berbasis web.



Gambar 2. Grafik Perbandingan Pretest dan Posttest

Untuk mengetahui tingkat peningkatan pemahaman responden secara lebih akurat, digunakan analisis N-Gain (Normalized Gain). N-Gain merupakan ukuran yang digunakan untuk melihat efektivitas suatu pembelajaran dengan membandingkan peningkatan hasil belajar terhadap skor maksimum yang mungkin dicapai.

$$N - Gain = \frac{X_{post} - X_{pre}}{X_{max} - X_{pre}}$$

Dimana:

- $n - g$ = n-gain
- x_{pre} = pretest score
- x_{post} = posttest score
- x_{max} = maximum score

$$N - Gain = \frac{280 - 118}{300 - 118}$$

$$N - Gain = 0,89011$$

Tabel 4. Interpretasi n-gain:

Koefisien N-Gain	Klasifikasi
$0 \leq n - g < 0.3$	Rendah
$0.3 \leq n - g < 0.7$	Sedang
$0.7 \leq n - g < 1$	Tinggi

Berdasarkan hasil perhitungan, diperoleh nilai N-Gain sebesar 0,89. Nilai tersebut termasuk dalam kategori tinggi, yang menunjukkan bahwa penggunaan media pembelajaran berbasis web sangat efektif dalam meningkatkan pemahaman responden.

Berdasarkan hasil angket yang telah disebarakan setelah pelaksanaan posttest, sebagian besar mahasiswa memberikan respon positif terhadap penggunaan media simulasi. Media ini dinilai mampu membantu dalam memvisualisasikan konsep-konsep abstrak dalam mekanika kuantum, khususnya pada sistem partikel dalam kotak tiga dimensi.

Konsep yang paling mudah dipahami oleh mahasiswa adalah energi partikel dalam kotak serta bilangan kuantum, karena visualisasi yang ditampilkan dalam simulasi mempermudah mahasiswa dalam melihat hubungan antara parameter yang digunakan dengan hasil yang diperoleh. Namun demikian, beberapa mahasiswa masih mengalami kesulitan dalam memahami konsep fungsi gelombang, terutama dalam interpretasi matematis dan bentuk tiga dimensinya.

Dari segi kelebihan, media simulasi berbasis web ini dinilai:

1. Mampu memvisualisasikan konsep abstrak menjadi lebih konkret dan mudah dipahami.
2. Bersifat interaktif sehingga pengguna dapat mengeksplorasi konsep secara mandiri.
3. Mudah diakses dan fleksibel digunakan dalam proses pembelajaran.
4. Membantu meningkatkan pemahaman konsep dibandingkan hanya menggunakan teori.
5. Menyajikan tampilan simulasi 3D yang menarik dan mendukung pembelajaran.
6. Membantu memahami hubungan antara bilangan kuantum, energi, dan fungsi gelombang.

Namun, terdapat beberapa kekurangan yang diungkapkan oleh responden, antara lain:

1. Fitur simulasi masih terbatas dan belum sepenuhnya kompleks.
2. Belum tersedia panduan penggunaan yang jelas bagi pengguna awal.
3. Materi teori pendukung masih kurang atau belum disajikan secara lengkap.
4. Beberapa soal masih kurang variatif dan belum menantang secara konseptual.

Sebagai saran, mahasiswa mengharapkan:

1. Menambahkan animasi yang lebih dinamis, seperti visualisasi fase fungsi gelombang.
2. Menyediakan penjelasan otomatis (teks dinamis) saat parameter diubah.
3. Menambahkan materi pengantar sebelum penggunaan simulasi.
4. Meningkatkan kualitas dan variasi soal kuis.
5. Menambahkan panduan penggunaan atau video tutorial.
6. Mengembangkan tampilan agar lebih menarik dan user-friendly.
7. Menambah fitur interaktif dan menu tambahan untuk memperkaya pengalaman belajar.

Secara umum, hasil persepsi responden menunjukkan bahwa media simulasi berbasis web yang dikembangkan efektif dalam membantu proses pembelajaran, khususnya setelah dibandingkan dengan kondisi sebelum penggunaan media pada tahap pretest. Hal ini mengindikasikan bahwa penggunaan media simulasi dapat menjadi alternatif yang baik dalam meningkatkan pemahaman konseptual mahasiswa pada materi mekanika kuantum.

Rendahnya hasil pretest ini dapat disebabkan oleh karakteristik materi fisika kuantum yang bersifat abstrak dan sulit divisualisasikan. Konsep-konsep seperti fungsi gelombang, probabilitas, serta energi terkuantisasi tidak dapat diamati secara langsung, sehingga mahasiswa cenderung mengalami kesulitan dalam memahami makna fisiknya. Selain itu, keterkaitan antara konsep matematis dan interpretasi fisik juga menjadi tantangan tersendiri bagi responden.

