



Pengembangan Media Pembelajaran Interaktif Berbasis Game pada Materi Prinsip Ketidakpastian Menggunakan Scratch

Marsela Zahlia, Zahwa Nur Salsabillah, Revanola Gusti Syahrani, Hamdi Akhsan*, Melly Ariska

Program Studi Pendidikan Fisika Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan Universitas Sriwijaya, Palembang, Indonesia

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan media pembelajaran interaktif berbasis *Game-Based Learning* (GBL) menggunakan Scratch untuk mengajarkan Prinsip Ketidakpastian dalam fisika kuantum guna meningkatkan pemahaman konseptual mahasiswa. Permasalahan utama yang melatarbelakangi penelitian ini adalah sifat konsep fisika kuantum yang sulit dipahami, sehingga sering menyebabkan rendahnya pemahaman dan minimnya keterlibatan mahasiswa ketika diajarkan melalui metode tradisional. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui validitas media dan perubahan pemahaman konsep mahasiswa dalam pembelajaran Prinsip Ketidakpastian melalui simulasi interaktif dan pengalaman bermain (*gamified learning*). Metode penelitian yang digunakan adalah Research and Development (R&D) dengan model ADDIE (*Analysis, Design, Development, Implementation, dan Evaluation*). Data penelitian dikumpulkan melalui angket respons Mahasiswa Program Studi Pendidikan Fisika Angkatan 2024, Universitas Sriwijaya untuk menilai kelayakan media. Hasil penelitian menunjukkan bahwa media pembelajaran berbasis Scratch yang dikembangkan memiliki indeks validitas sebesar 0,603-0,918 dengan kategori valid hingga sangat valid, sehingga layak digunakan sebagai media pembelajaran. Selain itu, mahasiswa menunjukkan perubahan pemahaman konsep setelah mengikuti pembelajaran. Integrasi prinsip *Game-Based Learning* pada platform Scratch terbukti menjadi pendekatan yang efektif dan menarik untuk mengajarkan Prinsip Ketidakpastian, mendorong pembelajaran aktif dalam meningkatkan pemahaman mahasiswa terhadap konsep fisika kuantum yang bersifat abstrak.

Masuk:
27 Oktober 2025
Diterima:
28 Desember 2025
Diterbitkan:
31 Desember 2025

Kata kunci:

Teknologi Pendidikan,
Game-Based Learning,
Media Pembelajaran
Interaktif, Fisika
Kuantum,
Prinsip Ketidakpastian

PENDAHULUAN

Perkembangan zaman di era digital telah mengubah secara signifikan sistem pendidikan, termasuk dalam cara dosen menyampaikan materi dan cara mahasiswa memahami pelajaran. Kurikulum Merdeka yang kini diterapkan di berbagai satuan pendidikan menekankan pentingnya pembelajaran yang bermakna, berbasis aktivitas, dan kontekstual. Seiring perkembangannya,

pemanfaatan teknologi menjadi salah satu indikator kemajuan dalam sistem pendidikan (Sabilla, et al., 2025). Pendidikan merupakan usaha sadar yang dilakukan untuk membimbing dan mempersiapkan mahasiswa pada kehidupan di masa depan. Era saat ini, digitalisasi menjadi bagian tak terpisahkan dari dunia pendidikan. Penggunaan teknologi bukan hanya mempermudah proses pembelajaran,

*Korespondensi: Hamdi Akhsan  hamdiakhsan@fkip.unsri.ac.id
Jl. Raya Palembang - Prabumulih KM.32, Indralaya, Ogan Ilir, Sumatera Selatan.

 Universitas Sriwijaya,

tetapi juga mendorong pendidik untuk mengembangkan inovasi pembelajaran yang dapat meningkatkan minat belajar mahasiswa (Delia, et al., 2023).

Pembelajaran fisika menuntut pemahaman konsep yang mendalam, bukan sekadar penguasaan rumus. Namun, dalam praktiknya, mahasiswa masih cenderung pasif, jarang bertanya, dan sering mengalami miskonsepsi ketika menghadapi permasalahan konseptual. Kondisi ini menunjukkan bahwa pemahaman konsep menjadi aspek fundamental dalam pembelajaran sains karena berkaitan dengan kemampuan mahasiswa menafsirkan, mengklasifikasikan, dan menerapkan pengetahuan dalam berbagai situasi. Selain itu, minat belajar turut memengaruhi Keterlibatan mahasiswa dalam proses ini juga erat kaitannya dengan minat dan motivasi belajar. Meskipun beberapa penelitian menyatakan bahwa motivasi dapat menjadi pendorong untuk meningkatkan pemahaman konsep (Rohmah, et al., 2025; Schunk, et al., 2020; Wigfield, et al., 2010), hubungan ini tidak selalu linier dan searah. Sebagian literatur justru menunjukkan bahwa peningkatan pemahaman konsep itu sendirilah yang dapat memperkuat minat dan motivasi intrinsik mahasiswa (Hidi & Renninger, 2010). Kedua aspek ini pemahaman konsep dan motivasi perlu dibangun secara sinergis dalam pembelajaran.

Dalam konteks fisika modern, salah satu materi yang paling menantang bagi mahasiswa adalah Prinsip Ketidakpastian Heisenberg. Konsep ini bersifat menyimpang jauh dari pengalaman sehari-hari, bertentangan dengan logika fisika Newtonian, dan memerlukan pemodelan matematis serta imajinasi yang kompleks untuk dapat dipahami. Banyak mahasiswa kesulitan menghubungkan prinsip ketidakpastian dengan fenomena nyata seperti interferensi elektron atau efek tunneling, sehingga pembelajaran cenderung berfokus pada hafalan, bukan konstruksi makna konseptual. Hal ini sejalan dengan temuan bahwa pemahaman mahasiswa terhadap konsep mekanika

kuantum sering terhambat oleh rendahnya kemampuan representasi visual dan kurangnya media pembelajaran yang interaktif (McKagan, et al., 2021).

Sejalan dengan perkembangan teknologi pendidikan, *Game-Based Learning* (GBL) menjadi salah satu pendekatan yang efektif untuk meningkatkan keterlibatan dan pemahaman mahasiswa terhadap konsep-konsep yang sulit dipahami. Penggunaan Scratch sebagai platform visual coding memungkinkan mahasiswa menciptakan simulasi sederhana berbasis *Game* interaktif, sehingga mahasiswa dapat mempelajari konsep kuantum secara eksploratif dan eksperimental. Model pembelajaran seperti ini juga sejalan dengan teori *experiential learning* dari Kolb, yang menekankan bahwa pengetahuan diperoleh melalui pengalaman langsung dan refleksi terhadap hasil kegiatan belajar (Zamroni, et al., 2023).

