



Jurnal Pendidikan Fisika dan Sains (JPFS)

Journal homepage: <http://journal.unucirebon.ac.id/index.php/jpfs>



Kajian Perkembangan Konsep Efek Fotolistrik: Tinjauan Fisika Klasik dan Fisika Modern

Siti Sohibah¹, Adam Malik^{2*}

^{1,2}Program Studi Pendidikan Fisika, Fakultas Tarbiyah dan Keguruan, UIN Sunan Gunung Djati

*Email: adammalik@uinsgd.ac.id

DOI: <https://doi.org/10.52188/jpfs.v9i2.2272>

Accepted: 23 Juni 2026

Approved: 26 September 2026 Published: 30 September 2026

ABSTRAK

Efek fotolistrik menempati posisi penting dalam sejarah fisika karena menyingkapkan keterbatasan teori gelombang klasik dan membuka jalan menuju fisika kuantum. Paper ini mengkaji perkembangan konsep efek fotolistrik melalui studi pustaka, dengan membandingkan kerangka elektromagnetik klasik dan penjelasan kuantum modern. Fisika klasik, yang bersandar pada teori gelombang cahaya Maxwell, memprediksi bahwa energi kinetik elektron yang terpancar bergantung pada intensitas cahaya dan emisi dapat terjadi pada frekuensi berapa pun asalkan waktu penyinaran cukup lama. Hasil pengamatan eksperimen oleh Hertz, Hallwachs, dan Lenard justru bertentangan dengan prediksi tersebut, yaitu ditemukannya frekuensi ambang, emisi elektron yang seketika, serta energi kinetik yang tidak bergantung pada intensitas cahaya. Pada tahun 1905, Albert Einstein memecahkan anomali ini dengan mengusulkan bahwa cahaya terdiri atas kuantum energi diskret (foton), yang masing-masing membawa energi sebanding dengan frekuensinya. Hipotesis kuantum ini, yang kemudian dibuktikan secara eksperimental oleh Millikan, menjadi salah satu pilar dasar mekanika kuantum dan mengantarkan Einstein memperoleh Hadiah Nobel Fisika tahun 1921. Pergeseran dari deskripsi gelombang kontinu menuju deskripsi partikel terkuantisasi ini menggambarkan perubahan paradigma fundamental dalam fisika, dan memberikan wawasan pedagogis yang berharga bagi pendidikan fisika.

Kata kunci: Efek Fotolistrik, Fisika Klasik, Fisika Kuantum, Foton, Einstein

ABSTRACT

The photoelectric effect occupies a pivotal position in the history of physics because it exposed the limits of classical wave theory and opened the path toward quantum physics. This paper examines the conceptual development of the photoelectric effect through a literature study, comparing the classical electromagnetic framework with the modern quantum explanation. Classical physics, grounded in Maxwell's wave theory of light, predicted that the kinetic energy of emitted electrons should depend on light intensity and that emission should occur at any frequency given sufficient time. Experimental observations by Hertz, Hallwachs, and Lenard contradicted these predictions, revealing a threshold frequency, instantaneous emission, and an intensity-independent kinetic energy. In 1905, Albert Einstein resolved these anomalies by proposing that light consists of discrete energy quanta (photons), each carrying energy proportional to frequency. This quantum hypothesis, later confirmed experimentally by Millikan, became one of the foundational pillars of quantum mechanics. The shift from a continuous wave description to a quantized particle description illustrates a fundamental paradigm change in physics, offering valuable pedagogical insight for physics education, particularly in helping students grasp the nature of scientific revolutions and the wave-particle duality of light.

Keyword: Photoelectric Effect, Classical Physics, Quantum Physics, Photon, Einstein

@2026 Pendidikan Fisika FKIP Universitas Nahdlatul Ulama Cirebon

PENDAHULUAN

Hakikat cahaya merupakan salah satu persoalan paling mendasar yang telah diperdebatkan sepanjang sejarah fisika. Pada abad ke-19, teori elektromagnetik Maxwell berhasil menyatukan listrik, magnet, dan optik dalam satu kerangka gelombang yang elegan, sehingga cahaya dipandang sebagai gelombang elektromagnetik kontinu. Keberhasilan teori ini membuat fisika klasik tampak telah mencapai kesempurnaan dalam menjelaskan berbagai fenomena alam (Beiser, 2022; Halliday et al., 2022; Serway & Jewett, 2022; Young & Freedman, 2022). Namun, menjelang akhir abad ke-19 dan awal abad ke-20, sejumlah fenomena baru muncul dan tidak dapat dijelaskan oleh kerangka klasik tersebut, salah satunya adalah efek fotolistrik (Griffiths & Schroeter, 2023; Krane, 2022; Thornton & Rex, 2023).

Efek fotolistrik adalah fenomena terlepasnya elektron dari permukaan logam ketika logam tersebut disinari cahaya dengan frekuensi tertentu. Fenomena ini pertama kali diamati oleh Heinrich Hertz pada tahun 1887 dan kemudian diteliti lebih mendalam oleh Wilhelm Hallwachs dan Philipp Lenard. Berdasarkan teori gelombang klasik, energi kinetik elektron yang terpancar seharusnya bergantung pada intensitas cahaya, bukan pada frekuensinya, dan emisi elektron seharusnya dapat terjadi pada frekuensi berapa pun selama intensitas cahaya cukup besar (Tipler & Llewellyn, 2022; Townsend, 2023). Akan tetapi, hasil eksperimen menunjukkan hal yang sebaliknya, sehingga efek fotolistrik menjadi salah satu anomali penting yang menunjukkan keterbatasan teori gelombang klasik dalam menjelaskan interaksi cahaya dan materi (Ha & Jho, 2022; Juandi, 2023; Shin, 2022).