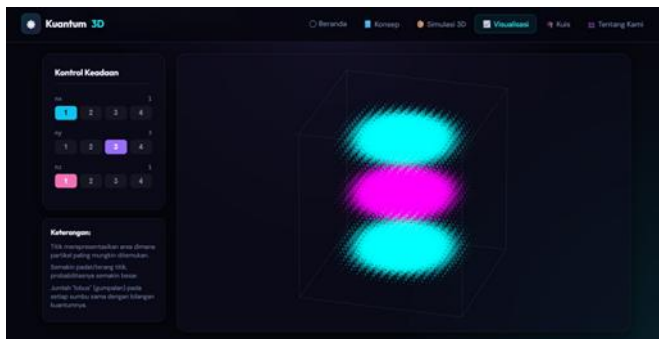
Hasil posttest menunjukkan adanya peningkatan pemahaman yang signifikan, dengan persentase jawaban benar mencapai 93,3% dan rata-rata skor sebesar 14 dari skor maksimum 15. Dibandingkan dengan hasil pretest, terjadi peningkatan yang sangat besar baik dari segi jumlah jawaban benar maupun rata-rata nilai. Peningkatan ini diperkuat oleh nilai N-Gain sebesar 0,89 yang termasuk dalam kategori tinggi. Hasil tersebut menunjukkan bahwa media pembelajaran berbasis web simulasi Schrödinger 3D efektif dalam meningkatkan pemahaman konseptual mahasiswa pada materi energi dan fungsi gelombang partikel dalam kotak tiga dimensi.

Secara teoritis, peningkatan ini sejalan dengan teori konstruktivisme yang menyatakan bahwa pemahaman konsep akan lebih mudah terbentuk ketika mahasiswa terlibat secara aktif dalam proses pembelajaran. Dalam konteks ini, simulasi berbasis web memungkinkan mahasiswa melakukan eksplorasi mandiri melalui manipulasi parameter, pengamatan langsung terhadap perubahan sistem, serta interpretasi hasil secara visual. Menurut Figueiras et al. (2019), visualisasi membantu mahasiswa dalam memahami

hubungan antara representasi matematis dan makna fisis suatu sistem kuantum. Hal ini penting karena salah satu kesulitan utama dalam pembelajaran mekanika kuantum terletak pada ketidakmampuan mahasiswa menghubungkan persamaan matematis dengan fenomena fisik yang direpresentasikan. Hasil penelitian ini juga mendukung temuan Karomah et al. (2021) yang menyatakan bahwa visualisasi distribusi probabilitas partikel dapat meningkatkan pemahaman mahasiswa terhadap fungsi gelombang dan probabilitas keberadaan partikel.

Efektivitas media pembelajaran ini disebabkan oleh kemampuannya dalam menyajikan visualisasi konsep secara konkret melalui simulasi tiga dimensi. Melalui simulasi tersebut, mahasiswa dapat mengamati bentuk fungsi gelombang, perubahan distribusi probabilitas, serta hubungan antara bilangan kuantum dan tingkat energi secara langsung. Selain itu, sifat interaktif media memungkinkan mahasiswa melakukan eksplorasi mandiri dengan mengubah parameter dan mengamati dampaknya secara real time, sehingga pembelajaran menjadi lebih aktif, bermakna, dan tidak hanya berfokus pada penyelesaian matematis semata.

Berdasarkan hasil analisis jawaban posttest, tidak semua konsep mengalami tingkat pemahaman yang sama. Konsep energi partikel dalam kotak dan bilangan kuantum cenderung lebih mudah dipahami karena memiliki hubungan matematis yang jelas dan dapat diamati secara langsung melalui simulasi. Sebaliknya, konsep fungsi gelombang masih menjadi bagian yang lebih sulit dipahami oleh sebagian mahasiswa, terutama dalam hal interpretasi matematis dan visualisasi bentuk tiga dimensinya. Hal ini menunjukkan bahwa fungsi gelombang merupakan konsep yang memerlukan kemampuan representasi abstrak yang lebih tinggi dibandingkan konsep lainnya.



