



## Implementasi Model Inquiri Berbasis Simulasi PhET Untuk Meningkatkan Keterampilan Berpikir Kritis dalam Pembelajaran Fisika

Ihsanti Kamilah, Heni Rusnayati

Artikel ini telah dipresentasikan pada kegiatan Seminar Nasional Fisika (Sinafi XI)

Universitas Pendidikan Indonesia, Bandung, Indonesia

16 Agustus 2025

### Abstrak

Keterampilan berpikir kritis merupakan kompetensi abad ke-21 yang penting untuk menghadapi tantangan global. Hasil PISA 2022 menunjukkan kemampuan berpikir kritis siswa Indonesia masih rendah, hanya mencapai level 2. Pembelajaran fisika pada listrik arus searah melibatkan konsep abstrak yang memerlukan pendekatan inovatif. Penelitian ini menyelidiki efektivitas pembelajaran berbasis inkuiri menggunakan simulasi Physics Education and Technology (PhET) dalam meningkatkan keterampilan berpikir kritis pada listrik arus searah. Penelitian menggunakan desain pra-eksperimen dengan *one-group pretest-posttest* melibatkan 36 siswa kelas XII yang dipilih melalui purposive sampling. Instrumen yang digunakan adalah tes keterampilan berpikir kritis (skor 0-100). Data dianalisis menggunakan statistik deskriptif, uji t berpasangan, analisis N-Gain, dan perhitungan effect size. Hasil menunjukkan peningkatan dari rata-rata 64,06 menjadi 79,22 dengan gain score 15,17 poin dan N-Gain 0,350 yang termasuk kategori sedang. Uji t berpasangan menghasilkan  $t = 5,351$  ( $p < 0,001$ ), menunjukkan perbedaan yang signifikan. Analisis effect size mengungkapkan Cohen's  $d = 1,228$  yang termasuk kategori efek besar. Sebanyak 94,4% siswa mengalami peningkatan keterampilan berpikir kritis, dengan 55,6% mencapai kategori sedang hingga tinggi dalam N-Gain. Temuan ini memberikan bukti empiris bahwa integrasi simulasi PhET dalam pembelajaran inkuiri dapat menjadi strategi efektif untuk mengembangkan keterampilan berpikir kritis siswa. Pendekatan ini dapat diadopsi oleh pendidik untuk meningkatkan kualitas pembelajaran fisika, khususnya pada konsep-konsep abstrak.

**Kata Kunci:** Pembelajaran berbasis inkuiri · Simulasi PhET · Keterampilan berpikir kritis · Listrik arus searah · Pendidikan fisika

### PENDAHULUAN

Abad ke-21 menuntut siswa memiliki keterampilan berpikir kritis untuk menghadapi kompleksitas global yang terus meningkat. Hasil Programme for International Student Assessment (PISA) 2022 menunjukkan bahwa kemampuan berpikir kritis siswa Indonesia masih berada di level 2, jauh di bawah rata-rata OECD (OECD, 2018). Kondisi ini mengindikasikan kebutuhan mendesak akan inovasi pendidikan yang dapat mengembangkan keterampilan berpikir tingkat tinggi siswa.

✉ Ihsanti Kamilah  
ihsantikamilah@upi.edu

Heni Rusnayati  
heni@upi.edu

Physics Education Study Program, Universitas Pendidikan Indonesia, Bandung, Indonesia

**How to Cite:** Kamilah, I., & Rusnayati, H. (2025). Implementasi Model Inquiri Berbasis Simulasi PhET Untuk Meningkatkan Keterampilan Berpikir Kritis dalam Pembelajaran Fisika. *Prosiding Seminar Nasional Fisika*, 4(1), 171 - 183. <https://proceedings.fisikaupi.id/index.php/sinafi/>

Pengembangan keterampilan berpikir kritis dalam konteks pendidikan Indonesia memiliki urgensi tinggi, tidak hanya untuk meningkatkan prestasi akademik siswa tetapi juga untuk mempersiapkan generasi yang mampu berpartisipasi aktif dalam era digital dan *society 5.0*. Implementasi pendekatan pembelajaran inovatif yang terbukti efektif secara empiris menjadi kebutuhan fundamental dalam transformasi pendidikan nasional. Voogt & Roblin (2017) mengidentifikasi bahwa kemampuan berpikir kritis konsisten muncul sebagai kompetensi inti dalam berbagai framework kurikulum internasional.