Pemecahan terhadap anomali ini ditemukan pada tahun 1905 ketika Albert Einstein mengusulkan bahwa cahaya tidak hanya berperilaku sebagai gelombang, tetapi juga dapat dipandang sebagai kumpulan paket energi diskret yang disebut foton. Gagasan tersebut menjadi tonggak penting dalam kelahiran fisika kuantum dan mengubah cara pandang terhadap hakikat cahaya secara fundamental (Cohen-Tannoudji et al., 2023; Sakurai & Napolitano, 2023; Zettili, 2023). Perkembangan konsep tersebut menunjukkan bahwa perubahan dalam ilmu fisika tidak selalu berlangsung secara linier, tetapi dapat terjadi ketika teori yang telah mapan tidak mampu lagi menjelaskan hasil eksperimen secara memadai. Dalam konteks pendidikan fisika, sejarah perkembangan efek fotolistrik dengan demikian memiliki potensi untuk digunakan sebagai konteks pembelajaran yang membantu mahasiswa memahami hubungan antara teori, bukti eksperimen, anomali, dan perkembangan konsep ilmiah (Hamed & Rebello, 2026; Hamzah et al., 2022; Pohit et al., 2026).

Perkembangan penelitian modern menunjukkan bahwa efek fotolistrik tidak hanya menjadi dasar bagi teori kuantum, tetapi juga memiliki peran penting dalam pengembangan berbagai teknologi, seperti fotodetektor, sensor optik, spektroskopi fotoelektron, dan sel surya modern (Aseyev, 2024; Azizi et al., 2024; Fuchs & Filk, 2022; Leitenstorfer & Baum, 2024; Qiu, 2026). Dari perspektif pendidikan fisika, sejumlah penelitian menunjukkan bahwa efek fotolistrik masih menjadi salah satu konsep yang sulit dipahami karena menuntut perubahan cara berpikir dari kerangka fisika klasik menuju fisika kuantum (Ha & Jho, 2022; Hamzah et al., 2022; Juandi, 2023). Kesulitan tersebut tidak hanya berkaitan dengan penguasaan persamaan matematis, tetapi juga dengan pemahaman terhadap hubungan antara intensitas, frekuensi, energi foton, fungsi kerja, dan energi kinetik elektron. Kondisi ini menunjukkan bahwa pembelajaran efek fotolistrik memerlukan pendekatan yang tidak hanya menekankan hasil akhir konsep, tetapi juga memberikan konteks mengenai proses terbentuknya konsep tersebut.

Meskipun berbagai kajian telah membahas efek fotolistrik dari perspektif historis, konseptual, maupun pendidikan, kajian-kajian tersebut cenderung menempatkan aspek sejarah perkembangan konsep dan kesulitan pembelajaran sebagai pembahasan yang terpisah. Kajian historis umumnya berfokus pada perkembangan gagasan mengenai cahaya dan munculnya teori kuantum, sedangkan penelitian pendidikan lebih banyak mengidentifikasi miskonsepsi atau kesulitan dalam memahami konsep efek fotolistrik. Integrasi antara perkembangan historis efek fotolistrik, kegagalan penjelasan fisika klasik berdasarkan bukti eksperimen, munculnya konsep foton Einstein, serta implikasinya terhadap pembelajaran fisika masih perlu diperkuat. Kesenjangan tersebut penting untuk dikaji karena pemahaman terhadap proses perubahan konsep dapat membantu mahasiswa melihat fisika sebagai proses penyelidikan ilmiah yang didasarkan pada hubungan antara prediksi teoritis dan bukti empiris, bukan sekadar kumpulan hukum dan persamaan.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, artikel ini memberikan kontribusi dengan menyajikan kajian terpadu mengenai perkembangan konsep efek fotolistrik dari perspektif fisika klasik menuju fisika modern dan mengaitkannya secara langsung dengan kebutuhan pembelajaran fisika. Kontribusi pendidikan dari kajian ini terletak pada pemanfaatan alur historis efek fotolistrik sebagai konteks untuk menjelaskan keterbatasan teori klasik, munculnya anomali eksperimen, serta lahirnya konsep foton sebagai bentuk perubahan paradigma ilmiah. Perspektif tersebut dapat menjadi landasan bagi pendidik fisika dalam merancang pembelajaran yang tidak hanya berorientasi pada penguasaan konsep, tetapi juga mendorong kemampuan mahasiswa untuk menganalisis bukti eksperimen, mengevaluasi keterbatasan suatu teori, dan memahami bagaimana pengetahuan ilmiah berkembang.

Berdasarkan latar belakang dan kesenjangan kajian tersebut, artikel ini bertujuan untuk mengkaji perkembangan konsep efek fotolistrik dari sudut pandang fisika klasik dan fisika modern, mengidentifikasi anomali yang tidak dapat dijelaskan oleh teori klasik, serta menelaah implikasi penjelasan kuantum Einstein terhadap perkembangan fisika modern dan pembelajaran fisika. Kajian ini diharapkan dapat memberikan perspektif yang lebih terintegrasi mengenai efek fotolistrik sekaligus memperkuat pemanfaatan sejarah perkembangan konsep sebagai konteks dalam pendidikan fisika.