Selain itu, media pembelajaran interaktif berbasis *Game* telah terbukti mampu meningkatkan motivasi intrinsik dan pemahaman konseptual mahasiswa, karena memberikan ruang bagi mereka untuk berperan aktif dalam proses pembelajaran. Bukti terkini memperkuat temuan ini. Penelitian oleh Sailer et al. (2020) dalam sebuah meta-analisis menyimpulkan bahwa gamifikasi pembelajaran menunjukkan tren peningkatan motivasi intrinsik dan keterlibatan kognitif dengan cara memenuhi kebutuhan psikologis dasar akan kompetensi, otonomi, dan keterhubungan. Lebih lanjut, studi eksperimental Chen et al. (2022) menunjukkan bahwa mahasiswa yang belajar dengan *Game-Based Learning* menunjukkan pemahaman konseptual yang lebih dalam dan retensi memori jangka panjang yang lebih baik dibandingkan kelompok kontrol, karena mekanisme *active learning* dan umpan balik langsung yang disediakan oleh lingkungan *Game*. Dalam konteks Fisika Kuantum, pendekatan ini memungkinkan mahasiswa tidak hanya memahami

hubungan matematis dari persamaan ketidakpastian, tetapi juga melihat cara konsep tersebut termanifestasi dalam simulasi gerak partikel dan interferensi kuantum (Hwang, et al., 2020).

Dengan demikian, Artikel ini bertujuan untuk mengetahui validitas media pembelajaran interaktif berbasis *Game-Based Learning* yang menggunakan Scratch pada materi Prinsip Ketidakpastian dalam Fisika Kuantum untuk meningkatkan pemahaman konsep mahasiswa. Diharapkan media ini mampu meningkatkan pemahaman konsep mahasiswa sekaligus menumbuhkan minat belajar fisika dengan menghadirkan pengalaman belajar yang kontekstual, visual, dan menyenangkan.

KAJIAN TEORI

Makna Fisik Prinsip Ketidakpastian

Dalam mekanika kuantum, partikel seperti elektron tidak digambarkan sekadar sebagai “bola” yang memiliki posisi & momentum yang pasti setiap saat, melainkan sebagai entitas yang memiliki sifat gelombang: ia digambarkan oleh sebuah fungsi gelombang $\psi(x, t)$. partikel materi dapat dipahami sebagai “objectively real wave packet” yang merambat dan sekaligus membawa kuantitas seperti energi-momentum dan muatan. Fungsi gelombang $\psi(x, t)$ memberi probabilitas menemukan partikel pada posisi x dan waktu t lewat $|\psi(x, t)|^2$. Jadi sebelum pengukuran, bukan “posisi tunggal” yang dimiliki oleh elektron, melainkan sebaran probabilistik dalam ruang dan juga momentum (Aristarhov, 2023).

Karena ψ dapat dianggap sebagai superposisi dari banyak gelombang (*plane-waves*) dengan berbagai k (momentum) maka secara matematis posisi dan momentum menjadi variabel Fourier-konjugat: semakin sempit distribusi posisi semakin lebar distribusi momentum, dan sebaliknya. Dari sisi fisik jika mencoba membuat ψ sangat terlokalisasi (posisi “pasti”), maka kita harus superposisi banyak komponen gelombang dengan k cukup berbeda (momentum tak pasti

besar). Sebaliknya, jika momentum sangat pasti (hanya satu k), maka ψ adalah gelombang panjang yang menyebar dan posisi sangat tak pasti. Hal ini menjelaskan mengapa produk ketidakpastian posisi-momentum $\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$ muncul bukan karena alat ukur yang jelek, tetapi karena sifat gelombang-materi itu sendiri (Zengel, 2024)

Banyak masih beranggapan bahwa ketidakpastian hanya timbul karena “alat ukur” mengganggu partikel (misalnya ilustrasi mikroskop Heisenberg) namun sebenarnya, ketidakpastian ini merupakan karakteristik intrinsik dari sistem kuantum, karena sifat gelombang-partikel. Ketika kita menyatakan bahwa sebelum pengukuran “elektron tidak memiliki posisi tunggal”, itu bukan karena kita belum tahu melainkan karena secara fisik sistem tidak dalam keadaan “posisi tunggal” yang ditetapkan. Prinsip ketidakpastian untuk posisi-momentum secara matematis dinyatakan sebagai:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2} \quad (1)$$

Δx dan Δp adalah deviasi standar (atau ukuran lebar) dari distribusi posisi dan momentum.

Dalam interpretasi standar mekanika kuantum, ketika dilakukan pengukuran, fungsi gelombang yang sebelumnya menyebar (superposisi berbagai kemungkinan) “kolaps” ke salah satu keadaan eigen dari pengukuran yang dilakukan. Sebagai ilustrasi: sebelum pengukuran posisi, $\psi(x)$ menyebar; saat kita mengukur dan menemukan partikel di x_0 , secara instan sistem berubah menjadi keadaan “posisi = x_0 ”. Hubungan dengan dualisme gelombang-partikel: gelombang (fungsi gelombang) menggambarkan probabilitas penyebaran; partikel adalah manifestasi terukur yang terjadi saat kolaps. arena sebelum pengukuran sistem berada dalam superposisi, maka pengukuran satu variabel (misalnya posisi) “memaksa” sistem ke keadaan eigen sehingga variabel konjugat (momentum) menjadi sangat tak pasti kembali atau “teracak” dalam distribusi yang lebih lebar. Ini menjelaskan mengapa pengukuran

posisi secara “tepat” menyebabkan momentum menjadi sangat tak pasti bukan hanya karena alat ukur mengganggu, tetapi karena setelah kolaps, sistem berada dalam keadaan “posisi pasti” yang gelombang-untuk-momentumnya sangat tersebar (Li, 2025).