Gambar 3. Visualisasi fungsi gelombang tiga dimensi pada simulasi

Temuan ini mengindikasikan bahwa meskipun simulasi berbasis web mampu meningkatkan pemahaman secara signifikan, perbedaan tingkat penguasaan konsep masih tetap ada. Penelitian ini memberikan kontribusi dalam mengatasi keterbatasan

penelitian sebelumnya yang umumnya masih menggunakan visualisasi dua dimensi atau belum secara spesifik mengintegrasikan konsep energi, fungsi gelombang, dan probabilitas dalam satu media pembelajaran interaktif. Dengan menggunakan simulasi Schrödinger 3D berbasis web, mahasiswa dapat memahami hubungan antara aspek matematis dan makna fisis secara lebih komprehensif, khususnya pada model partikel dalam kotak tiga dimensi. Oleh karena itu, media simulasi interaktif berbasis visualisasi tiga dimensi dapat menjadi alternatif yang efektif dalam pembelajaran mekanika kuantum. Selain itu, penggunaan media interaktif juga mendukung teori pembelajaran konstruktivistik, di mana responden membangun pemahaman melalui pengalaman langsung. Dengan demikian, pembelajaran tidak hanya bersifat pasif, tetapi melibatkan partisipasi aktif dari responden.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa media pembelajaran berbasis web memiliki potensi yang sangat baik untuk digunakan dalam pembelajaran fisika kuantum, khususnya pada materi partikel dalam kotak tiga dimensi. Media ini terbukti mampu meningkatkan pemahaman konseptual responden secara signifikan, terutama bagi mereka yang memiliki pemahaman awal yang rendah. Dengan demikian, penggunaan media simulasi dapat menjadi alternatif yang efektif dalam mengatasi kesulitan belajar pada materi yang bersifat abstrak.

Selain itu, hasil penelitian ini juga memberikan implikasi bahwa integrasi teknologi dalam pembelajaran perlu terus dikembangkan untuk mendukung proses belajar yang lebih inovatif, interaktif, dan berbasis pemahaman konsep.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, penggunaan media simulasi berbasis web Schrödinger 3D terbukti efektif dalam meningkatkan pemahaman konseptual mahasiswa pada materi energi dan fungsi gelombang partikel dalam kotak tiga dimensi. Hal ini ditunjukkan oleh peningkatan nilai rata-rata dari 5,9 pada pretest menjadi 14 pada posttest, serta nilai N-Gain sebesar 0,89 yang termasuk dalam kategori tinggi. Media ini memberikan kontribusi penting melalui penyajian visualisasi tiga dimensi yang interaktif, sehingga membantu mahasiswa memahami hubungan antara energi, fungsi gelombang, bilangan kuantum, dan distribusi probabilitas secara lebih konkret serta menghubungkan representasi matematis dengan makna fisisnya. Meskipun demikian, penelitian ini masih memiliki keterbatasan, terutama pada visualisasi fungsi gelombang yang belum optimal serta belum tersedianya fitur pendukung seperti panduan penggunaan dan materi tambahan. Oleh karena itu, penelitian

selanjutnya perlu mengembangkan media pembelajaran yang lebih komprehensif dan interaktif untuk mendukung pemahaman konsep mekanika kuantum yang lebih kompleks.

Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas Negeri Medan, khususnya Program Studi Pendidikan Fisika, atas dukungan akademik dalam pelaksanaan penelitian ini. Selain itu, apresiasi juga disampaikan kepada seluruh mahasiswa yang telah berpartisipasi sebagai responden serta kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan dan kontribusi sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik.