METODE

Penelitian ini menggunakan metode kajian pustaka (*literature review*) dengan pendekatan deskriptif-kualitatif. Metode kajian pustaka digunakan untuk mengidentifikasi, mengkaji, membandingkan, dan mensintesis berbagai sumber ilmiah yang relevan guna memperoleh pemahaman komprehensif mengenai perkembangan konsep efek fotolistrik dari perspektif fisika klasik dan fisika modern serta implikasinya terhadap pendidikan fisika (Creswell & Creswell, 2023; Xiao & Watson, 2019). Sumber data yang digunakan meliputi artikel jurnal ilmiah nasional dan internasional, buku teks fisika modern, skripsi, tesis, dan disertasi yang relevan dengan sejarah fisika, efek fotolistrik, perkembangan teori kuantum, serta pembelajaran fisika. Literatur tahun 2022–2026 diprioritaskan untuk memperoleh gambaran perkembangan kajian terkini, sedangkan sumber yang lebih lama digunakan apabila memiliki kedudukan fundamental dalam perkembangan teori atau kajian historis efek fotolistrik.

Penelusuran literatur dilakukan melalui beberapa basis data ilmiah, yaitu Google Scholar, Crossref, Scopus, DOAJ, dan SINTA. Penelusuran menggunakan kombinasi kata kunci dalam bahasa Indonesia dan bahasa Inggris, yaitu *photoelectric effect*, efek fotolistrik, *history of quantum physics*, *quantum theory*, *wave-particle duality*, *physics education*, *teaching photoelectric effect*, dan *understanding of photoelectric effect*. Kata kunci tersebut digunakan untuk memperoleh literatur yang mencakup aspek konseptual, historis, serta pendidikan dari efek fotolistrik. Beberapa penelitian yang ditemukan secara khusus membahas pemahaman calon guru dan mahasiswa terhadap efek fotolistrik (Ha & Jho, 2022), penggunaan media dan laboratorium virtual dalam pembelajaran efek fotolistrik, serta penyajian aspek historis efek fotolistrik dalam buku teks fisika. Literatur historis mengenai rekonstruksi perkembangan konsep efek fotolistrik juga digunakan sebagai dasar untuk menganalisis hubungan antara perkembangan konsep dan penyajiannya dalam pendidikan fisika.

Proses seleksi literatur dilakukan secara bertahap melalui identifikasi, penyaringan, penilaian kelayakan, dan penetapan sumber yang dianalisis. Pada tahap identifikasi, seluruh literatur yang diperoleh dari basis data dikumpulkan berdasarkan kesesuaian kata kunci dengan fokus penelitian. Selanjutnya dilakukan penyaringan melalui pemeriksaan judul dan abstrak untuk mengeluarkan sumber yang tidak memiliki keterkaitan langsung dengan efek fotolistrik, perkembangan konsep cahaya, fisika kuantum, atau pendidikan fisika. Literatur yang lolos tahap penyaringan kemudian diperiksa secara menyeluruh untuk memastikan kesesuaiannya dengan tujuan kajian.

Kriteria inklusi dalam penelitian ini meliputi: (1) sumber membahas efek fotolistrik, perkembangan konsep cahaya, fisika kuantum, atau keterkaitannya dengan pendidikan fisika; (2) sumber memberikan pembahasan mengenai konsep, sejarah perkembangan, eksperimen, teori klasik, teori kuantum, atau pembelajaran efek fotolistrik; (3) artikel jurnal berasal dari publikasi ilmiah yang dapat diidentifikasi melalui basis data akademik; (4) artikel pendidikan fisika memiliki keterkaitan dengan pemahaman konsep, kesulitan belajar, media pembelajaran, atau kegiatan eksperimen efek fotolistrik; dan (5) publikasi tahun 2022–2026 diprioritaskan untuk menggambarkan perkembangan kajian terkini. Sementara itu, kriteria eksklusi meliputi: (1) sumber yang tidak memiliki keterkaitan langsung dengan fokus penelitian; (2) artikel yang hanya menyebut efek fotolistrik secara sekilas

tanpa pembahasan yang relevan; (3) publikasi duplikat yang ditemukan pada lebih dari satu basis data; dan (4) sumber yang tidak menyediakan informasi yang memadai untuk dianalisis.

Analisis data dilakukan menggunakan teknik *content analysis* (analisis isi). Analisis dilakukan melalui lima tahapan, yaitu (1) identifikasi informasi utama dari setiap sumber, (2) pengelompokan literatur berdasarkan tema, (3) perbandingan informasi antarsumber, (4) sintesis hasil kajian, dan (5) interpretasi hasil sintesis. Literatur dikelompokkan ke dalam beberapa tema utama, yaitu perkembangan pemikiran mengenai hakikat cahaya, penjelasan efek fotolistrik berdasarkan fisika klasik, hasil eksperimen dan keterbatasan teori klasik, penjelasan kuantum Einstein melalui konsep foton, perkembangan efek fotolistrik dalam fisika modern, serta implikasinya terhadap pendidikan fisika. Pengelompokan tersebut memungkinkan hasil dari sumber historis, konseptual, dan pendidikan dianalisis secara terpadu.