Hubungan Prinsip Ketidakpastian dengan Dualisme Gelombang-Partikel

Dalam fisika kuantum, dualisme gelombang-partikel menyatakan bahwa setiap entitas mikroskopik (seperti elektron atau foton) memiliki sifat ganda gelombang (menunjukkan interferensi, difraksi) dan partikel (memiliki posisi, momentum, dan energi diskrit). Sementara itu, Prinsip Ketidakpastian Heisenberg menyatakan bahwa tidak mungkin mengukur secara bersamaan posisi (x) dan momentum (p) suatu partikel dengan ketepatan tak terbatas:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{h}{4\pi} \quad (2)$$

Artinya, semakin pasti posisi partikel, semakin tidak pasti momentumnya dan sebaliknya. Prinsip ini bukan sekadar keterbatasan alat ukur, melainkan sifat intrinsik dari kenyataan kuantum itu sendiri (Spegel-Lexne, 2024)

Dalam mekanika kuantum, dualisme gelombang partikel menggambarkan bahwa setiap entitas mikroskopik seperti elektron atau foton dapat memperlihatkan sifat sebagai gelombang maupun sebagai partikel, tergantung pada cara pengamatannya. Ketika suatu partikel diamati untuk menentukan jalurnya (bersifat partikel), maka pola interferensi gelombangnya hilang. Sebaliknya, jika percobaan difokuskan pada interferensi (bersifat gelombang), maka informasi tentang jalur yang ditempuh menjadi tidak dapat diketahui. Fenomena ini menunjukkan adanya keterbatasan pengetahuan terhadap dua sifat fisik yang saling berlawanan, yang sejalan dengan Prinsip Ketidakpastian Heisenberg. Hubungan komplementer antara kedua sifat tersebut yang dapat dirumuskan secara matematis

dengan batasan tertentu yang ditentukan oleh entropi kuantum. Semakin besar tingkat koherensi atau sifat gelombang yang dimiliki suatu partikel, semakin kecil tingkat kepastian mengenai jalurnya, dan sebaliknya. Dengan demikian, entropi berperan sebagai ukuran ketidakpastian yang menjadi jembatan penghubung antara aspek gelombang dan partikel. dualisme gelombang-partikel dan prinsip ketidakpastian merupakan dua sisi dari fenomena kuantum yang sama, yaitu keterbatasan fundamental informasi yang dapat diperoleh dari sistem kuantum. Mereka menunjukkan bahwa prinsip komplementaritas Bohr dapat dinyatakan ulang dalam bentuk relasi informasi, koherensi (gelombang) dan pengetahuan jalur (partikel) mengikuti hubungan pertukaran informasi (*information trade-off*) yang diatur oleh hukum entropi. Penelitian ini memberikan landasan teoritis baru untuk memahami keterkaitan antara aspek fisik dan informasi dari sistem kuantum, sekaligus memperluas makna prinsip ketidakpastian dari sekadar batas pengukuran menjadi batas informasi kuantum yang bersifat universal (Yang, 2024)

Prinsip Ketidakpastian Heisenberg menyatakan bahwa pasangan variabel komplementer seperti posisi x dan momentum p tidak dapat ditentukan secara arbitrari dengan ketepatan simultan:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2} \quad (3)$$

Δx dan Δp masing-masing adalah simpangan baku dari posisi dan momentum, dan $\hbar$ adalah konstanta Planck dibagi 2π . Prinsip ini mencerminkan bahwa semakin sempit distribusi posisi (lebih “terlokalisasi” seperti sifat partikel), maka semakin lebar distribusi momentum (lebih tidak pasti), dan begitu pula sebaliknya. Sementara itu, Dualisme Gelombang-Partikel menegaskan bahwa entitas kuantum seperti elektron atau foton dapat memperlihatkan sifat gelombang (interferensi, difraksi) maupun sifat partikel (jalur, lokasi) tergantung

pada bagaimana pengamatannya dilakukan. Hubungan antar keduanya muncul karena saat kita mencoba “mengetahui” jalur partikel (sebagai sifat partikel) maka kemampuan untuk memperlihatkan pola interferensi (sifat gelombang) berkurang, dan hal ini dapat diartikan sebagai manifestasi dari batas ketidakpastian dalam sistem kuantum (Bagan, 2020).

Relasi dualisme gelombang-partikel dapat diformulasikan dalam kerangka teori informasi kuantum melalui relasi entropi, yang secara langsung berkaitan dengan ketidakpastian yang diukur bukan hanya sebagai simpangan baku tetapi sebagai batas informasi. Contohnya, visibilitas interferensi V (sifat gelombang) dan *distinguishability* jalur D (sifat partikel) sering kali memenuhi relasi seperti

$$D^2 + V^2 \leq 1 \quad (4)$$

Yang menunjukkan *trade-off* antara sifat partikel dan gelombang. Dengan memandangnya melalui lensa ketidakpastian, semakin besar kemampuan kita memperoleh “*which-way information*” (jalur) maka semakin rendah kemampuan sistem untuk menghasilkan interferensi (gelombang), yang berarti distribusi momentum atau fase menjadi lebih tak pasti. Relasi dualisme gelombang-partikel secara eksperimental ekuivalen dengan relasi ketidakpastian entropik, sehingga dualisme dan ketidakpastian sebenarnya adalah dua cara melihat satu prinsip kuantum yang sama, yaitu keterbatasan pengetahuan simultan terhadap sifat-sifat komplementer. (Spegel-Lexne, 2024).

Implikasi terhadap Konsep Energi dan Keadaan Partikel

Prinsip Ketidakpastian Heisenberg tidak hanya berhubungan dengan posisi dan momentum, tetapi juga memiliki implikasi mendalam terhadap konsep energi dan keadaan partikel dalam mekanika kuantum. Ketidakpastian posisi dan momentum menyebabkan keadaan energi partikel tidak selalu dapat

ditentukan secara pasti. Dalam mekanika klasik, energi suatu sistem dapat dihitung dengan ketepatan tinggi karena besaran-besaran fisik seperti posisi dan kecepatan dapat diukur secara presisi. Pada ranah kuantum, pengukuran posisi dengan ketelitian tinggi akan memperbesar ketidakpastian momentum, yang pada gilirannya menimbulkan ketidakpastian dalam energi partikel tersebut (Ubben et al., 2023).

Dalam konteks fungsi gelombang, keadaan partikel dapat berupa keadaan eigen energi (energy eigenstate) atau superposisi dari beberapa keadaan eigen energi. Pada keadaan eigen energi, hasil pengukuran energi akan selalu memberikan nilai yang sama, karena sistem berada dalam kondisi stasioner. Sebaliknya, ketika partikel berada dalam keadaan superposisi, hasil pengukuran energi menjadi probabilistik, yang berarti energi tidak lagi memiliki nilai tunggal tetapi tersebar pada beberapa kemungkinan. Hal ini menunjukkan bahwa konsep energi dalam mekanika kuantum bersifat probabilistik dan tidak deterministik seperti dalam fisika klasik (Nikolaus et al., 2024).

