

Analisis Hubungan Sudut Hamburan terhadap Pergeseran Panjang Gelombang pada Efek Compton Menggunakan Simulasi GeoGebra

Lourensia Bravini Lahera^{1*}, Agnes Viola Manik², Novita Zuraida³, Nazhira Mizilfa⁴, Samuel Baringbing⁵, Michelle Belinda⁶, Ade Ayu Lestari⁷, Indah Vanesa Br. Ginting⁸, Putri Najwa Nasution⁹, Fitria Fadila Harisi¹⁰, Septya Yulandari¹¹, Novia¹², Deo Demonta Panggabean¹³, dan Ladestam Sitinjak¹⁴.

Program Studi Pendidikan Fisika, Jurusan Fisika, Universitas Negeri Medan, Medan, Indonesia.

Received: 02 October 2025

Revised: 14 December 2025

Accepted: 22 December 2025

Corresponding Author:

Lourensia Bravini Lahera

laurensiabravini1234@gmail.com

© 2025 Kappa Journal is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License



DOI:

<https://doi.org/10.29408/kpj.v9i3.32473>

Abstrak: The Compton effect is an important phenomenon in modern physics that demonstrates the quantum nature of light through the wavelength shift due to the scattering of photons by electrons. However, this concept is often difficult for students to understand because it is abstract and involves complex mathematical equations. This study aims to analyze the relationship between the photon scattering angle and the wavelength shift ($\Delta\lambda$) in the Compton effect using GeoGebra simulation as an interactive visualization medium. This study uses a qualitative descriptive method with GeoGebra as the main simulation instrument. Simulations are carried out based on the Compton equation by varying the photon scattering angle by 30° , 60° , and 120° , while the initial photon energy is set at 2.81 MeV. Data in the form of initial wavelength, scattered wavelength, and wavelength shift are analyzed qualitatively to interpret the physical relationship between variables. The simulation results show that the wavelength shift increases with increasing photon scattering angle, in accordance with the predictions of the Compton effect theory and the law of conservation of energy and momentum. In addition to strengthening conceptual understanding of the Compton effect, this study shows that GeoGebra is effective as a visual learning medium to help students understand quantum phenomena in a more concrete and communicative way..

Keywords: Compton effect; scattering angle; wavelength shift; GeoGebra; simulation.

Pendahuluan

Kemajuan dalam ilmu fisika pada abad ke-20 menunjukkan perubahan signifikan dalam pemahaman tentang cahaya dan materi. Jika pada awalnya cahaya hanya dianggap sebagai gelombang, seperti yang ditunjukkan oleh fenomena interferensi, difraksi, dan polarisasi, maka sejak awal abad ke-20 muncul bukti bahwa cahaya juga dapat bertindak sebagai partikel (Ummah, 2019). Salah satu temuan yang signifikan adalah efek fotolistrik yang diuraikan oleh Albert Einstein pada tahun 1905, yang menunjukkan bahwa

cahaya tersusun dari paket-paket energi terpisah yang disebut foton. Penemuan ini menjadi landasan bagi munculnya konsep dualisme gelombang-partikel, yang selanjutnya menjadi salah satu pilar penting dalam fisika modern.

Pada tahun 1923, Arthur H. Compton menemukan bahwa ketika sinar-X monokromatik diarahkan ke suatu materi, berkas yang terhambur terbagi menjadi dua komponen: pertama, berkas yang tidak dimodifikasi dengan panjang gelombang sama seperti berkas primer, sesuai dengan teori hamburan

How to Cite:

Lahera, L. B., Manik, A. V., Zuraida, N., Mizilfa, N., Baringbing, S., Belinda, M., Lestari, A. A., Ginting, I. V. B., Nasution, P. N., Harisi, F. F., Yulandari, S., Novia, N., Panggabean, D. D., & Sitinjak, L. (2025). Analisis Hubungan Sudut Hamburan terhadap Pergeseran Panjang Gelombang pada Efek Compton Menggunakan Simulasi GeoGebra. *Kappa Journal*, 9(3), 404-409. <https://doi.org/10.29408/kpj.v9i3.32473>

klasik Thomson; dan kedua, berkas yang dimodifikasi dengan panjang gelombang lebih panjang, yang hanya dapat dijelaskan dengan teori kuantum (Hamouda, 2017). Pergeseran panjang gelombang ini menunjukkan bahwa cahaya berperilaku sebagai partikel yang membawa energi dan momentum. Melalui analisis hukum kekekalan energi dan momentum, Compton membuktikan bahwa besar pergeseran panjang gelombang sangat dipengaruhi oleh sudut hamburan foton. Semakin besar sudut hamburan, semakin banyak energi yang ditransfer ke elektron, sehingga pergeseran panjang gelombang yang dihasilkan semakin signifikan.

Efek Compton kemudian menjadi bukti kuat mengenai sifat kuantum cahaya serta memperkuat teori relativitas dan mekanika kuantum yang berkembang pesat pada abad ke-20. Hingga saat ini, efek Compton masih dipelajari baik secara teoretis maupun melalui simulasi dalam pembelajaran fisika. Namun, dalam praktik pembelajaran, konsep ini sering kali sulit dipahami oleh mahasiswa karena bersifat abstrak, melibatkan persamaan matematis yang kompleks, serta membutuhkan pemahaman simultan mengenai energi, momentum, dan geometri hamburan. Kondisi ini menyebabkan mahasiswa cenderung mengalami kesulitan dalam mengaitkan persamaan matematis dengan makna fisis dari fenomena yang dipelajari.

Efek Compton merupakan salah satu bukti terkuat mengenai keterbatasan teori klasik dalam menjelaskan sifat cahaya. Penjelasan klasik hamburan Thomson tidak mampu menerangkan pergeseran panjang gelombang, sehingga efek Compton menjadi pintu masuk penting bagi teori kuantum. Krane, 2019 menjelaskan bahwa efek Compton sangat erat kaitannya dengan konsep konservasi energi dan momentum pada skala kuantum, di mana semakin besar sudut hamburan foton, semakin besar pula perubahan panjang gelombang yang terjadi. Selain penting secara fundamental, efek Compton juga memiliki aplikasi luas dalam berbagai bidang teknologi, seperti deteksi radiasi, pencitraan medis, dan karakterisasi material.

Untuk mengatasi kesulitan pembelajaran yang bersifat abstrak tersebut, diperlukan media pembelajaran yang mampu memvisualisasikan hubungan antara konsep matematis dan fenomena fisis secara lebih konkret. Salah satu media yang berpotensi digunakan adalah GeoGebra. GeoGebra memiliki keunggulan dalam mengintegrasikan representasi aljabar, grafik, dan geometri dalam satu platform, sehingga memungkinkan pengguna mengamati secara langsung pengaruh perubahan suatu variabel terhadap variabel lainnya.

Berbagai penelitian dalam bidang pendidikan fisika menunjukkan bahwa GeoGebra efektif dalam meningkatkan pemahaman konseptual dan keaktifan mahasiswa dalam pembelajaran (Arjana & Suastra, 2022;

Wati et al., 2025) Namun, penelitian-penelitian tersebut umumnya masih berfokus pada materi mekanika atau visualisasi matematis secara umum. Kajian yang secara khusus memanfaatkan GeoGebra sebagai simulasi dinamis untuk memvisualisasikan fenomena kuantum, terutama hubungan antara sudut hamburan foton dan pergeseran panjang gelombang pada efek Compton, masih relatif terbatas.