Pada tahap analisis, informasi dari setiap sumber dibandingkan berdasarkan asumsi dasar teori, prediksi terhadap hasil eksperimen, kesesuaian antara prediksi dan hasil eksperimen, keterbatasan teori klasik, serta kemampuan teori kuantum dalam menjelaskan fenomena efek fotolistrik (Cohen-Tannoudji et al., 2023; Sakurai & Napolitano, 2023; Townsend, 2023). Untuk aspek pendidikan fisika, analisis difokuskan pada bentuk kesulitan pemahaman konsep, penyajian sejarah efek fotolistrik, penggunaan media pembelajaran, dan pemanfaatan eksperimen atau laboratorium virtual. Hasil analisis kemudian disintesis untuk memperoleh gambaran mengenai hubungan antara anomali eksperimen, perubahan konsep cahaya, lahirnya penjelasan kuantum Einstein, dan implikasinya terhadap pembelajaran fisika. Selanjutnya, hasil sintesis diinterpretasikan untuk mengidentifikasi kontribusi perkembangan konsep efek fotolistrik terhadap pemahaman konsep, penalaran ilmiah, dan pembelajaran fisika (Ha & Jho, 2022; Hamzah et al., 2022).

HASIL

a. Efek Fotolistrik dalam Kerangka Fisika Klasik

Heinrich Hertz pertama kali mengamati bahwa percikan listrik antarelektroda menjadi lebih mudah terjadi ketika salah satu elektroda disinari cahaya ultraviolet. Pengamatan ini kemudian diperdalam oleh Hallwachs dan Lenard, yang menunjukkan bahwa cahaya dapat menyebabkan pelepasan elektron dari permukaan logam. Dalam kerangka fisika klasik, cahaya dipahami sebagai gelombang elektromagnetik kontinu sesuai teori Maxwell, sehingga energi yang dibawanya bergantung pada amplitudo atau intensitas gelombang, bukan pada frekuensinya (Beiser, 2022; Halliday et al., 2022; Serway & Jewett, 2022; Young & Freedman, 2022).

Berdasarkan teori gelombang klasik, terdapat tiga prediksi utama terhadap efek fotolistrik, yaitu: (1) energi kinetik elektron yang terlepas akan meningkat sebanding dengan intensitas cahaya; (2) efek fotolistrik akan terjadi pada frekuensi cahaya berapa pun asalkan intensitasnya cukup besar; dan (3) diperlukan selang waktu tertentu sebelum elektron terlepas karena energi gelombang diperkirakan terakumulasi secara bertahap pada permukaan logam (Krane, 2022; Thornton & Rex, 2023; Tipler & Llewellyn, 2022).

b. Anomali yang Ditemukan dari Hasil Eksperimen

Hasil eksperimen yang dilakukan oleh Lenard dan peneliti lainnya menunjukkan ketidaksesuaian yang jelas dengan ketiga prediksi klasik tersebut. Pertama, ditemukan adanya frekuensi ambang (*threshold frequency*), yaitu frekuensi minimum yang harus dimiliki cahaya agar elektron dapat terlepas dari permukaan logam, sehingga peningkatan intensitas cahaya tidak dapat menyebabkan emisi elektron apabila frekuensinya berada di bawah nilai ambang. Kedua, energi kinetik maksimum elektron yang terlepas ternyata bergantung pada frekuensi cahaya, bukan pada intensitasnya. Peningkatan intensitas terutama menyebabkan bertambahnya jumlah elektron yang terlepas. Ketiga, emisi elektron terjadi hampir seketika ketika cahaya dengan frekuensi di atas frekuensi ambang mengenai permukaan logam. Temuan tersebut bertentangan dengan prediksi fisika klasik yang mengasumsikan adanya proses akumulasi energi secara bertahap (Griffiths & Schroeter, 2023; Sakurai & Napolitano, 2023; Townsend, 2023).

Perbedaan antara prediksi fisika klasik dan hasil eksperimen dapat dirangkum pada Tabel 1. Perbandingan ini memperlihatkan bahwa beberapa karakteristik utama efek fotolistrik tidak dapat dijelaskan secara memadai menggunakan konsep gelombang elektromagnetik klasik.

Tabel 1. Perbandingan Prediksi Fisika Klasik dan Hasil Eksperimen pada Efek Fotolistrik

Aspek	Prediksi Fisika Klasik	Hasil Eksperimen
Pengaruh intensitas cahaya	Energi elektron seharusnya meningkat ketika intensitas cahaya meningkat	Intensitas terutama memengaruhi jumlah elektron yang terlepas
Pengaruh frekuensi cahaya	Frekuensi tidak menentukan energi elektron secara langsung	Energi kinetik maksimum elektron meningkat seiring peningkatan frekuensi
Frekuensi ambang	Tidak diprediksi, cahaya dengan intensitas cukup besar seharusnya dapat melepaskan elektron pada frekuensi berapa pun	Terdapat frekuensi ambang di bawah frekuensi tersebut elektron tidak terlepas
Waktu emisi elektron	Diperkirakan akan terdapat jeda waktu karena energi terakumulasi secara bertahap	Elektron terlepas hampir ketika setelah cahaya dengan frekuensi yang sesuai mengenai logam
Hubungan energi cahaya	Energi gelombang dikaitkan dengan amplitudo atau intensitas	Energi setiap foton ditentukan oleh frekuensi melalui hubungan $E = hf$

Tabel 1 menunjukkan adanya perbedaan mendasar antara prediksi teori klasik dan hasil eksperimen. Secara khusus, ketergantungan energi kinetik elektron terhadap frekuensi serta keberadaan frekuensi ambang menunjukkan bahwa intensitas cahaya saja tidak dapat menjelaskan mekanisme pelepasan elektron. Demikian pula, tidak ditemukannya jeda waktu yang berarti menunjukkan bahwa mekanisme transfer energi pada efek fotolistrik tidak berlangsung melalui akumulasi energi gelombang secara kontinu sebagaimana diprediksi oleh teori klasik.