Hubungan ketidakpastian waktu-energi juga menggambarkan keterbatasan dalam mengetahui energi suatu sistem dalam selang waktu tertentu. Keadaan dengan waktu hidup yang sangat singkat akan memiliki rentang energi yang lebih lebar (*line broadening*), sebagaimana diamati pada fenomena spektrum atom. Hal ini menunjukkan bahwa semakin tidak stabil suatu keadaan partikel, semakin besar ketidakpastian energinya (Li et al., 2025).

Implikasi pedagogis dari konsep ini adalah perlunya membantu mahasiswa memahami bahwa energi dalam mekanika kuantum tidak sekadar “jumlah kerja” seperti dalam konsep klasik, melainkan hasil interaksi antara probabilitas dan fungsi gelombang partikel. Perubahan pemahaman ini menuntut pendekatan pembelajaran berbasis simulasi dan visualisasi, seperti penggunaan media

PhET untuk menunjukkan hubungan antara pelebaran fungsi gelombang dengan ketidakpastian energi. Mahasiswa tidak hanya memahami prinsip ketidakpastian secara matematis, tetapi juga memahami makna fisik di balik keterbatasan pengukuran energi dan keadaan partikel (Bouchée, 2022).

Pergeseran Paradigma Pemikiran Mahasiswa

Pemahaman terhadap prinsip ketidakpastian dan konsep-konsep dasar mekanika kuantum menuntut terjadinya pergeseran paradigma berpikir mahasiswa dari cara pandang deterministik klasik menuju cara berpikir probabilistik-kuantum. Dalam paradigma klasik, mahasiswa terbiasa menganggap bahwa setiap fenomena fisika memiliki penyebab yang pasti dan dapat diprediksi sepenuhnya. Sebaliknya, mekanika kuantum menuntut pemahaman bahwa pengukuran terhadap suatu sistem justru memengaruhi keadaan sistem itu sendiri, sehingga hasil pengukuran bersifat probabilistik (Li et al., 2025).

Penelitian pendidikan fisika dalam lima tahun terakhir menunjukkan bahwa salah satu kesulitan utama mahasiswa adalah mempertahankan intuisi klasik ketika mempelajari konsep kuantum, misalnya menganggap elektron memiliki lintasan pasti seperti planet yang mengorbit matahari. Pergeseran paradigma ini tidak dapat dicapai hanya melalui ceramah atau penyajian matematis, tetapi memerlukan strategi pembelajaran yang bersifat konflik kognitif, yaitu menantang keyakinan awal mahasiswa dengan bukti atau simulasi yang tidak dapat dijelaskan oleh konsep klasik (Ubben et al., 2023).

Bouchée (2022) menegaskan bahwa proses *conceptual change* dalam pembelajaran kuantum dapat difasilitasi melalui tiga tahapan utama:

- 1) Konfrontasi, yaitu menghadapkan mahasiswa dengan fenomena yang bertentangan dengan intuisi klasik mereka;

- 2) Resolusi, yaitu memberikan model kuantum yang dapat menjelaskan fenomena tersebut; dan
- 3) Internalisasi, yaitu membimbing mahasiswa untuk menerapkan model baru tersebut dalam konteks yang berbeda. Pendekatan ini efektif digunakan dalam *Quantum Interactive Learning Tutorials* (QuILTs) yang telah terbukti meningkatkan pemahaman konseptual mahasiswa (Nikolaus et al., 2024).

Pergeseran paradigma berpikir mahasiswa bukan sekadar perubahan pemahaman terhadap satu konsep, melainkan perubahan cara pandang terhadap hakikat pengetahuan ilmiah. Mahasiswa belajar bahwa ilmu pengetahuan, khususnya fisika kuantum, tidak selalu memberikan kepastian mutlak, melainkan menawarkan model matematis yang mampu memprediksi probabilitas hasil pengukuran dengan tingkat akurasi tertentu. Pemahaman ini menjadikan pembelajaran fisika bukan hanya sebagai kegiatan menghafal rumus, tetapi sebagai proses reflektif yang mengubah cara berpikir dan melihat dunia fisika secara lebih mendalam.

METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam penelitian adalah penelitian dan pengembangan (*Research and Development*) yang bertujuan untuk menghasilkan produk berupa media pembelajaran interaktif berbasis *Game-Based Learning* dengan Scratch pada materi Prinsip Ketidakpastian serta menguji kelayakan media dalam meningkatkan pemahaman konsep mahasiswa. Penelitian yang digunakan dalam studi ini adalah penelitian dan pengembangan, yang bertujuan untuk menciptakan suatu produk serta menguji keefektifannya. Penelitian ini menggunakan model pengembangan ADDIE, yang terdiri dari lima tahapan yaitu analisis, perancangan, pengembangan, implementasi, dan evaluasi yang bersifat sistematis dan terstruktur. Model ini dipilih karena

mampu menjamin keterorganisasian proses pengembangan media pembelajaran agar menghasilkan produk yang valid (Sabilla, et al. 2025).

Tahapan kegiatan mengacu pada langkah-langkah model ADDIE sebagai berikut:

1. *Analysis* (Analisis)

Tahap analisis, dilakukan observasi untuk mengidentifikasi kebutuhan pembelajaran, kesiapan teknologi, dan aksesibilitas media.

2. *Design* (Perancangan)

Tahap ini mencakup penyusunan materi, *flowchart*, dan *storyboard*, dengan Scratch sebagai platform pengembangan.

3. *Development* (Pengembangan)

Tahap pengembangan menghasilkan media digital interaktif, divalidasi oleh ahli menggunakan instrumen LORI (*Learning Objects Review Instrument*) dan dianalisis dengan skala Likert.

4. *Implementation* (Implementasi)

Tahap implementasi dilakukan dengan mengujicobakan media dalam pembelajaran di kelas. Tahap implementasi dilakukan di kelas. Mahasiswa mengerjakan *pre-test*, mengikuti pembelajaran dengan media, lalu mengerjakan *post-test* untuk mengukur peningkatan pemahaman konsep. Setelahnya, mahasiswa mengisi angket kepraktisan.

5. *Evaluation* (Evaluasi)

Tahap Evaluasi dalam penelitian ini dilakukan secara menyeluruh pada setiap tahap pengembangan guna menilai keberhasilan proses serta hasil produk yang diperoleh. Tahap Evaluasi dalam penelitian ini meliputi tiga aspek, yaitu kevalidan, kepraktisan, dan keefektifan. Kevalidan diperoleh dari angket ahli media dan ahli materi. Kepraktisan dinilai melalui angket mahasiswa. Keefektifan diukur dari perbandingan hasil *pre-test* dan *post-test* yang dianalisis secara deskriptif.