Referensi

- Abbas, I. (2023). A Numerical Statistical Solution for the Time-Independent Schrödinger Equation-Part II. Researchgate, IJISRT Dec.
- Abdy, M., Ihsan, H., & Dewi, D. A. R. (2021). Solusi Persamaan Schrodinger dengan Menggunakan Metode Transformasi Diferensial. *Journal of Mathematics, Computations and Statistics*, 4(1), 47-54.
- Alam, Y., Haryuni, N., Handoko, W. D., & Nurhadi, N. (2024). Fungsi Gelombang Persamaan Dirac pada Kasus Spin Simetri Bagian Sudut menggunakan Metode Iterasi Asimtotik. *Journal of Science Nusantara*, 4(4), 170-176. <https://doi.org/10.28926/jsnu.v4i4.1467>
- Almuneef, A., Alqahtani, Z., El-Shewy, E. K., & Abdelrahman, M. A. (2024). Simulation of new waves in applied sciences via Schrödinger equations. *Journal of Taibah University for Science*, 18(1), 2285082. <https://doi.org/10.1080/16583655.2023.2285082>
- Bernstein, J., & Shaik, S. S. (1988). The wave particle duality: Teaching via a visual metaphor. *Journal of Chemical Education*, 65(4), 339.
- Espinoza, E. J. S., Ortiz, J. R. A., Delgado, D. M. V., & Brito, C. A. P. (2023). Teaching wave-particle duality using didactic materials to improve its conceptualization. *Centro Sur*, 7(2). <https://doi.org/10.37955/cs.v7i2.311>
- Figueiras, E., Olivieri, D., Paredes, A., & Michinel, H. (2019). QMBlender: Particle-based visualization of 3D quantum wave function dynamics. *Journal of Computational Science*, 35, 44-56.
- Firmansyah, Z. A., Lekati, N. K., Veronika, A., Akhsan, H., & Ariska, M. (2025). Visualization of Probability Distribution for a Particle in a One-Dimensional Box using Computational Simulation. *Kappa Journal*, 9(3), 410-415. <https://doi.org/10.29408/kpj.v9i3.33120>
- Hakim, D. F., Prayitno, T. B., & Sarwono, Y. P. (2024). Application of Variational Quantum Eigensolver for Ground State Energies Calculation in Hydrogen and Helium Atomic Sequences. *Spektra: Jurnal Fisika dan Aplikasinya*, 9(3), 155-166. <https://doi.org/10.21009/SPEKTRA.093.03>
- Hardiyati, R., Hasanuddin, H., & Nurhanisa, M. (2022). Analisis Tingkat Energi Osilator Kuantum Anharmonik dengan Metode Runge Kutta Orde Empat. *PRISMA FISIKA*, 10(2), 162-167. <https://doi.org/10.26418/pf.v10i2.55687>
- Irfan, N., Supriadi, B., & Nuraini, L. (2023). Pendekatan Ketidakpastian Heisenberg dalam Menentukan Momentum dan Spektrum Energi Atom Deuterium pada Bilangan Kuantum Utama $n=4$. *Jurnal Pembelajaran Fisika*, 12(3).
- Karomah, S. A., Jannah, A. R., Aini, N. R., Zumarotin, R., & Sunarmi, N. (2021). Visualisasi Rapat Peluang Posisi Elektron terhadap Sudut pada Atom Deuterium. *Newthon-Maxwell J. Phys*, 2(2), 35-44.
- Purtscher, F. R., Schuler, M. J., & Hofer, T. S. (2024). Sculpting the unseen: exploring quantum mechanics using 3D-printed potential surfaces and wave functions.
- Sarwono, Y. P. (2024). Pendekatan Fungsi Basis Satu Dimensi untuk Menyelesaikan Persamaan Schrödinger untuk Sistem Atom dan Molekul Multi-Elektron. In *Joint Prosiding IPS dan Seminar Nasional Fisika (Vol. 12)*. <https://doi.org/10.21009/03.1201.FA16>
- Suharli, A. J., Furqon, M., Lestari, N., Dharma, B. E., Falah, H. S., & Antony, M. K. (2025). Analisis Pemahaman Konsep Mahasiswa Pada Materi Gejala Kuantum Menggunakan Quantum Physics Conceptual Survey. *DIFFRACTION: Journal for Physics Education and Applied Physics*, 7(1), 10-21.
- Supriadi, B., Lorensia, SL, Shahira, F., Prabandari, AM, & Putri, AAW (2023). Probabilitas Elektron Atom Deuterium dalam Ruang Momentum pada Bilangan Kuantum $n \leq 3$. *Jurnal Internasional Sains dan Teknologi Aceh*, 12 (2), 239-245.
- Syukron, A. A., & Elviyanti, I. L. (2022). Solusi Persamaan Schrodinger dengan Potensial Scraf II Hyperbolic menggunakan Pendekatan Semiklasik. *Jurnal Kridatama Sains dan Teknologi*, 4(01), 87-92.
- Taqillah, A., Umamah, C., & Musyarrofah, W. (2025). Telaah Model Inti Sebagai Dasar Pemahaman Energi Ikat dan Stabilitas Atom. *KUANTUM: Jurnal Pembelajaran dan Sains Fisika*, 6(2), 382-

392.

<https://doi.org/10.63976/kuantum.v6i2.1095>

- Trails, D. (2024). Mathematical Wave Functions and 3D Finite Element Modelling of the Electron and Positron. *Journal of Applied Mathematics and Physics*, 12, 1134-1162.
- Widagda, I. G. A., Artawan, N., Kasmawan, I. G. A., Suharta, I. W. G., & Nurmalasari, N. P. Y. (2025). Solution of Time-Independent Schrodinger Equation (TISE) by Using Finite Difference Approach. *BULETIN FISIKA*, 26(1), 9-18.
- Ye, D. (2024). Solving the Schrödinger equation in Higher Dimensions With Physics-Informed Neural Networks.