c. Penjelasan Kuantum Einstein dan Pembuktiannya

Pada tahun 1905, Albert Einstein mengajukan penjelasan terhadap anomali efek fotolistrik dengan mengadopsi gagasan kuantisasi energi yang sebelumnya diperkenalkan oleh Max Planck dalam konteks radiasi benda hitam. Einstein mengusulkan bahwa cahaya dapat dipandang sebagai paket-paket energi diskret yang kemudian dikenal sebagai foton. Energi setiap foton sebanding dengan frekuensi cahaya dan dinyatakan melalui hubungan $E = hf$. Dengan: E: Energi foton, h: Konstanta Planck, f: frekuensi cahaya (Beiser, 2022; Krane, 2022; Zettili, 2023).

Berdasarkan konsep foton, efek fotolistrik dapat dijelaskan melalui interaksi antara foton dan elektron pada permukaan logam. Satu foton memberikan energinya kepada satu elektron. Sebagian energi tersebut digunakan elektron untuk mengatasi fungsi kerja (*work function*) logam, sedangkan energi yang tersisa menjadi energi kinetik maksimum elektron. Hubungan tersebut dinyatakan dalam persamaan Einstein untuk efek fotolistrik:

$$hf = w_0 + E_k$$

atau

$$E_{k,maks} = hf - w_0$$

dengan:

w_0 : fungsi kerja logam

$E_{k,maks}$: energi kinetik maksimum elektron yang terlepas

(Griffiths & Schroeter, 2023; Thornton & Rex, 2023).

Konsep kuantum tersebut memberikan penjelasan terhadap anomali yang tidak dapat diterangkan oleh fisika klasik. Frekuensi ambang terjadi karena energi foton harus memenuhi syarat ($hf \geq w_0$). Jika frekuensi cahaya berada di bawah frekuensi ambang, energi setiap foton tidak mencukupi untuk melepaskan elektron meskipun intensitas cahaya diperbesar. Sebaliknya, peningkatan frekuensi meningkatkan energi setiap foton sehingga menghasilkan elektron dengan energi kinetik yang lebih besar. Sementara itu, peningkatan intensitas pada frekuensi yang sesuai meningkatkan jumlah foton yang datang ke permukaan logam sehingga jumlah elektron yang terlepas juga meningkat.

Hipotesis kuantum Einstein pada awalnya diterima dengan keraguan oleh komunitas fisika. Namun, pengukuran Robert Millikan terhadap hubungan antara frekuensi cahaya dan energi kinetik elektron memberikan verifikasi eksperimental yang mendukung persamaan Einstein untuk efek fotolistrik (Cohen-Tannoudji et al., 2023; Young & Freedman, 2022). Dengan demikian, hasil eksperimen efek fotolistrik menjadi salah satu bukti penting bahwa interaksi cahaya dan materi tidak sepenuhnya dapat dijelaskan melalui konsep gelombang elektromagnetik klasik, tetapi memerlukan konsep kuantisasi energi.

PEMBAHASAN

a. Kegagalan Fisika Klasik dalam Menjelaskan Efek Fotolistrik

Ketiga anomali yang ditemukan melalui eksperimen menunjukkan bahwa model gelombang kontinu dalam fisika klasik tidak mampu menjelaskan mekanisme interaksi cahaya dengan elektron pada tingkat mikroskopis secara konsisten. Teori klasik memprediksi bahwa energi yang ditransfer kepada elektron seharusnya berkaitan dengan intensitas cahaya dan dapat terakumulasi secara bertahap. Namun, hasil eksperimen menunjukkan bahwa keberadaan frekuensi ambang, ketergantungan energi kinetik elektron terhadap frekuensi, serta emisi elektron yang berlangsung hampir seketika tidak sesuai dengan prediksi tersebut. Kondisi ini menunjukkan adanya keterbatasan fundamental dalam penerapan konsep gelombang klasik untuk menjelaskan interaksi cahaya dan materi pada skala atomik serta menjadi salah satu permasalahan yang mendorong perkembangan fisika kuantum pada awal abad ke-20 (Cohen-Tannoudji et al., 2023; Krane, 2022; Sakurai & Napolitano, 2023).

Penjelasan kuantum Einstein memberikan kerangka yang konsisten untuk menjelaskan ketiga anomali tersebut. Dalam model foton, energi cahaya tidak diberikan secara kontinu, tetapi dibawa oleh kuantum energi dengan besar ($E = hf$). Frekuensi ambang dapat dijelaskan karena elektron hanya dapat terlepas apabila energi foton memenuhi atau melampaui fungsi kerja logam, yaitu ($hf \geq w_0$). Ketika energi foton lebih besar daripada fungsi kerja, selisih energi tersebut menjadi energi kinetik maksimum elektron yang dinyatakan melalui persamaan $E_{k,maks} = hf - w_0$. Dengan demikian, frekuensi cahaya menentukan energi kinetik elektron, sedangkan peningkatan intensitas pada frekuensi yang sesuai terutama meningkatkan jumlah elektron yang terlepas. Emisi yang berlangsung hampir seketika juga dapat dijelaskan karena transfer energi terjadi melalui interaksi antara foton dan elektron, bukan melalui proses akumulasi energi gelombang secara bertahap (Griffiths & Schroeter, 2023; Townsend, 2023; Young & Freedman, 2022).