HASIL

Pemahaman Awal Mahasiswa terhadap Prinsip Ketidakpastian

Hasil analisis *pre-test* pada tahap analisis model pengembangan ADDIE menunjukkan bahwa 85% (17 dari 20) mahasiswa semester III masih mengalami miskonsepsi mendasar mengenai sifat partikel subatomik, khususnya elektron. Sebanyak 17 mahasiswa tersebut beranggapan bahwa posisi elektron dapat diketahui secara pasti jika dilakukan pengukuran dengan instrumen yang cukup canggih. Pandangan ini mengindikasikan bahwa mahasiswa masih terbelenggu oleh cara berpikir mekanika klasik, posisi dan momentum suatu objek makroskopis dapat ditentukan secara bersamaan dan pasti.



Gambar 1. Tampilan antarmuka awal media pembelajaran berbasis Scratch



Gambar 2. Tampilan beranda utama media pembelajaran interaktif berbasis *Game Based Learning* pada materi Prinsip Ketidakpastian.

Menu utama terdiri atas tiga bagian: Materi, Kuis Interaktif, dan *Games (Ice Breaking)* yang menjadi pintu awal mahasiswa untuk mengeksplorasi konsep ketidakpastian posisi dan momentum elektron.

Setelah menggunakan media pembelajaran interaktif berbasis *Game*

Based Learning, terjadi pergeseran dalam pemahaman mahasiswa. Mahasiswa mulai memahami bahwa dalam sistem kuantum, semakin tinggi ketepatan pengukuran posisi (Δx kecil), maka ketidakpastian momentum (Δp) meningkat, sebagaimana dijelaskan oleh Prinsip Ketidakpastian Heisenberg.

Konsep ini menegaskan bahwa ketidakpastian bukan berasal dari keterbatasan alat ukur, tetapi merupakan sifat fundamental dari partikel kuantum itu sendiri. Melalui aktivitas eksploratif dalam *Game*, mahasiswa menyadari bahwa elektron tidak memiliki posisi pasti sebelum diukur; ia hanya dapat dinyatakan dalam bentuk fungsi gelombang $\psi(x)$ yang menggambarkan probabilitas keberadaannya di suatu lokasi (Medico, 2025).

Melalui pendekatan *Game-Based Learning*, mahasiswa tidak hanya memahami konsep ketidakpastian secara matematis, tetapi juga memperoleh pemahaman konseptual yang mendalam tentang makna fisik dari hubungan Δx dan Δp . Perubahan pemahaman konseptual mahasiswa ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel. 1 Data Pemahaman Konsep dan Keterlibatan 20 Mahasiswa Pada Pembelajaran Prinsip Ketidakpastian

Nama	Pre-Test (0-100)	Post-Test (0-100)	Peningkatan Skor
Responden 1	50	60	+10
Responden 2	30	50	+20
Responden 3	50	70	+20
Responden 4	50	60	+10
Responden 5	30	40	+10
Responden 6	20	60	+40
Responden 7	50	60	+10
Responden 8	60	70	+10
Responden 9	40	50	+10
Responden 10	60	80	+20
Responden 11	50	100	+50
Responden 12	100	100	+0
Responden 13	80	100	+20
Responden 14	60	80	+20
Responden 15	90	100	+10

Nama	Pre-Test (0-100)	Post-Test (0-100)	Peningkatan Skor
Responden 16	90	90	+0
Responden 17	80	90	+10
Responden 18	70	100	+30
Responden 19	70	100	+30
Responden 20	80	100	+20
Rata-rata	60,5	77,0	

Hasil analisis pada Tabel 1 interaksi Mahasiswa selama pembelajaran menunjukkan bahwa pemahaman terhadap hubungan antara posisi dan momentum meningkat setelah mereka berinteraksi dengan simulasi kuantum di dalam media. Sebelum pembelajaran, mahasiswa cenderung menganggap bahwa kesalahan pengukuran momentum dapat dihilangkan dengan meningkatkan ketelitian alat ukur. Namun, setelah melalui proses permainan dan diskusi, mahasiswa memahami bahwa ketidakpastian posisi dan momentum bersifat saling memengaruhi secara fundamental.

Dalam konteks eksperimen kuantum, ketika seseorang mengukur posisi elektron dengan tingkat presisi yang tinggi, gelombang yang digunakan untuk mengukur (seperti foton) akan memberikan gangguan energi kepada elektron tersebut. Akibatnya, momentumnya berubah, dan hasil pengukuran berikutnya menjadi tidak pasti. Fenomena ini menjadi ilustrasi konkret bahwa pengamat tidak dapat dipisahkan dari sistem yang diukur, sebuah konsep penting dalam mekanika kuantum (Medico, 2025).

Menurut Boe et al. (2023), pembelajaran berbasis eksperimen virtual dapat membantu mahasiswa melihat keterkaitan dinamis antara besaran posisi dan momentum secara konseptual. visualisasi prinsip ketidakpastian dalam konteks dualisme gelombang-partikel membantu mahasiswa memahami bahwa pengukuran bukan sekadar proses pasif, melainkan interaksi aktif antara sistem dan pengamat.

Secara konseptual, pembelajaran ini menegaskan bahwa dalam sistem kuantum, posisi dan momentum bukan dua besaran yang dapat diketahui secara bersamaan dengan ketelitian tak terbatas, karena keduanya diatur oleh fungsi gelombang $\psi(x)$ yang menggambarkan probabilitas keberadaan partikel. Oleh karena itu, hasil pengukuran yang diperoleh bersifat statistik dan harus ditafsirkan dalam konteks probabilistik, bukan deterministik (Rusydi, 2022).

Melalui proses pembelajaran ini, mahasiswa belajar bahwa prinsip ketidakpastian tidak menunjukkan kelemahan ilmuwan dalam melakukan pengukuran, tetapi justru menggambarkan batas alami pengetahuan dalam dunia mikroskopik. Pemahaman ini memperkuat transisi berpikir mahasiswa dari pandangan deterministik klasik menuju probabilistik kuantum, sesuai dengan

karakteristik pembelajaran fisika kuantum.

Pada penelitian ini terdapat tren peningkatan yang konsisten pada 90% responden (18 dari 20 mahasiswa) menunjukkan indikasi efektivitas media. Penelitian pengembangan (R&D) pada tahap validasi produk seringkali berfokus pada analisis deskriptif untuk menggambarkan pola dan tren sebelum melanjutkan ke uji eksperimental yang lebih ketat.