Berdasarkan kondisi tersebut, terdapat celah penelitian terkait pemanfaatan GeoGebra dalam pembelajaran fisika modern pada topik efek Compton. Kebaruan (novelty) penelitian ini terletak pada penggunaan GeoGebra sebagai simulasi dinamis yang memungkinkan visualisasi langsung hubungan antara sudut hamburan dan pergeseran panjang gelombang ($\Delta\lambda$) berdasarkan persamaan Compton. Melalui simulasi ini, mahasiswa tidak hanya mengamati grafik secara statis, tetapi juga dapat mengeksplorasi perubahan parameter secara interaktif dan mengaitkannya dengan interpretasi fisis.

Dengan demikian, tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis hubungan antara sudut hamburan foton dan pergeseran panjang gelombang pada efek Compton menggunakan simulasi GeoGebra. Penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi dalam bidang fisika dengan memperkuat pemahaman konseptual mengenai efek Compton, serta dalam aspek pedagogis sebagai alternatif media pembelajaran interaktif yang membantu mahasiswa memahami fenomena kuantum yang bersifat abstrak secara lebih visual dan komunikatif.

Metode

Penelitian ini menggunakan metode deskriptif kualitatif yang bertujuan untuk menggambarkan dan menganalisis hubungan antara sudut hamburan foton (θ) dan pergeseran panjang gelombang ($\Delta\lambda$) pada efek Compton. Metode ini dipilih karena penelitian tidak berorientasi pada pengujian hipotesis statistik, melainkan pada pemahaman pola hubungan variabel dan interpretasi fenomena fisika berdasarkan hasil simulasi dan landasan teori.

Instrumen utama penelitian adalah perangkat lunak GeoGebra yang digunakan sebagai media simulasi dinamis. GeoGebra memungkinkan visualisasi persamaan Compton secara interaktif melalui grafik dan pengaturan parameter menggunakan slider, sehingga hubungan antara sudut hamburan dan pergeseran panjang gelombang dapat diamati secara langsung.

Persamaan dasar yang digunakan dalam simulasi adalah persamaan Compton sebagai berikut:

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0c} (1 - \cos \theta) \quad (1)$$

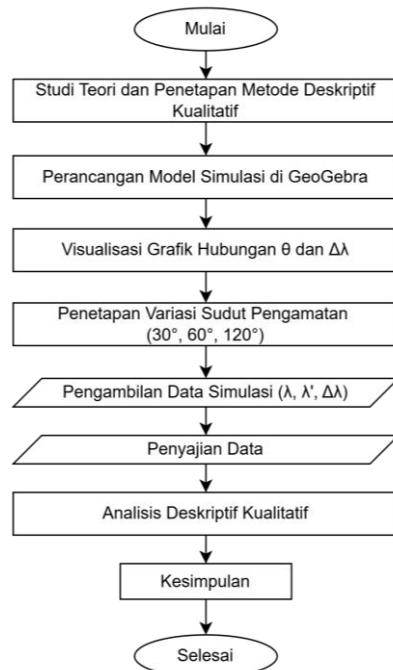
dengan λ sebagai panjang gelombang awal foton, λ' panjang gelombang foton terhambur, serta h , m_0 , dan c masing-masing adalah konstanta Planck, massa elektron diam, dan kecepatan cahaya. Persamaan ini dipandang relevan karena secara langsung menghubungkan sudut hamburan dengan pergeseran panjang gelombang, dan dengan demikian dapat digunakan untuk menggambarkan fenomena kuantum secara lebih konkret melalui simulasi.

Tahapan penelitian diawali dengan perancangan model simulasi di GeoGebra. Persamaan Compton dimasukkan ke dalam sistem GeoGebra, kemudian dibuat slider untuk memvariasikan sudut hamburan θ pada rentang 0° hingga 180° . Model ini menghasilkan grafik hubungan antara sudut hamburan dan pergeseran panjang gelombang ($\Delta\lambda$) secara dinamis.

Selanjutnya dilakukan pengambilan data kualitatif dengan menetapkan tiga variasi sudut hamburan, yaitu 30° , 60° , dan 120° . Pemilihan sudut tersebut bertujuan untuk merepresentasikan kondisi hamburan kecil, sedang, dan besar. Dari setiap variasi sudut, diperoleh nilai panjang gelombang awal (λ), panjang gelombang terhambur (λ'), dan pergeseran panjang gelombang ($\Delta\lambda$) yang kemudian disajikan dalam bentuk tabel.