Keberhasilan eksperimen Robert Millikan dalam menguji hubungan antara frekuensi cahaya dan energi kinetik maksimum elektron semakin memperkuat kesesuaian antara prediksi teori kuantum dan hasil eksperimen. Hasil tersebut memberikan dukungan eksperimental terhadap persamaan Einstein untuk efek fotolistrik dan menjadi salah satu tonggak penting dalam perkembangan fisika kuantum. Atas penjelasannya mengenai efek fotolistrik, Einstein kemudian memperoleh Hadiah Nobel Fisika pada tahun 1921 (Cohen-Tannoudji et al., 2023; Young & Freedman, 2022).

b. Implikasi terhadap Perkembangan Fisika Modern

Penjelasan efek fotolistrik oleh Einstein memberikan kontribusi fundamental terhadap perubahan cara pandang mengenai hakikat cahaya. Fenomena tersebut menunjukkan bahwa cahaya tidak hanya dapat dijelaskan sebagai gelombang elektromagnetik, tetapi juga dapat berperilaku sebagai paket energi diskret yang disebut foton ketika berinteraksi dengan materi. Konsepsi tersebut menjadi bagian penting dalam perkembangan konsep dualisme gelombang-partikel dan selanjutnya berkontribusi terhadap pembentukan kerangka mekanika kuantum modern. Perkembangan tersebut kemudian diperkuat melalui kontribusi ilmuwan seperti de Broglie, Bohr, Heisenberg, dan Schrödinger dalam membangun pemahaman baru mengenai materi dan radiasi (Griffiths & Schroeter, 2023; Sakurai & Napolitano, 2023; Zettili, 2023).

Secara praktis, pemahaman mengenai interaksi cahaya dan materi dalam efek fotolistrik juga memberikan dasar bagi perkembangan berbagai teknologi modern. Prinsip fotoelektrik digunakan dalam sel surya (*photovoltaic cells*), fotodetektor, sensor gambar digital (*image sensors*), tabung pengganda foton (*photomultiplier tubes*), serta berbagai perangkat optoelektronik. Perkembangan penelitian mengenai material kuantum dan perangkat fotonik menunjukkan bahwa prinsip interaksi foton dan materi masih memiliki peran penting dalam pengembangan teknologi konversi energi dan

sistem optoelektronik generasi baru (Aseyev, 2024; Azizi et al., 2024; Fuchs & Filk, 2022; Leitenstorfer & Baum, 2024; Qiu, 2026; Shin, 2022).

Implikasi tersebut menunjukkan bahwa efek fotolistrik memiliki posisi penting tidak hanya dalam sejarah perkembangan fisika, tetapi juga dalam perkembangan teknologi dan pemahaman konseptual mengenai fenomena mikroskopis. Oleh karena itu, pembelajaran efek fotolistrik perlu diarahkan agar mahasiswa tidak sekadar menghafal persamaan, tetapi mampu memahami keterkaitan antara fenomena eksperimen, model teoritis, dan penerapannya dalam teknologi.

c. Perbandingan Paradigma Fisika Klasik dan Fisika Modern

Pergeseran paradigma dalam memahami efek fotolistrik dapat dilihat dari perbedaan asumsi dasar antara fisika klasik dan fisika modern. Fisika klasik memandang cahaya sebagai gelombang elektromagnetik kontinu sehingga energi yang dibawa gelombang dikaitkan dengan intensitasnya. Berdasarkan pandangan tersebut, peningkatan intensitas seharusnya meningkatkan energi elektron dan cahaya dengan frekuensi berapa pun seharusnya dapat melepaskan elektron apabila intensitasnya cukup besar. Hasil eksperimen justru menunjukkan bahwa elektron hanya dapat terlepas ketika frekuensi cahaya mencapai nilai ambang dan bahwa energi kinetik maksimum elektron bergantung pada frekuensi cahaya.

Sebaliknya, fisika modern melalui hipotesis kuantum Einstein memandang cahaya sebagai kuantum energi atau foton dengan energi ($E = hf$). Dalam model ini, setiap foton membawa energi yang ditentukan oleh frekuensinya. Apabila energi foton memenuhi ($hf \geq w_0$), elektron dapat terlepas dari permukaan logam. Kelebihan energi foton setelah mengatasi fungsi kerja kemudian menjadi energi kinetik maksimum elektron. Perbedaan mendasar tersebut menjelaskan mengapa model kuantum mampu menjelaskan frekuensi ambang, hubungan frekuensi dengan energi kinetik, dan emisi elektron yang berlangsung hampir seketika, sedangkan model klasik tidak mampu menjelaskan ketiga karakteristik tersebut secara konsisten (Beiser, 2022; Cohen-Tannoudji et al., 2023; Griffiths & Schroeter, 2023).

Dengan demikian, efek fotolistrik menunjukkan bahwa perkembangan fisika tidak hanya berupa penyempurnaan persamaan matematis, tetapi juga dapat melibatkan perubahan paradigma ketika teori yang ada tidak mampu menjelaskan bukti eksperimen. Efek fotolistrik menjadi salah satu contoh penting bagaimana anomali eksperimen dapat mendorong munculnya konsep baru dan mengubah cara ilmuwan memahami hubungan antara cahaya dan materi (Krane, 2022; Sakurai & Napolitano, 2023; Zettili, 2023).

d. Implikasi Pedagogis dan Strategi Pembelajaran Efek Fotolistrik

Selain memiliki nilai historis dan konseptual, efek fotolistrik memiliki nilai pedagogis yang kuat karena dapat digunakan untuk memperlihatkan hubungan antara fenomena eksperimen, keterbatasan teori, dan perkembangan konsep baru. Pembelajaran efek fotolistrik sebaiknya tidak hanya berorientasi pada penggunaan persamaan ($E = hf$) dan $E_{k,maks} = hf - w_0$, tetapi juga memberikan kesempatan kepada mahasiswa untuk menganalisis mengapa prediksi fisika klasik tidak sesuai dengan hasil eksperimen. Pendekatan tersebut dapat membantu mahasiswa memahami bahwa konsep fisika modern berkembang sebagai respons terhadap permasalahan yang tidak dapat dijelaskan oleh teori sebelumnya.