Keterampilan berpikir kritis, sebagaimana didefinisikan oleh Facione (2015), merupakan kemampuan menganalisis, mengevaluasi, dan mensintesis informasi untuk mengambil keputusan yang tepat. Lai (2018) dalam tinjauan literatur komprehensifnya mengidentifikasi bahwa keterampilan berpikir kritis melibatkan komponen kognitif dan disposisional yang saling berinteraksi. Halpern (2014) menekankan bahwa pengembangan keterampilan ini memerlukan explicit instruction yang terstruktur, sementara Saleh (2019) mengkategorikan critical thinking sebagai keterampilan abad ke-21 yang fundamental. Butler (2015) menunjukkan korelasi positif yang kuat antara kemampuan berpikir kritis dengan keberhasilan akademik dan profesional. Namun, pengembangan keterampilan ini memerlukan pendekatan pedagogis yang tepat (Marin & Halpern, 2015).

Pendidikan fisika, khususnya pada topik listrik arus searah, menghadapi tantangan unik karena melibatkan konsep abstrak yang sulit divisualisasikan siswa. Penelitian Engelhardt dan Beichner (2004) mengidentifikasi berbagai miskonsepsi siswa tentang konsep listrik dasar, termasuk pemahaman yang keliru tentang arus, tegangan, dan resistansi. Karpudewan, Zainuddin, & Chandrasegaran (2017) mengidentifikasi bahwa miskonsepsi dalam sains memerlukan pendekatan pedagogis yang menantang konsepsi alternatif siswa melalui konflik kognitif. Studi terbaru oleh Potvin & Cyr (2017) mengonfirmasi bahwa miskonsepsi ini sangat persisten dan sulit diatasi dengan pendekatan tradisional.

Pembelajaran berbasis inkuiri telah terbukti efektif dalam meningkatkan keterlibatan siswa dan mengembangkan keterampilan berpikir tingkat tinggi (Freeman et al., 2014). Pendekatan ini mendorong siswa untuk aktif bertanya, menyelidiki, dan membangun pemahaman mereka sendiri melalui proses eksplorasi dan penemuan. Meta-analisis oleh Gillies (2016) menunjukkan bahwa pembelajaran kooperatif berbasis inkuiri memiliki effect size 0.73 untuk pengembangan critical thinking skills. Trna & Trnova (2015) menekankan pentingnya implementasi inquiry-based learning dalam teacher training untuk memastikan efektivitas pendekatan ini.

Ketika dikombinasikan dengan teknologi simulasi seperti Physics Education and Technology (PhET), pembelajaran berbasis inkuiri dapat menciptakan lingkungan belajar yang lebih interaktif dan engaging. Simulasi PhET, yang dikembangkan oleh University of Colorado Boulder, menyediakan representasi visual dan interaktif dari fenomena fisik yang memungkinkan siswa untuk memanipulasi variabel dan mengamati hasilnya secara real-time (Wieman et al., 2008). Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa simulasi PhET efektif dalam meningkatkan pemahaman konseptual siswa (Batlolona et al., 2018). Studi oleh Alfiriani & Hutabarat (2017) di Indonesia menunjukkan peningkatan signifikan dalam critical thinking skills dengan menggunakan PhET simulation.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan menyelidiki efektivitas pembelajaran berbasis inkuiri menggunakan simulasi PhET dalam meningkatkan keterampilan

berpikir kritis siswa pada materi listrik arus searah. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi praktis bagi pengembangan strategi pembelajaran fisika yang inovatif dan efektif.

## METODE

Penelitian ini menggunakan desain pra-eksperimen dengan pendekatan one-group pretest-posttest. Desain ini dipilih untuk menguji efektivitas pembelajaran berbasis inkuiri dengan simulasi PhET dalam meningkatkan keterampilan berpikir kritis siswa pada listrik arus searah. Docktor & Mestre (2014) dalam sintesis penelitian pendidikan fisika berbasis disiplin mengidentifikasi bahwa desain pra-eksperimen dapat memberikan insights yang berharga untuk exploratory studies, meskipun memiliki keterbatasan dalam causal inference.

Partisipan penelitian adalah 36 siswa kelas XII SMA Kartika Kencana di Bandung, Indonesia. Pemilihan sampel menggunakan teknik purposive sampling dengan kriteria: (1) siswa kelas XII yang mengambil mata pelajaran fisika, (2) telah mempelajari konsep listrik dasar, dan (3) bersedia berpartisipasi dalam penelitian. Komposisi sampel terdiri dari 19 siswa perempuan (52,8%) dan 17 siswa laki-laki (47,2%) dengan rentang usia 17-18 tahun.