Tahap berikutnya adalah analisis data secara kualitatif, yaitu dengan menginterpretasikan kecenderungan perubahan $\Delta\lambda$ terhadap variasi sudut hamburan. Data hasil simulasi dianalisis untuk menjelaskan makna fisis dari pola yang muncul, khususnya terkait transfer energi antara foton dan elektron. Selain itu, grafik hasil simulasi digunakan untuk memperjelas hubungan fungsional antara sudut

hamburan dan pergeseran panjang gelombang.



Gambar 1. Bagan alur penelitian simulasi efek Compton menggunakan GeoGebra

Dengan alur tersebut, metode deskriptif kualitatif ini tidak hanya menekankan pada nilai numerik hasil simulasi, tetapi juga pada interpretasi konseptual fenomena efek Compton. Pendekatan ini sejalan dengan tujuan penelitian, yaitu memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai hubungan sudut hamburan dan pergeseran panjang gelombang melalui simulasi GeoGebra.

Hasil dan Pembahasan

Teori Dasar Efek Compton

Efek Compton merupakan fenomena hamburan sinar-X oleh elektron yang mengakibatkan perubahan panjang gelombang radiasi setelah tumbukan. Fenomena ini pertama kali ditemukan oleh Arthur H. Compton pada tahun 1923 ketika ia mengamati bahwa sinar-X yang dihamburkan oleh suatu material tidak hanya mengalami perubahan arah, tetapi juga mengalami peningkatan panjang gelombang dibandingkan panjang gelombang awalnya. Temuan ini tidak dapat dijelaskan oleh teori klasik hamburan gelombang elektromagnetik, yang menyatakan bahwa panjang gelombang cahaya tidak berubah akibat hamburan.

Penjelasan efek Compton hanya dapat diberikan dengan menganggap cahaya sebagai partikel (foton) yang membawa energi dan momentum. Dalam proses hamburan, sebagian energi dan momentum foton

ditransfer ke elektron sehingga elektron memperoleh energi kinetik, sedangkan foton kehilangan sebagian energinya. Kehilangan energi ini menyebabkan panjang gelombang foton setelah hamburan menjadi lebih besar. Besarnya pergeseran panjang gelombang bergantung pada sudut hamburan foton, sebagaimana dinyatakan dalam persamaan Compton.

Secara matematis, hubungan antara sudut hamburan dan pergeseran panjang gelombang dinyatakan oleh persamaan:

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos \theta) \quad (1)$$

$$\frac{h}{m_0 c} = \lambda_c = 2.43 \text{ pm} = 2.43 \times 10^{-12} \text{ m} \quad (2)$$

$$\Delta\lambda = \lambda_c (1 - \cos \theta) \quad (3)$$

Keterangan:

λ = Panjang gelombang sinar semula

λ' = Panjang gelombang sinar terhambur

θ = sudut hamburan sinar

h = Konstanta Plank ($6,626 \times 10^{-34} \text{ J.s}$)

m_0 = massa electron ($9,11 \times 10^{-31} \text{ Kg}$)

c = kecepatan cahaya ($3 \times 10^8 \text{ m/s}$)

λ_c = Panjang gelombang Compton ($2.43 \text{ pm} = 2.43 \times 10^{-12} \text{ m}$)

$\Delta\lambda$ = Pergeseran gelombang compton

Persamaan ini menunjukkan bahwa pergeseran panjang gelombang hanya bergantung pada sudut hamburan dan konstanta fundamental, sehingga efek Compton merupakan bukti kuat sifat kuantum cahaya.