Penelitian ini menghasilkan media pembelajaran interaktif berbasis *Game* dengan Scratch pada materi Prinsip Ketidakpastian yang telah melalui tahap validasi dan uji coba kepada mahasiswa. Data hasil penelitian diperoleh melalui instrumen angket pemahaman konsep yang diberikan kepada 20 responden mahasiswa setelah menggunakan media pembelajaran yang dikembangkan.

Tabel 2. Distribusi Tingkat Persetujuan Mahasiswa Terhadap Media Pembelajaran

Interval Skor	Kategori	Jumlah Mahasiswa	Persentase
76,6-90,0	Sangat Setuju	9	45%
61,2-75,6	Setuju	11	55%
45,8-61,2	Netral	0	0%
30,4-45,8	Tidak Setuju	0	0%
15-30,4	Sangat Tidak Setuju	0	0%
Total		20	100%

Berdasarkan distribusi skor pada Tabel 2, seluruh mahasiswa memberikan respons positif hingga sangat positif terhadap peran media pembelajaran interaktif berbasis *Game* Scratch dalam meningkatkan pemahaman konsep Prinsip Ketidakpastian Heisenberg. Skor mahasiswa terdistribusi secara eksklusif dalam dua kategori tertinggi: sebanyak 9 mahasiswa (45%) berada pada kategori “Sangat Setuju” (skor 76,6–90), dan 11 mahasiswa (55%) berada pada kategori “Setuju” (skor

61,2–75,6). Tidak ada satupun mahasiswa yang masuk ke dalam kategori Netral, Tidak Setuju, maupun Sangat Tidak Setuju. Dengan skor terendah masih berada dalam rentang kategori “Setuju”, dapat disimpulkan bahwa media pembelajaran ini diterima dan dinilai efektif oleh seluruh responden dalam mendukung pemahaman konsep ketidakpastian yang dipelajari.

Tabel 3. Hasil Analisis Validitas dan Reliabilitas Instrumen Penilaian Media

No	Indeks Validitas	Reliabilitas
1	0.799	0.973
2	0.869	0.971
3	0.918	0.970
4	0.857	0.971
5	0.835	0.972
6	0.603	0.974
7	0.907	0.970
8	0.894	0.971
9	0.799	0.972
10	0.862	0.971
11	0.799	0.972
12	0.779	0.972
13	0.826	0.972
14	0.866	0.971
15	0.811	0.972
16	0.881	0.971
17	0.834	0.972
18	0.918	0.970

Berdasarkan Tabel 3, seluruh pernyataan mahasiswa menunjukkan indeks validitas yang berada pada rentang 0,603 hingga 0,918. Nilai ini menunjukkan bahwa semua pernyataan mahasiswa memiliki validitas yang baik hingga sangat baik, karena berada di atas nilai kritis 0,3. Butir pernyataan no 3 dan 18 memiliki indeks validitas tertinggi yaitu 0,918, sedangkan butir pertanyaan nomor 6 memiliki indeks validitas terendah yaitu 0,603 namun masih tergolong valid. Sementara itu, reliabilitas instrumen secara keseluruhan menunjukkan nilai yang sangat tinggi, berkisar antara 0,970 hingga 0,974. Nilai reliabilitas di atas 0,7 mengindikasikan bahwa instrumen memiliki konsistensi internal yang sangat baik dan dapat dipercaya untuk mengukur pemahaman konsep mahasiswa.

Pengembangan media pembelajaran interaktif berbasis *Game* dengan Scratch pada materi Prinsip Ketidakpastian memberikan dampak positif terhadap pemahaman konsep mahasiswa. Hal ini terlihat dari respons persetujuan mahasiswa terhadap media

yang bersifat positif dengan 45% responden mahasiswa dalam kategori "Sangat Setuju" dan 55% pada kategori "Setuju". Tidak adanya mahasiswa yang berada pada kategori netral atau negatif mengindikasikan bahwa media pembelajaran yang dikembangkan efektif dalam memfasilitasi pemahaman konsep mahasiswa.

Tingginya tingkat pemahaman konsep mahasiswa setelah menggunakan media pembelajaran berbasis Scratch dapat dijelaskan melalui beberapa aspek. Pertama, *Game* interaktif mampu menciptakan lingkungan belajar yang menarik dan memotivasi mahasiswa untuk terlibat aktif dalam proses pembelajaran. Sesuai dengan teori konstruktivisme, pembelajaran yang melibatkan interaksi aktif mahasiswa dengan materi pembelajaran akan menghasilkan pemahaman yang lebih mendalam (Maulida, et al., 2025). Media pembelajaran berbasis *Game* memungkinkan mahasiswa untuk melakukan eksplorasi, percobaan, dan mendapatkan umpan balik langsung terhadap tindakan mereka, sehingga

proses konstruksi pengetahuan berlangsung secara optimal (Qian & Clark, 2016).

Kedua, *Scratch* sebagai *platform* pemrograman visual menyediakan representasi yang konkret untuk konsep yang sulit dipahami dalam Prinsip Ketidakpastian. Media pembelajaran. Skor terendah adalah 59 yang masih berada pada kategori "Setuju", menunjukkan bahwa bahkan Mahasiswa dengan pencapaian terendah masih memiliki pemahaman konsep yang positif. Rata-rata skor keseluruhan adalah 74,7 yang berada pada kategori "Setuju", menunjukkan tingkat pemahaman konsep yang baik secara umum. Materi Prinsip Ketidakpastian Heisenberg merupakan konsep kuantum yang sulit dipahami melalui metode pembelajaran konvensional. Melalui visualisasi dan simulasi interaktif, Mahasiswa dapat mengobservasi fenomena ketidakpastian secara langsung dan membangun intuisi terhadap konsep-konsep yang kompleks.

Ketiga, aspek gamifikasi dalam media pembelajaran menciptakan pengalaman belajar yang menyenangkan dan mengurangi kecemasan Mahasiswa terhadap materi fisika yang sering dianggap sulit. Elemen-elemen *Game* seperti tantangan, pencapaian, dan sistem poin dapat meningkatkan motivasi intrinsik Mahasiswa untuk terus belajar dan menguasai materi (Hamari et al., 2014).