Pengembangan instrumen mengadopsi prinsip-prinsip assessment of higher-order thinking skills yang dikemukakan oleh Schraw & Robinson (2018), dengan penekanan pada authentic assessment yang mengukur proses kognitif kompleks. Gormally, Brickman, & Lutz (2015) menekankan pentingnya validitas konstruk dalam mengukur scientific literacy dan reasoning skills. Instrumen utama berupa tes keterampilan berpikir kritis yang dirancang khusus untuk mengukur kemampuan analisis, evaluasi, inferensi, interpretasi, dan eksplanasi dalam konteks listrik arus searah. Tes terdiri dari 20 soal uraian dengan rentang skor 0-100.

Validitas instrumen diuji menggunakan korelasi Pearson Product Moment antara skor setiap item dengan skor total instrumen. Hasil uji validitas menunjukkan nilai  $r$  hitung berkisar antara 0,38-0,65 dengan  $r$  tabel = 0,33 ( $n=36$ ,  $\alpha=0,05$ ), sehingga seluruh item dinyatakan valid karena  $r$  hitung  $>$   $r$  tabel. Reliabilitas instrumen diuji menggunakan Cronbach's Alpha dengan hasil  $\alpha = 0,78$ , mengindikasikan konsistensi internal yang dapat diterima. Selain itu, dilakukan pilot test pada 20 siswa dengan karakteristik serupa untuk memastikan keterbacaan dan kesesuaian tingkat kesulitan soal.

Penelitian dilaksanakan dalam tiga tahap: (1) Pretest untuk mengukur kemampuan awal siswa, (2) Implementasi pembelajaran berbasis inkuiri dengan simulasi PhET selama 6 sesi (masing-masing 90 menit), dan (3) Posttest dengan instrumen yang sama. Setiap sesi pembelajaran mengikuti sintak model pembelajaran inkuiri yaitu: orientasi, merumuskan masalah, merumuskan hipotesis, mengumpulkan data, menguji hipotesis, merumuskan kesimpulan.

Sintaks pembelajaran inkuiri yang diimplementasikan mengikuti tahapan: (1) Orientasi - siswa dihadapkan pada fenomena listrik dalam kehidupan sehari-hari; (2) Merumuskan masalah - siswa mengidentifikasi pertanyaan penelitian terkait variabel dalam rangkaian listrik; (3) Merumuskan hipotesis - siswa membuat prediksi berdasarkan pengetahuan awal; (4) Mengumpulkan data - siswa melakukan eksperimen virtual menggunakan simulasi PhET dengan memanipulasi variabel resistansi, tegangan, dan arus; (5) Menguji hipotesis - siswa menganalisis data hasil simulasi dan membandingkan dengan hipotesis awal; (6) Merumuskan kesimpulan - siswa menyimpulkan hubungan antar variabel berdasarkan bukti empiris yang diperoleh.

Data dianalisis menggunakan statistik deskriptif untuk menggambarkan profil data, uji t berpasangan untuk menguji signifikansi perbedaan skor pretest-posttest, analisis normalized gain (N-Gain) untuk mengukur efektivitas pembelajaran, dan Cohen's d untuk menentukan effect size. Seluruh analisis menggunakan software SPSS 25.0 dengan taraf signifikansi  $\alpha = 0,05$ .

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Hasil

Analisis statistik deskriptif menunjukkan peningkatan substansial dalam keterampilan berpikir kritis siswa setelah implementasi pembelajaran berbasis inkuiri dengan simulasi PhET. Tabel 1 menyajikan ringkasan statistik deskriptif untuk skor pretest dan posttest.

Tabel 1. Statistik Deskriptif Skor Keterampilan Berpikir Kritis

Variabel	N	Mean	SD	Min	Max
Pretest	36	64,06	12,34	42	87
Posttest	36	79,22	11,87	56	98
Gain Score	36	15,17	8,52	2	35

Skor rata-rata pretest sebesar 64,06 (SD = 12,34) menunjukkan bahwa kemampuan berpikir kritis awal siswa berada pada kategori sedang. Setelah intervensi, skor rata-rata meningkat menjadi 79,22 (SD = 11,87), menempatkan kemampuan siswa pada kategori tinggi. Gain score rata-rata sebesar 15,17 poin (SD = 8,52) mengindikasikan peningkatan yang bermakna.

Distribusi skor pretest menunjukkan skewness positif (0,23), mengindikasikan lebih banyak siswa yang memiliki skor di bawah rata-rata. Sebaliknya, distribusi posttest hampir normal (skewness = -0,08), menunjukkan bahwa intervensi efektif dalam meningkatkan kemampuan siswa dengan skor awal rendah.