Hasil Simulasi Effe Compton Menggunakan Geogebra

Berdasarkan simulasi yang dilakukan menggunakan GeoGebra, diperoleh data hubungan antara sudut hamburan foton dan pergeseran panjang gelombang ($\Delta\lambda$). Simulasi dilakukan dengan menetapkan energi awal foton sebesar 2,81 MeV dan memvariasikan sudut hamburan pada tiga nilai, yaitu 30° , 60° , dan 120° . Hasil simulasi disajikan dalam Tabel 1.

Tabel 1 Hasil Simulasi Pergeseran Panjang Gelombang

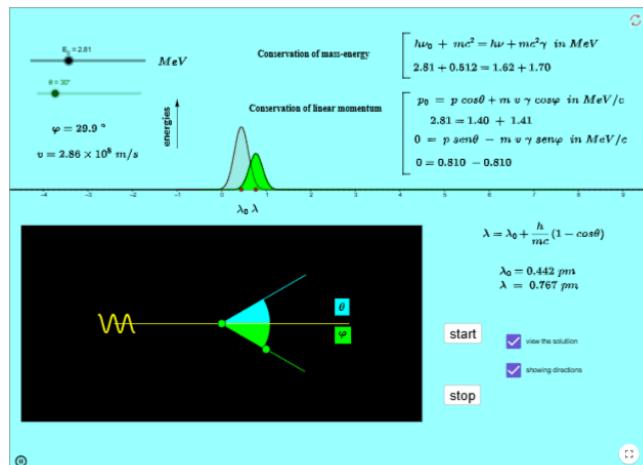
Energi Awal E_0 (MeV)	Sudut Hamburan θ (°)	λ_0 (pm)	λ (pm)	$\Delta\lambda$ (pm)
2.81	30°	0,442	0,767	0,325
2.81	60°	0,442	1,66	1,218
2.81	120°	0,442	4,08	3,638

Selain data numerik, simulasi GeoGebra juga menampilkan visualisasi spektrum dan diagram konservasi energi serta momentum, yang memperlihatkan keseimbangan perhitungan selama proses hamburan.

Untuk memperjelas kecenderungan hasil simulasi, hubungan antara sudut hamburan (θ) dan pergeseran panjang gelombang ($\Delta\lambda$) dapat divisualisasikan dalam bentuk grafik θ terhadap $\Delta\lambda$, yang menunjukkan peningkatan $\Delta\lambda$ seiring dengan bertambahnya sudut hamburan.

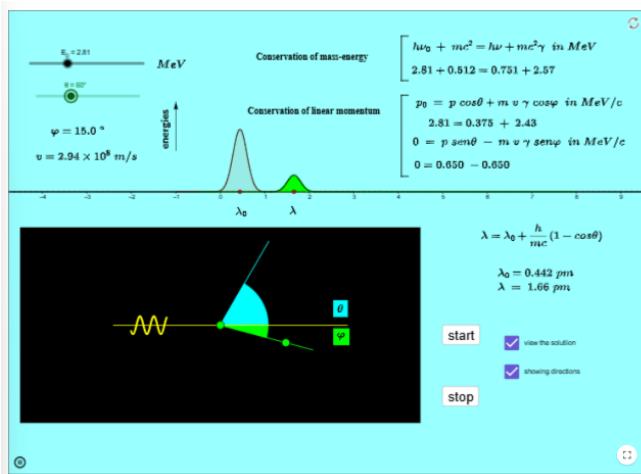
Analisi Hubungan Sudut Hamburan terhadap Pergeseran Panjang Gelombang ($\Delta\lambda$)