Analisis terhadap sebaran skor menunjukkan bahwa media pembelajaran yang dikembangkan dapat mengakomodasi kebutuhan mahasiswa dengan tingkat kemampuan yang berbeda. Meskipun terdapat variasi tingkat persetujuan mahasiswa (dari kategori Setuju hingga Sangat Setuju), seluruh mahasiswa berada pada kategori positif. Hal ini mengindikasikan bahwa media pembelajaran memiliki fleksibilitas yang memungkinkan mahasiswa belajar sesuai dengan kecepatan dan gaya belajar mereka masing-masing. Fitur interaktif dalam

Scratch memungkinkan mahasiswa untuk mengulang eksperimen dan eksplorasi sebanyak yang mereka perlukan hingga mencapai pemahaman yang diinginkan. Penelitian oleh Wilson et al (2013) menunjukkan bahwa pembuatan simulasi sains dengan *Scratch* terbukti meningkatkan pemahaman siswa tentang prinsip sebab-akibat dalam fisika melalui mekanisme manipulasi variabel dan pengulangan percobaan. Menurut Lewis (2019) lingkungan *Scratch* menciptakan ruang aman untuk eksperimen interaktif, sehingga meningkatkan kepercayaan diri dan keterlibatan belajar.

Validitas dan reliabilitas instrumen yang tinggi memperkuat kredibilitas hasil penelitian ini. Indeks validitas yang berkisar antara 0,603 hingga 0,918 menunjukkan bahwa instrumen mampu mengukur konstruk pemahaman konsep dengan baik. Reliabilitas yang sangat tinggi (0,970-0,974) mengindikasikan konsistensi pengukuran yang sangat baik, sehingga hasil penelitian dapat dipercaya dan digeneralisasi dengan lebih yakin.

Pencapaian skor sempurna oleh 4 mahasiswa menunjukkan bahwa media pembelajaran yang dikembangkan memiliki potensi untuk membawa mahasiswa mencapai pemahaman konsep yang optimal. Tidak adanya mahasiswa dengan pemahaman konsep yang rendah atau negatif mengindikasikan bahwa desain media pembelajaran sudah cukup baik dalam menyampaikan materi secara komprehensif dan mudah dipahami.

Menurut Dwiyanti dan Perdana (2024) media pembelajaran interaktif terbukti dapat meningkatkan *engagement* mahasiswa, memfasilitasi pemahaman konsep yang lebih dalam, dan meningkatkan retensi pengetahuan jangka panjang. Khususnya untuk materi fisika modern seperti Prinsip Ketidakpastian yang memerlukan kemampuan visualisasi dan abstraksi tinggi, penggunaan media pembelajaran

berbasis teknologi menjadi sangat relevan dan penting. Penelitian ini memiliki keterbatasan yang perlu diperhatikan. Evaluasi pemahaman konsep hanya dilakukan melalui instrumen angket yang mengukur persepsi mahasiswa, sehingga perlu dilengkapi dengan instrumen tes objektif untuk mengukur pemahaman konsep secara lebih komprehensif. Penelitian ini belum menggunakan kelompok kontrol, sehingga perbandingan efektivitas media pembelajaran berbasis Scratch dengan metode pembelajaran konvensional belum dapat dilakukan secara langsung.

Penelitian tahap pengembangan ini memiliki beberapa keterbatasan metodologis, termasuk tidak adanya kelompok kontrol dan analisis statistik inferensial. Namun, data deskriptif yang diperoleh memberikan indikasi awal yang positif tentang potensi media dalam meningkatkan pemahaman konsep.

Media pembelajaran interaktif berbasis *Game* dengan Scratch ini dapat dikembangkan lebih lanjut dengan menambahkan fitur-fitur yang lebih kompleks, level pembelajaran yang bertingkat, dan sistem adaptif yang dapat menyesuaikan tingkat kesulitan dengan kemampuan individual mahasiswa. Penelitian lanjutan juga dapat mengeksplorasi efektivitas media ini pada materi fisika modern lainnya serta menginvestigasi dampak jangka panjang terhadap retensi pengetahuan dan kemampuan pemecahan masalah mahasiswa.

SIMPULAN

Penelitian menunjukkan bahwa media pembelajaran interaktif berbasis *game* dengan *Scratch* pada materi Prinsip Ketidakpastian memenuhi validitas yang layak untuk digunakan dalam meningkatkan pemahaman konsep mahasiswa terhadap fisika kuantum yang sulit dipahami. Implementasi media menunjukkan peningkatan pemahaman yang signifikan dibandingkan kondisi awal, dengan capaian akhir yang tinggi. Media

yang dikembangkan juga menunjukkan hasil yang sangat baik dari segi validitas dan reliabilitas. Media ini mendapatkan respons yang sangat positif dari seluruh mahasiswa, yang menyatakan setuju.

Media ini juga fleksibel mengakomodasi keberagaman kemampuan mahasiswa, terbukti dari semua mahasiswa mengalami peningkatan pemahaman meskipun dengan variasi pencapaian. Keterbatasan penelitian meliputi penggunaan instrumen angket tanpa tes objektif tambahan dan ketiadaan kelompok kontrol untuk perbandingan efektivitas.

Penelitian ini membuktikan bahwa integrasi *game-based learning* dengan *platform* Scratch merupakan solusi efektif untuk pembelajaran konsep abstrak fisika kuantum, memberikan kontribusi signifikan bagi inovasi pembelajaran fisika di era digital, dan membuka peluang pengembangan lebih lanjut dengan fitur adaptif, level bertingkat, serta eksplorasi pada materi fisika modern lainnya.

REFERENSI

- Aristarhov, S. (2023). Heisenberg's uncertainty principle and particle trajectories. *Foundations of Physics*, 53(1), 7.
- Bouchée, T., de Putter-Smits, L., Thurlings, M., & Pepin, B. (2022). Towards a better understanding of conceptual difficulties in introductory quantum physics courses. *Studies in Science Education*, 58(2), 183-202. <https://doi.org/10.1080/03057267.2021.1963579>
- Bagan, E., Bergou, J. A., & Hillery, M. (2020). Wave-particle-duality relations based on entropic bounds for which-way information. *Physical Review A*, 102(2), 022224. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.102.022224>
- Bøe, M. V., & Viefers, S. (2023). Deskripsi ketidakpastian kuantum dan sifat