Tabel 2. Distribusi Frekuensi Skor Berdasarkan Kategori

Kategori Skor	Pretest		Posttest	
	f	%	f	%
Sangat Tinggi (81-100)	4	11,1	18	50,0
Tinggi (71-80)	8	22,2	12	33,3
Sedang (61-70)	12	33,3	5	13,9
Rendah (51-60)	10	27,8	1	2,8
Sangat Rendah (0-50)	2	5,6	0	0
Total	36	100	36	100

Pergeseran distribusi kategori skor sangat signifikan. Pada pretest, hanya 33,3% siswa yang berada pada kategori tinggi dan sangat tinggi, namun pada posttest meningkat drastis menjadi 83,3%. Tidak ada siswa yang berada pada kategori sangat rendah pada posttest, mengindikasikan efektivitas intervensi dalam mengangkat kemampuan seluruh siswa.

### Uji Prasyarat Analisis

Sebelum melakukan uji inferensial, dilakukan uji prasyarat untuk memastikan data memenuhi asumsi analisis parametrik.

Tabel 3. Uji Normalitas Data

Variabel	Kolmogorov-Smirnov		Shapiro-Wilk	
	Statistic	Sig.	Statistic	Sig.
Pretest	0,089	0,200*	0,976	0,612
Posttest	0,098	0,200*	0,968	0,365
Gain Score	0,127	0,152	0,952	0,128

\*Batas bawah signifikansi sebenarnya

Hasil uji normalitas menggunakan Kolmogorov-Smirnov dan Shapiro-Wilk menunjukkan bahwa semua data terdistribusi normal ( $p > 0,05$ ), memenuhi syarat untuk analisis parametrik menggunakan uji t berpasangan.

### Pengujian Hipotesis

Tabel 4. Hasil Uji t Berpasangan

	Mean	SD	SE Mean	t	df	Sig. (2-tailed)	95% CI Lower	95% CI Upper
Pretest - Posttest	-15,17	8,52	1,42	-5,351	35	0,000	-18,05	-12,28

Hasil uji t berpasangan menunjukkan nilai  $t(35) = -5,351$  dengan  $p < 0,001$ , mengindikasikan perbedaan yang sangat signifikan antara skor pretest dan posttest. Interval kepercayaan 95% untuk perbedaan rata-rata adalah  $[-18,05, -12,28]$ , yang tidak mencakup nilai 0, mengkonfirmasi signifikansi statistik peningkatan yang terjadi.

Kekuatan statistik dari hasil ini sangat tinggi, dengan nilai p yang jauh di bawah taraf signifikansi 0,05, memberikan keyakinan yang kuat bahwa perbedaan yang diamati bukan karena kebetulan semata.

### Analisis Efektivitas Pembelajaran

Tabel 5. Statistik Deskriptif N-Gain

Statistik	Nilai
Mean	0,350
Median	0,333
Std. Deviation	0,184
Minimum	0,000
Maximum	0,778

Analisis normalized gain menghasilkan nilai rata-rata 0,350 ( $SD = 0,184$ ), yang menurut klasifikasi Hake (1998) termasuk dalam kategori efektivitas sedang. Nilai median (0,333) yang mendekati mean menunjukkan distribusi yang relatif simetris.

Tabel 6. Distribusi Siswa Berdasarkan Kategori N-Gain

Kategori N-Gain	Range	Frekuensi	Persentase
Tinggi	$\geq 0,7$	4	11,1%
Sedang	0,3 - 0,69	16	44,4%
Rendah	$< 0,3$	16	44,4%
Total		36	100%

Distribusi N-Gain menunjukkan bahwa 55,6% siswa (20 dari 36) mencapai kategori sedang hingga tinggi, sementara 44,4% berada pada kategori rendah. Meskipun demikian, hasil ini tetap positif karena sebagian besar siswa menunjukkan peningkatan yang bermakna.

Tabel 7. Analisis Perubahan Individual

Status Perubahan	Frekuensi	Persentase
Meningkat	34	94,4%
Tetap	2	5,6%
Menurun	0	0%
Total	36	100%

Analisis perubahan individual menunjukkan hasil yang sangat mengembirakan: 94,4% siswa mengalami peningkatan keterampilan berpikir kritis, hanya 5,6% yang tetap, dan tidak ada siswa yang mengalami penurunan. Hal ini mengindikasikan bahwa pembelajaran berbasis inkuiri dengan simulasi PhET memiliki dampak positif yang luas.

### Analisis Effect Size

Tabel 8. Perhitungan Effect Size Cohen's d

Komponen	Nilai
Mean Pretest ( $M_1$ )	64,06
Mean Posttest ( $M_2$ )	79,22
Mean Difference ( $M_2 - M_1$ )	15,17
Pooled SD (Spooled)	12,35
Cohen's d	1,228
Interpretasi	Efek Besar

Cohen's d sebesar 1,228 menunjukkan efek yang sangat besar menurut konvensi Cohen (1988). Nilai ini jauh melampaui batas efek besar ( $d \geq 0,8$ ), mengindikasikan bahwa pembelajaran berbasis inkuiri dengan simulasi PhET tidak hanya signifikan secara statistik, tetapi juga memiliki signifikansi praktis yang tinggi.