Berdasarkan hasil simulasi GeoGebra yang disajikan pada Tabel 1, terlihat adanya hubungan yang sistematis antara sudut hamburan foton (θ) dan pergeseran panjang gelombang ($\Delta\lambda$). Ketika sudut hamburan meningkat dari 30° menjadi 60° dan kemudian 120° , nilai $\Delta\lambda$ juga meningkat secara signifikan dari 0,325 pm menjadi 1,218 pm dan 3,638 pm. Pola ini menunjukkan bahwa pergeseran panjang gelombang tidak bersifat acak, melainkan bergantung langsung pada besar sudut hamburan foton. Secara teoritis, hubungan ini sejalan dengan persamaan Compton yang menyatakan bahwa $\Delta\lambda$ meningkat seiring bertambahnya nilai $1 - \cos \theta$. Pada sudut hamburan kecil ($\theta = 30^\circ$), nilai $(1 - \cos \theta)$ masih relatif kecil sehingga pergeseran panjang gelombang yang dihasilkan juga kecil. Hal ini mengindikasikan bahwa foton hanya mentransfer sebagian kecil energinya kepada elektron, sehingga energi foton setelah hamburan masih cukup besar.



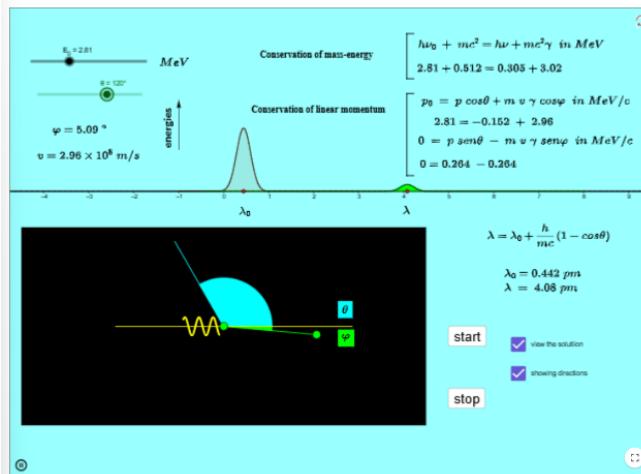
Gambar 2. Tampilan Simulasi GeoGebra pada $\theta = 30^\circ$

Ketika sudut hamburan diperbesar menjadi 60° , nilai $(1 - \cos \theta)$ meningkat secara signifikan, yang berdampak langsung pada bertambahnya $\Delta\lambda$. Kondisi ini menunjukkan bahwa transfer energi dari foton ke elektron menjadi lebih besar dibandingkan pada sudut hamburan kecil. Simulasi GeoGebra memperlihatkan bahwa meskipun sudut hamburan foton semakin besar, sudut sebar elektron justru mengecil, yang menandakan peningkatan energi kinetik elektron akibat tumbukan.



Gambar 3. Tampilan Simulasi GeoGebra pada $\theta = 60^\circ$

Pada sudut hamburan yang sangat besar ($\theta = 120^\circ$), nilai $(1 - \cos \theta)$ mendekati maksimum, sehingga pergeseran panjang gelombang yang diperoleh menjadi paling besar. Hal ini menunjukkan bahwa foton kehilangan energi dalam jumlah signifikan dan sebagian besar energi tersebut ditransfer ke elektron. Dengan kata lain, semakin besar sudut hamburan foton, semakin besar pula energi yang dipindahkan kepada elektron dan semakin panjang panjang gelombang foton setelah hamburan.



Gambar 4. Tampilan Simulasi GeoGebra pada $\theta = 120^\circ$

Dengan demikian, hasil simulasi GeoGebra secara konsisten menegaskan hubungan fungsional antara sudut hamburan dan pergeseran panjang gelombang sebagaimana diprediksi oleh teori efek Compton. Analisis ini menunjukkan bahwa GeoGebra mampu merepresentasikan keterkaitan antara persamaan matematis dan makna fisik efek Compton secara jelas, sehingga membantu memperkuat pemahaman konseptual mengenai mekanisme transfer energi dan momentum dalam interaksi foton-elektron.