- gelombang partikel kuantum oleh siswa sekolah menengah dan universitas. *Sains & Pendidikan*, 32 (2), 297-326. <https://doi.org/10.1007/s11191-021-00297-w>
- Chen, C. H., Shih, C. C., & Law, V. (2020). The Effects of Competition in Digital *Game-Based Learning* (DGBL): a Meta-analysis. *Educational Technology Research and Development*, 68(4), 1855-1873. <https://doi.org/10.1007/s11423-020-09794-1>
- Delia, M., & Meynawati, L. (2023). Sisi Terang dan Gelap: Digitalisasi pada Perkembangan Pendidikan Indonesia. *Sinar Dunia: Jurnal Riset Sosial Humaniora dan Ilmu Pendidikan*, 3(1), 89–98. <https://doi.org/10.58192/sidu.v3i1.1771>
- Del Medico, B. (2025). Elemen filsafat kuantum: Menyelaraskan visi alam semesta yang terbuat dari “benda-benda” dengan visi alam semesta holistik, di mana “Segala sesuatu adalah Satu”. Bruno Del Medico Editore.
- Dwiyanti, N., & Perdana, R. (2024). Pengembangan Media Pembelajaran Fisika Berbantuan 3D Aplication Scratch Untuk Meningkatkan Hasil Belajar Peserta Didik Pada Topik Gelombang Bunyi. *Diffraction*, 6(1), 20–29. <https://doi.org/10.37058/diffraction.v6i1.9399>
- Guasti, M. F. (2022). Quantum uncertainty: $\Delta x \Delta p$ experimental evaluation and direct visualization. *Physics Letters A*, 448, 128332. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2022.128332>
- Hwang, G. J., Lai, C. L., & Wang, S. Y. (2020). *Gamified mobile learning to promote students' conceptual understanding and motivation in science learning*. *Computers & Education*, 153, 103896. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2020.103896>
- Hidi, S., & Renninger, K. A. (2010). The four-phase model of interest development. *Educational Psychologist*, 41(2), 111-127. https://doi.org/10.1207/s15326985ep4102_4
- Hamari, J., Koivisto, J., & Sarsa, H. (2014). Does gamification work? – A literature review of empirical studies on gamification. *Proceedings of the 47th Hawaii International Conference on System Sciences* (pp. 3025-3034). IEEE. <https://doi.org/10.1109/HICSS.2014.377>
- Lewis, P. (2019). Iterative experimentation in science learning: The role of Scratch programming. *Computers & Education*, 136, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2019.03.005>
- Li, Y., Singh, C., & Zhu, G. (2025). Improving student understanding of quantum measurement in undergraduate physics courses. *Physical Review Physics Education Research*, 21(1), 010203. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.21.010104>
- Li, J. (2025). The Movement Mode of the Microworld Particle. *Quantum Beam Science*, 9(1), 2. <https://doi.org/10.3390/qubs9010002>
- McKagan, S. B., Perkins, K. K., & Wieman, C. E. (2021). Why students misunderstand quantum physics and what we can do about it. *Physical Review Physics Education Research*, 17(2), 020121. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.17.020121>
- Maulida, M., Berlianna Putri, S., Irawan, H., Maulidah, R., & Rizal, R. (2024). Analisis Keberhasilan

- Penggunaan E-Learning pada Pembelajaran Fisika Kelas X MIPA di SMAN 4 Tasikmalaya. *DIFFRACTION: Journal for Physics Education and Applied Physics*, 6(2), 75–82. <https://doi.org/10.37058/diffraction.v6i2.10220>
- Nikolaus, P., Küblbeck, A., & Müller, R. (2024). Investigating students' conceptual knowledge of quantum phenomena through validated assessment instruments. *Education Sciences*, 14(3), 245. <https://doi.org/10.3390/educsci14101113>
- Qian, M., & Clark, K. R. (2016). *Game-Based Learning* and 21st century skills: A review of recent research. *Computers in Human Behavior*, 63, 50–58. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2016.05.023>
- Rohmah, I., Maftukhin, A., & Kurniawan, E. S., (2025). Improving Physics Concepts and Students' Learning Interests Through Interactive Learning Media. *Radiasi: Jurnal Berkala Pendidikan Fisika*, 18(1), 31-38. <https://doi.org/10.37729/radiasi.v18i1.5450>
- Rusydi, F. (2022). *Buku Ajar Fisika Kuantum: Fungsi Gelombang, Energi Potensial, dan Operator*. Airlangga University Press.
- Sabilla, A. M., Sakir, M., & Firdaus, F. (2025). Pengembangan Media Pembelajaran Interaktif Berbasis *Game-Based Learning* dengan Scratch pada Materi Hukum Newton untuk Meningkatkan Pemahaman Konsep Siswa. *Optika: Jurnal Pendidikan Fisika*, 9(1), 140-154.
- Schunk, D. H., & DiBenedetto, M. K. (2020). Motivation and social cognitive theory. *Contemporary Educational Psychology*, 60, 101832. <https://doi.org/10.1016/j.cedpsych.2019.101832>
- Spegel-Lexne, D., Gómez, S., Argillander, J., Pawłowski, M., Dieguez, P. R., Alarcón, A., & Xavier, G. B. (2024). Experimental Demonstration of the Equivalence of Entropic Uncertainty with Wave-particle Duality. *Science advances*, 10(49), eadr2007. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adr2007>
- Sailer, M., & Homner, L. (2020). The gamification of learning: A meta-analysis. *Educational psychology review*, 32(1), 77-112. <https://doi.org/10.1007/S10648-019-09498-W>
- Ubben, M., Riese, J., & Ströbele, L. (2023). Exploring the relationship between students' conceptual and model thinking in quantum optics. *Frontiers in Quantum Science and Technology*, 2(1), 17–31. <https://doi.org/10.3389/frqst.2023.1207619>
- Wigfield, A., & Cambria, J. (2010). Students' achievement values, goal orientations, and interest: Definitions, development, and relations to achievement outcomes. *Developmental Review*, 30(1), 1–35. <https://doi.org/10.1016/j.dr.2009.12.001>
- Wilson, C., Taylor, J., & Miller, B. (2013). Scratch as a tool for science simulation creation and conceptual understanding. *International Journal of Computer-Supported Collaborative Learning*, 8(2), 201–219. <https://doi.org/10.1007/s11412-013-9172-5>
- Yang, K. K., Wang, Z. X., & Fei, S. M. (2024). Coherence and entropy complementarity relations of generalized wave-particle duality. *Physical Review A*, 110(4), 042413. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.110.042413>

- Zamroni, A. D. K., Sirait, E., Sarjono, M. T., Handayani, P. T., Safitri, S. N., & Marini, A. (2023). Analisis Hubungan Antara Penerapan Metode Experiential Learning dalam Pembelajaran dengan Hasil Belajar IPS Siswa. *Jurnal Pendidikan Dasar Dan Sosial Humaniora*, 3(1), 45-56.
- Zengel, K., DeVitto, N., Hillyer, N., Rodden, J., & Vu, V. (2024). The uncertainty principle and quantum wave functions that are their own Fourier transforms. *American Journal of Physics*, 92(3), 189-196. <https://doi.org/10.1119/5.0162363>