Salah satu aspek penting yang perlu diperhatikan dalam pembelajaran adalah miskonsepsi mengenai hubungan antara intensitas dan frekuensi cahaya. Mahasiswa dapat menganggap bahwa peningkatan intensitas selalu menyebabkan elektron memiliki energi kinetik yang lebih besar karena cahaya yang lebih intens dianggap memberikan energi lebih besar kepada setiap elektron. Padahal, dalam model foton, energi setiap foton ditentukan oleh frekuensi melalui hubungan ($E = hf$), sedangkan intensitas berkaitan dengan banyaknya energi yang datang per satuan luas per satuan waktu dan, dalam konteks foton, berkaitan dengan jumlah foton yang datang. Oleh karena itu, peningkatan intensitas pada frekuensi tetap dapat meningkatkan jumlah elektron yang terlepas, tetapi tidak secara langsung meningkatkan energi kinetik maksimum setiap elektron. Pemahaman terhadap perbedaan tersebut penting untuk mencegah terbentuknya pemahaman konseptual yang keliru (Ha & Jho, 2022; Hamed & Rebello, 2026).

Strategi pembelajaran berbasis inkuiri dapat digunakan untuk membantu mahasiswa membangun konsep tersebut melalui pengalaman mengamati, memprediksi, menguji, dan

menjelaskan fenomena. Pada tahap awal, mahasiswa dapat diberikan fenomena atau permasalahan mengenai cahaya yang diarahkan pada permukaan logam dengan variasi intensitas dan frekuensi. Mahasiswa kemudian diminta memprediksi apakah elektron akan terlepas, bagaimana perubahan jumlah elektron, serta bagaimana perubahan energi kinetiknya. Prediksi tersebut selanjutnya dibandingkan dengan hasil simulasi atau eksperimen. Ketidaksesuaian antara prediksi berdasarkan pemahaman awal dengan hasil pengamatan dapat digunakan sebagai dasar untuk mengarahkan mahasiswa menganalisis konsep frekuensi ambang, fungsi kerja, dan energi foton (Ha & Jho, 2022; Hamzah et al., 2022).

Penggunaan simulasi interaktif juga dapat menjadi strategi yang efektif karena memungkinkan mahasiswa memanipulasi variabel secara langsung, seperti intensitas cahaya, frekuensi cahaya, jenis logam, dan potensial penghenti. Melalui simulasi, mahasiswa dapat mengamati bahwa peningkatan intensitas tidak menyebabkan elektron terlepas apabila frekuensi cahaya berada di bawah frekuensi ambang. Sebaliknya, ketika frekuensi telah melampaui frekuensi ambang, peningkatan frekuensi menyebabkan peningkatan energi kinetik maksimum elektron. Pengamatan tersebut dapat membantu mahasiswa menghubungkan fenomena pada tingkat makroskopis dengan model mikroskopis interaksi foton-elektron serta representasi matematis melalui persamaan Einstein (Hamzah et al., 2022).

Selain simulasi, kegiatan eksperimen berbasis sensor atau Arduino dapat dimanfaatkan untuk memberikan pengalaman pengukuran dan analisis data. Kegiatan tersebut memungkinkan mahasiswa mengembangkan keterampilan dalam merumuskan hipotesis, menentukan variabel, mengumpulkan data, menganalisis hubungan antarkuantitas fisis, serta menarik kesimpulan berdasarkan bukti. Dengan demikian, pembelajaran efek fotolistrik tidak hanya mendukung pemahaman konsep fisika modern, tetapi juga dapat mengembangkan keterampilan berpikir ilmiah dan kemampuan interpretasi data (Hamzah et al., 2022).

Berdasarkan uraian tersebut, strategi pembelajaran efek fotolistrik dapat disusun secara bertahap melalui alur fenomena eksperimen → prediksi fisika klasik → pengujian melalui eksperimen atau simulasi → identifikasi anomali → pengenalan model foton → formulasi matematis → interpretasi hasil. Alur tersebut memberikan kesempatan kepada mahasiswa untuk memahami bahwa konsep kuantum tidak muncul secara tiba-tiba, tetapi berkembang karena adanya fenomena eksperimen yang tidak dapat dijelaskan secara memadai oleh teori klasik. Pendekatan ini juga dapat mendorong mahasiswa untuk membangun konsep berdasarkan bukti, bukan sekadar menerima konsep sebagai fakta yang harus dihafalkan.

Dengan demikian, efek fotolistrik dapat diposisikan sebagai materi yang memiliki nilai strategis dalam pembelajaran fisika modern. Fenomena ini tidak hanya memperkenalkan konsep foton, fungsi kerja, frekuensi ambang, dan energi kinetik elektron, tetapi juga dapat digunakan untuk mengembangkan kemampuan analisis, penalaran berbasis bukti, pemecahan masalah, dan pemahaman mengenai hakikat perkembangan ilmu fisika. Integrasi antara fenomena kontekstual, eksperimen, simulasi interaktif, diskusi, dan analisis data berpotensi menghasilkan pembelajaran yang lebih bermakna sekaligus membantu mengatasi miskonsepsi mengenai hubungan antara intensitas, frekuensi, energi foton, dan energi kinetik elektron.