Diskusi

Hasil simulasi GeoGebra menunjukkan bahwa hubungan antara sudut hamburan foton dan pergeseran panjang gelombang ($\Delta\lambda$) mengikuti kecenderungan yang konsisten dengan teori efek Compton. Peningkatan sudut hamburan dari 30° hingga 120° menghasilkan peningkatan $\Delta\lambda$ yang signifikan, yang menandakan semakin besarnya energi foton yang ditransfer kepada elektron. Temuan ini menegaskan bahwa sudut hamburan merupakan parameter kunci yang menentukan besar kecilnya perubahan panjang gelombang pada proses hamburan Compton.

Secara fisis, hasil ini memperkuat pemahaman bahwa interaksi foton-elektron tidak dapat dijelaskan hanya melalui pendekatan gelombang klasik. Simulasi memperlihatkan bahwa perubahan arah foton selalu diikuti oleh perubahan energi, yang ditunjukkan melalui pergeseran panjang gelombang. Dengan demikian, hasil penelitian ini mendukung konsep dualitas gelombang-partikel, di mana cahaya berperilaku sebagai partikel bermomentum dalam proses hamburan.

Dari sisi pembelajaran fisika, penggunaan GeoGebra memberikan kontribusi pedagogis yang penting. Konsep efek Compton yang bersifat abstrak – karena melibatkan partikel submikroskopik dan hukum kekekalan relativistik – dapat divisualisasikan secara dinamis. Melalui simulasi, hubungan matematis antara sudut hamburan dan $\Delta\lambda$ tidak hanya ditampilkan sebagai persamaan, tetapi juga sebagai grafik dan pergeseran spektrum yang dapat diamati secara langsung. Hal ini membantu menjembatani kesenjangan antara representasi matematis dan makna fisik, yang sering menjadi kesulitan utama mahasiswa dalam mempelajari fisika modern.

Temuan penelitian ini juga menunjukkan bahwa GeoGebra dapat berfungsi sebagai alternatif media pembelajaran dan analisis ketika eksperimen laboratorium nyata sulit dilakukan, baik karena keterbatasan alat, biaya, maupun aspek keselamatan. Dengan simulasi, mahasiswa tetap dapat mengeksplorasi variasi parameter dan mengamati konsekuensi fisiknya secara sistematis.

Meskipun demikian, penelitian ini memiliki keterbatasan. Simulasi GeoGebra didasarkan pada model ideal dari persamaan Compton, sehingga tidak mempertimbangkan faktor-faktor eksperimen nyata seperti efek latar (background noise), ketidakpastian pengukuran, atau pengaruh elektron yang terikat kuat dalam atom. Oleh karena itu, hasil simulasi lebih tepat dipahami sebagai representasi konseptual dan teoretis, bukan sebagai pengganti penuh eksperimen fisik di laboratorium.

Secara keseluruhan, diskusi ini menunjukkan bahwa simulasi GeoGebra mampu merepresentasikan