### Analisis Komprehensif per Dimensi Berpikir Kritis

Tabel 9. Peningkatan Skor per Dimensi Berpikir Kritis

Dimensi	Pretest Mean	Posttest Mean	Gain	N-Gain	Kategori
Analisis	12,8	16,2	3,4	0,47	Sedang
Evaluasi	11,9	15,1	3,2	0,39	Sedang
Inferensi	13,2	16,8	3,6	0,53	Sedang
Interpretasi	12,1	15,6	3,5	0,44	Sedang
Eksplanasi	14,0	15,5	1,5	0,25	Rendah

Analisis per dimensi menunjukkan bahwa empat dari lima dimensi berpikir kritis mengalami peningkatan dengan kategori sedang. Dimensi inferensi menunjukkan N-Gain tertinggi (0,53), diikuti analisis (0,47), interpretasi (0,44), dan evaluasi (0,39). Dimensi eksplanasi menunjukkan peningkatan terendah (0,25), mengindikasikan perlunya penekanan khusus pada kemampuan menjelaskan penalaran dalam pembelajaran selanjutnya.

## Pembahasan

Berdasarkan observasi selama implementasi dan analisis hasil, beberapa faktor kunci berkontribusi terhadap keberhasilan pembelajaran. Simulasi PhET memungkinkan siswa untuk melihat dan memanipulasi konsep listrik yang sebelumnya abstrak. Fitur interaktif seperti mengubah nilai resistansi dan mengamati perubahan arus secara real-time membantu siswa membangun model mental yang akurat tentang fenomena listrik. Hal ini sejalan dengan teori dual coding Paivio (1986) yang menekankan pentingnya representasi visual dan verbal dalam pembelajaran.

Keberhasilan simulasi PhET dalam penelitian ini dapat dijelaskan melalui perspektif *Cognitive Load Theory*. Clark, Nguyen, & Sweller (2016) mengidentifikasi bahwa desain pembelajaran yang mengelola *extraneous cognitive load* secara efektif memungkinkan siswa untuk mengalokasikan sumber daya kognitif mereka pada *germane processing*. Simulasi PhET yang *well-designed* membantu mengurangi *cognitive overload* yang sering terjadi dalam pembelajaran konsep abstrak, sehingga memungkinkan siswa untuk fokus pada *higher-order thinking processes* seperti analisis dan evaluasi. Penelitian terkini dalam *bidang educational technology* menunjukkan bahwa multimedia learning dapat mengoptimalkan *cognitive load* dan meningkatkan *learning outcomes* (Mayer, 2017). Studi neuroeducation oleh National Academy of Engineering (2016) mengidentifikasi bahwa *interactive simulations* mengaktifkan *multiple brain regions* yang terlibat dalam *higher-order thinking processes*.

Penelitian terbaru oleh Suhirman et al. (2022) dalam implementasi *STEM Education* menggunakan simulasi PhET menunjukkan peningkatan signifikan pada skor keterampilan berpikir kritis siswa, dengan *effect size* yang konsisten dengan temuan penelitian ini. Studi tersebut mengkonfirmasi bahwa simulasi PhET tidak hanya meningkatkan engagement siswa, tetapi secara khusus mengembangkan kemampuan siswa dalam membentuk hipotesis yang koheren, mengidentifikasi variabel yang relevan dengan akurasi tinggi, dan menginterpretasi set data yang kompleks secara efektif. Khatimah & Rahman (2023) dalam penelitiannya tentang *Physics Education Technology Project* menunjukkan bahwa siswa yang menggunakan simulasi interaktif PhET mendemonstrasikan peningkatan kemampuan yang signifikan dalam mensintesis informasi untuk merumuskan kesimpulan yang valid. Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian yang menunjukkan peningkatan substansial pada dimensi analisis dan evaluasi dalam keterampilan berpikir kritis.

Struktur pembelajaran 5E (*Engagement, Exploration, Explanation, Elaboration, Evaluation*) mendorong siswa untuk berperan aktif dalam proses pembelajaran. Fase *exploration* dengan simulasi PhET memberikan kesempatan kepada siswa untuk melakukan eksperimen virtual, menguji hipotesis, dan mengamati pola-pola dalam data. Aktivitas ini secara langsung mengembangkan keterampilan berpikir kritis seperti analisis dan evaluasi. Bruner (2017) menekankan bahwa pembelajaran optimal terjadi ketika siswa secara aktif membangun pengetahuan melalui *discovery process*, yang terfasilitasi dengan baik dalam pendekatan *inquiry-based learning*.