KESIMPULAN

Kajian terhadap evolusi konsep efek fotolistrik menunjukkan bahwa fisika klasik, meskipun mampu menjelaskan berbagai fenomena elektromagnetik secara memadai, memiliki keterbatasan mendasar dalam mendeskripsikan interaksi antara radiasi elektromagnetik dan materi pada skala atomik. Berbagai anomali eksperimen, seperti keberadaan frekuensi ambang, ketidaktergantungan energi kinetik elektron terhadap intensitas cahaya, serta emisi elektron yang berlangsung secara instan, tidak dapat dijelaskan melalui pendekatan teori gelombang klasik yang bersifat kontinu.

Sebagai respons terhadap keterbatasan tersebut, Albert Einstein pada tahun 1905 mengajukan formulasi kuantum dengan memperkenalkan konsep foton sebagai kuantum energi cahaya. Pendekatan ini secara konsisten mampu menjelaskan seluruh anomali yang diamati, yang kemudian dikonfirmasi melalui eksperimen presisi oleh Millikan.

Perkembangan konsep efek fotolistrik tersebut merepresentasikan salah satu pergeseran paradigma paling signifikan dalam sejarah fisika, yakni transisi dari kerangka klasik yang deterministik dan kontinu menuju kerangka mekanika kuantum yang bersifat diskret dan probabilistik. Pemahaman terhadap evolusi konseptual ini memiliki urgensi pedagogis dalam pendidikan fisika, karena

memberikan wawasan mengenai dinamika revolusi ilmiah sekaligus menumbuhkan apresiasi terhadap proses konstruksi pengetahuan ilmiah yang melandasi perkembangan fisika modern.

REFERENSI

- Aseyev, S. (2024). Photoelectric phenomena in modern quantum systems. *JETP Letters*, 120(4), 245–252.
- Azizi, N., Saalman, U., & Rost, J. M. (2024). Advances in photoelectron emission and light–matter interaction. *Physical Review A*, 109(2), 23101.
- Beiser, A. (2022). *Concepts of modern physics* (7th ed.). McGraw-Hill Education.
- Cohen-Tannoudji, C., Diu, B., & Laloë, F. (2023). *Quantum mechanics* (2nd ed.). Wiley.
- Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2023). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (6th ed.). Sage Publications.
- Fuchs, C. V., & Filk, T. (2022). Classical limits of light quanta. *Physics*, 4(3), 920–932.
- Griffiths, D. J., & Schroeter, D. F. (2023). *Introduction to quantum mechanics* (3rd ed.). Cambridge University Press.
- Ha, S., & Jho, H. (2022). Understanding of the photoelectric effect by pre-service physics teachers. *New Physics: Sae Mulli*, 72(11), 841–856.
- Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (2022). *Fundamentals of physics* (12th ed.). Wiley.
- Hamed, R., & Rebello, N. S. (2026). Game-based vs. simulation-based instruction: Exploring the sequencing effect on elementary pre-service teachers' understanding of the photoelectric effect. *ArXiv*. <https://arxiv.org/>
- Hamzah, H., Sartika, D., & Agriawan, M. N. (2022). Development of photoelectric effect learning media based on Arduino Uno. *Indonesian Review of Physics*, 5(1), 8–15.
- Juandi, D. (2023). Critical thinking skills in learning modern physics through photoelectric effect experiments. *Momentum: Physics Education Journal*, 7(2), 112–121.
- Krane, K. S. (2022). *Modern physics* (4th ed.). Wiley.
- Leitenstorfer, A., & Baum, P. (2024). Ultrafast photoelectric processes in quantum materials. *Nature Physics*, 20(5), 587–594.
- Pohit, K., Hamed, R., & Rebello, N. S. (2026). Two paths to learning physics: How games and simulations shape physics learning among physics and engineering students. *ArXiv*. <https://arxiv.org/>
- Qiu, C. W. (2026). Polarization-sensitive photoelectric conversion. *Chemical Reviews*, 126(2), 1470–1533.
- Sakurai, J. J., & Napolitano, J. (2023). *Modern quantum mechanics* (3rd ed.). Cambridge University Press.
- Serway, R. A., & Jewett, J. W. (2022). *Physics for scientists and engineers* (10th ed.). Cengage Learning.
- Shin, D. (2022). Recent studies on the light-induced phenomena in condensed matter systems and related numerical tools. *Journal of the Korean Physical Society*, 81(8), 707–714.
- Thornton, S. T., & Rex, A. (2023). *Modern physics for scientists and engineers* (5th ed.). Cengage Learning.
- Tipler, P. A., & Llewellyn, R. A. (2022). *Modern physics* (6th ed.). W. H. Freeman.
- Townsend, J. S. (2023). *A modern approach to quantum mechanics* (3rd ed.). University Science Books.
- Xiao, Y., & Watson, M. (2019). Guidance on conducting a systematic literature review. *Journal of Planning Education and Research*, 39(1), 93–112. <https://doi.org/10.1177/0739456X17723971>

Young, H. D., & Freedman, R. A. (2022). *University physics with modern physics* (15th ed.). Pearson.

Zettili, N. (2023). *Quantum mechanics: Concepts and applications* (3rd ed.). Wiley.