fenomena efek Compton secara konsisten dengan teori serta relevan untuk mendukung pembelajaran fisika modern. Hubungan antara sudut hamburan dan pergeseran panjang gelombang yang diperoleh dari simulasi tidak hanya memperkuat pemahaman konsep fisika kuantum, tetapi juga memberikan pendekatan pedagogis yang lebih visual, interaktif, dan mudah dipahami.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis simulasi menggunakan GeoGebra, dapat disimpulkan bahwa terdapat hubungan yang kuat antara sudut hamburan foton dengan pergeseran panjang gelombang ($\Delta\lambda$) pada efek Compton. Semakin besar sudut hamburan, semakin besar pula pergeseran panjang gelombang yang terjadi. Hal ini menunjukkan bahwa energi yang ditransfer dari foton ke elektron semakin besar seiring dengan bertambahnya sudut hamburan, sesuai dengan hukum kekekalan energi dan momentum. Pada sudut hamburan kecil (30°), pergeseran panjang gelombang relatif kecil sehingga energi foton yang hilang juga sedikit. Pada sudut sedang (60°), pergeseran panjang gelombang bertambah besar, menandakan transfer energi yang lebih signifikan. Sedangkan pada sudut besar (120°), pergeseran panjang gelombang mencapai nilai maksimum, yang menunjukkan bahwa foton kehilangan energi dalam jumlah besar sementara elektron memperoleh energi yang sangat besar. Hasil ini konsisten dengan prediksi teori efek Compton. Dari sisi pembelajaran fisika, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa GeoGebra efektif digunakan sebagai media simulasi interaktif untuk membantu memvisualisasikan fenomena kuantum yang bersifat abstrak. Simulasi memungkinkan mahasiswa memahami hubungan antara sudut hamburan dan pergeseran panjang gelombang tidak hanya melalui persamaan matematis, tetapi juga melalui representasi visual dan grafik dinamis, sehingga dapat meningkatkan pemahaman konseptual dalam pembelajaran fisika modern. Penelitian ini memiliki keterbatasan karena simulasi yang digunakan masih berbasis pada model ideal dan belum mempertimbangkan faktor-faktor eksperimen nyata seperti ketidakpastian pengukuran, pengaruh elektron terikat, maupun gangguan latar. Oleh karena itu, hasil yang diperoleh lebih bersifat konseptual dan teoretis. Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengembangkan simulasi yang lebih kompleks atau mengombinasikan simulasi dengan data eksperimen nyata, serta mengkaji efektivitas penggunaan GeoGebra secara langsung dalam proses pembelajaran di kelas.

Daftar Pustaka

- Arjana, I. G., & Suastra, I. W. (2022). Pengembangan Simulasi Interaktif Berbasis Geogebra dalam Mendukung Pelaksanaan Perkuliahinan Fisika Mekanika Dasar Berbasis STEM. *Jurnal Pendidikan Dan Pembelajaran IPA Indonesia*, 12(3), 99–111.
- Dwi Apriyadi Nugraha. (2020). *Kaleidoskop dualisme cahaya*. Edufisika: Jurnal Pendidikan Fisika, 5(1), 88–95.
- Hamouda, S. A. (2017). Compton Scattering: A Theory and Experiments. *International Journal of Geology*, 5(4), 20–27.
- Khumaeni, A. (2022). *Buku Ajar Fisika Modern*. Yogyakarta: DIVA Press
- Krane, K. (2019). *Modern Physics* (4th ed.). John Wiley & Sons, INC. www.ebook3000.com
- Pratidhina, E., Ardiansyah, A. P. G. P., Herwinarso, A. P. G. P., & Wijaya, H. (2025). Pemanfaatan GeoGebra untuk Simulasi Fenomena Partikel dalam. *Kappa Journal*, 9(2), 284–290. <https://doi.org/10.29408/kpj.v9i2.31672>
- Suciati, I., Mailili, W. H., & Hajarina, H. (2022). Implementasi Geogebra terhadap Kemampuan Matematis Peserta Didik dalam Pembelajaran: A Systematic Literature Review. *Teorema: Teori Dan Riset Matematika*, 7(1), 27. <https://doi.org/10.25157/teorema.v7i1.5972>
- Ummah, M. S. (2019). Sejarah Perkembangan Fisika (Kuantum) Dari Klasik Hingga Modern. *Sustainability (Switzerland)*, 11(1), 1–14. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.17085.08160>
- Utama, R. (2025). Review Software Simulasi untuk Pembelajaran Fisika Interaktif A Review of Simulation Software for Interactive Physics Learning Rodika Utama. *Jurnal Pendidikan Fisika Tadulako Online*, 13(2), 95–106. <https://doi.org/10.22487/jpft.v13i2.4484>
- Wati, S. A., Nurdiana, R., Fitriana, I. S., Keguruan, F., Pendidikan, I., Nahdlatul, U., & Kalimantan Barat, U. (2025). Pengaruh Media Pembelajaran Geogebra Terhadap Kemampuan Representasi Gambar Siswa. *Nusantara Journal of Multidisciplinary Science*, 2(10), 1802–1812. <https://jurnal.intekom.id/index.php/njms>