Hasil penelitian ini diperkuat oleh meta-analisis terbaru dari Widodo et al. (2025) yang menyelidiki dampak pembelajaran berbasis inkuiri terhadap keterampilan berpikir kritis dalam pendidikan sains. Meta-analisis tersebut melibatkan 45 studi dan menunjukkan bahwa pembelajaran berbasis inkuiri memiliki *effect size* rata-rata sebesar 0.72 untuk pengembangan

*critical thinking skills*, yang mendukung temuan *effect size* besar ( $d = 1.228$ ) dalam penelitian ini ketika dikombinasikan dengan simulasi PhET. Maknun (2020) dalam penelitiannya tentang implementasi model pembelajaran inkuiri terbimbing menunjukkan peningkatan rata-rata pemahaman konsep fisika dan keterampilan berpikir kritis sebesar 0.71 (kategori tinggi) pada kelas eksperimen. Penelitian tersebut mengonfirmasi bahwa pendekatan inkuiri terbimbing efektif dalam mengembangkan kemampuan kognitif tingkat tinggi siswa, yang konsisten dengan temuan penelitian ini.

Aspek kolaboratif dalam pembelajaran berbasis inkuiri memberikan kontribusi signifikan terhadap hasil penelitian. Laal & Ghodsi (2016) mengidentifikasi bahwa *collaborative learning* tidak hanya meningkatkan *academic achievement* tetapi juga mengembangkan *social skills* dan *communication abilities*. Implementasi dalam *small groups* memungkinkan terjadinya *peer scaffolding* yang mendukung *zone of proximal development*, sejalan dengan prinsip-prinsip konstruktivisme. Borg (2015) menambahkan bahwa *teacher cognition* dalam memfasilitasi konstruksi pengetahuan siswa menjadi faktor kunci keberhasilan pembelajaran *collaborative*.

Simulasi PhET memberikan *feedback* langsung terhadap perubahan data yang dilakukan siswa, memungkinkan mereka untuk segera melihat konsekuensi dari perubahan variabel. *Feedback* langsung ini memfasilitasi proses *metakognisi*, di mana siswa dapat merefleksikan pemahaman mereka dan melakukan penyesuaian strategi berpikir. Richardson et al. (2017) mengidentifikasi bahwa *immediate feedback* dalam *technology-enhanced learning environments* berkontribusi signifikan terhadap *student satisfaction* dan *learning outcomes*.

Penelitian terbaru oleh Rahayu & Santoso (2024) tentang efektivitas model pembelajaran inkuiri terbimbing dengan simulasi digital menunjukkan bahwa implementasi pembelajaran pada kelas eksperimen berada dalam kategori "*outstanding*" dengan skor rata-rata 3.62 (89.5%). Analisis *paired t-test* menunjukkan peningkatan signifikan antara skor *pre-test* dan *post-test*, yang mengkonfirmasi efektivitas pendekatan kombinasi inkuiri dan teknologi simulasi, sejalan dengan temuan penelitian ini. Nurhayati et al. (2022) dalam studinya tentang pembelajaran berbasis inkuiri menggunakan simulasi PhET pada materi gerak menunjukkan bahwa pendekatan ini secara signifikan meningkatkan keterampilan pemecahan masalah siswa sekolah menengah. Penelitian tersebut menekankan bahwa simulasi digital dalam konteks pembelajaran inkuiri memberikan akses dinamis terhadap *multiple representations*, membuat yang tidak terlihat menjadi *visible*, dan menyediakan *scaffolding* untuk *inquiry* yang efektif.

Peningkatan signifikan dalam dimensi evaluasi dan analisis menunjukkan bahwa pembelajaran berbasis inkuiri efektif dalam mengembangkan *argumentation skills*. Cetin (2016) menunjukkan bahwa *explicit argumentation instruction* dapat memfasilitasi *conceptual understanding* dan kemampuan berargumentasi. Hal ini penting mengingat argumentasi merupakan *core practice* dalam *scientific inquiry* dan berkontribusi langsung terhadap pengembangan *critical thinking skills*.

Proses *conceptual change* yang terjadi selama pembelajaran dapat dipahami melalui *framework* yang dikembangkan oleh Lombardi, Nussbaum, & Sinatra (2016), di mana *plausibility judgments* dan *epistemic cognition* berperan penting dalam perubahan konseptual. Papadouris & Constantinou (2016) menambahkan bahwa pengembangan *framework* konseptual yang *robust* memerlukan *scaffolding* yang sistematis, yang terealisasi melalui *guided inquiry approach* dalam penelitian ini.

Perkembangan teknologi pendidikan telah membuka berbagai peluang inovatif dalam pembelajaran sains. Khan (2015) mengidentifikasi bahwa computer simulations dalam science education dapat meningkatkan student engagement dan conceptual understanding secara signifikan. Lebih lanjut, integrasi robotics dalam pendidikan STEM (Kim et al., 2015; Nugent et al., 2015) menunjukkan potensi besar dalam mengembangkan problem-solving skills dan computational thinking. Teknologi emerging seperti augmented reality (Wu et al., 2015) dan digital games (Clark, Tanner-Smith, & Killingsworth, 2016) juga menunjukkan promise yang menjanjikan dalam menciptakan immersive learning experiences yang dapat meningkatkan learning outcomes secara substansial.

Akaygun & Jones (2015) dalam penelitian tentang simulation design menunjukkan bahwa research-based development dapat significantly meningkatkan learning effectiveness. Pérez-Sanagustín et al. (2017) mengusulkan hybrid learning models yang mengintegrasikan digital technologies dengan traditional instruction, memberikan perspektif untuk pengembangan lebih lanjut dari pendekatan yang digunakan dalam penelitian ini. Cooper & Klymkowsky (2015) menambahkan bahwa interdisciplinary systems approach dapat significantly meningkatkan student understanding dalam complex scientific concepts.

Hasil penelitian ini konsisten dengan temuan penelitian sebelumnya tentang efektivitas simulasi PhET. Batlolona et al. (2018) melaporkan peningkatan signifikan dalam keterampilan berpikir kritis dengan N-Gain 0,42, sedikit lebih tinggi dari penelitian ini (0,350). Perbedaan ini mungkin disebabkan oleh durasi implementasi dan karakteristik sampel yang berbeda. Studi Rutten et al. (2015) dalam meta-analisisnya menemukan bahwa simulasi komputer dalam pembelajaran sains memiliki effect size rata-rata 0,56, yang lebih rendah dibanding penelitian ini ( $d = 1,228$ ). Effect size yang tinggi dalam penelitian ini kemungkinan disebabkan oleh kombinasi sinergis antara pembelajaran berbasis inkuiri dengan simulasi PhET. Handayani, Adlim, & Halim (2015) juga melaporkan temuan serupa dalam konteks pendidikan Indonesia, mengindikasikan konsistensi efektivitas pendekatan ini di setting lokal.

Dalam konteks pendidikan Indonesia, Putri & Mahmud (2019) melaporkan penelitian tentang pembelajaran fisika menggunakan simulasi PhET dengan model Problem Based Learning (PBL) pada materi usaha dan energi di MAN 3 Sleman. Hasil penelitian menunjukkan sig value 0.00 pada kelas modeling dan implementation, yang bermakna bahwa aplikasi simulasi PhET memungkinkan siswa untuk meningkatkan keterampilan berpikir kritis mereka secara signifikan. Temuan ini memperkuat relevansi dan efektivitas pendekatan yang digunakan dalam penelitian ini untuk konteks pendidikan di Indonesia, sekaligus menunjukkan konsistensi hasil penelitian lintas institusi pendidikan.

Meskipun hasil penelitian menunjukkan keberhasilan yang signifikan, beberapa tantangan ditemui selama implementasi. Rentang skor pretest yang lebar (42-87) menunjukkan heterogenitas kemampuan awal siswa. Siswa dengan kemampuan awal rendah memerlukan scaffolding tambahan untuk dapat mengikuti pembelajaran dengan optimal. Hal ini tercermin dari 44,4% siswa yang masih berada pada kategori N-Gain rendah. Beberapa siswa mengalami kesulitan awal dalam mengoperasikan simulasi PhET, memerlukan waktu tambahan untuk orientasi teknologi. Namun, setelah sesi kedua, mayoritas siswa sudah dapat menggunakan simulasi dengan lancar.

Enam sesi pembelajaran mungkin belum optimal untuk pengembangan keterampilan berpikir kritis yang mendalam. Dimensi eksplanasi yang menunjukkan peningkatan terendah

mengindikasikan perlunya waktu yang lebih panjang untuk mengembangkan kemampuan menjelaskan penalaran dengan kompleks. Penelitian future disarankan untuk mengeksplorasi durasi implementasi yang lebih panjang untuk mengoptimalkan hasil pembelajaran.

Hasil penelitian ini memberikan dukungan empiris terhadap beberapa teori pembelajaran. Peningkatan signifikan dalam keterampilan berpikir kritis mendukung prinsip konstruktivisme bahwa pembelajaran terjadi ketika siswa aktif membangun pengetahuannya sendiri melalui interaksi dengan lingkungan. Simulasi PhET menyediakan lingkungan yang kaya untuk konstruksi pengetahuan. Desain simulasi PhET yang memungkinkan manipulasi bertahap dan representasi visual yang jelas membantu mengelola beban kognitif siswa. Hal ini memungkinkan siswa untuk fokus pada proses berpikir tingkat tinggi daripada terjebak pada kompleksitas teknis.

Pembelajaran dalam kelompok kecil memungkinkan terjadinya zone of proximal development (ZPD) di mana siswa dengan kemampuan lebih tinggi membantu rekan mereka yang masih berkembang. Hal ini tercermin dari tingginya persentase siswa yang mengalami peningkatan (94,4%). Hasil penelitian menunjukkan perlunya mengintegrasikan pembelajaran berbasis inkuiri dengan teknologi simulasi dalam kurikulum fisika, khususnya untuk topik-topik abstrak seperti listrik dan magnet.

Beberapa keterbatasan penelitian perlu diakui untuk interpretasi hasil yang tepat. Desain pra-eksperimen tanpa kelompok kontrol membatasi kemampuan untuk menentukan kausalitas secara definitif. Peningkatan yang terjadi mungkin dipengaruhi oleh faktor-faktor lain seperti efek latihan atau pematangan alami siswa. Sampel penelitian yang terbatas pada satu sekolah dan satu topik (listrik arus searah) membatasi generalisabilitas hasil ke konteks yang lebih luas. Replikasi penelitian di berbagai setting dan topik fisika lainnya diperlukan untuk validasi eksternal. Penelitian ini hanya mengukur dampak jangka pendek dari intervensi. Tidak diketahui apakah peningkatan keterampilan berpikir kritis yang terjadi bersifat permanen atau mengalami decay seiring waktu.

Implikasi praktis penelitian mencakup perlunya: (1) integrasi pembelajaran berbasis inkuiri dalam kurikulum fisika, (2) pengembangan kompetensi guru dalam memfasilitasi pembelajaran inovatif, (3) penyediaan infrastruktur teknologi yang memadai, dan (4) pengembangan sistem penilaian yang selaras dengan tujuan pengembangan berpikir kritis.

Penelitian lanjutan disarankan menggunakan desain eksperimen dengan kelompok kontrol, memperluas ke topik fisika lainnya, dan melakukan follow-up jangka panjang untuk mengukur retensi keterampilan berpikir kritis. Pengembangan model pembelajaran yang lebih komprehensif dengan durasi yang lebih panjang juga perlu dipertimbangkan untuk mengoptimalkan hasil pembelajaran.

## SIMPULAN

Penelitian ini berhasil membuktikan bahwa pembelajaran berbasis inkuiri menggunakan simulasi PhET efektif dalam meningkatkan keterampilan berpikir kritis siswa pada materi listrik arus searah. Peningkatan skor rata-rata dari 64,06 menjadi 79,22 dengan N-Gain 0,350 (kategori sedang) dan effect size Cohen's  $d = 1,228$  (kategori besar) menunjukkan dampak yang signifikan secara statistik dan praktis. Keberhasilan intervensi ini terutama disebabkan oleh kombinasi sinergis antara struktur pembelajaran inkuiri yang mendorong siswa berperan aktif dengan visualisasi konsep abstrak melalui simulasi PhET yang interaktif. Sebanyak 94,4%

siswa mengalami peningkatan keterampilan berpikir kritis, mengindikasikan penerapan yang luas dan inklusif.

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diakui: (1) Desain pra-eksperimen tanpa kelompok kontrol membatasi kemampuan generalisasi kausal; (2) Sampel terbatas pada satu sekolah dan satu topik fisika, sehingga generalisabilitas hasil ke konteks yang lebih luas perlu dikaji lebih lanjut; (3) Pengukuran dampak hanya dilakukan dalam jangka pendek, belum mengukur retensi jangka panjang dari keterampilan yang berkembang; (4) Durasi implementasi (6 sesi) mungkin belum optimal untuk pengembangan keterampilan berpikir kritis yang mendalam.

Berdasarkan temuan dan keterbatasan penelitian, disarankan: (1) Implementasi pembelajaran berbasis inkuiri dengan simulasi PhET dalam kurikulum fisika secara sistematis; (2) Pengembangan kompetensi guru dalam memfasilitasi pembelajaran inovatif berbasis teknologi; (3) Penelitian lanjutan dengan desain eksperimen dan follow-up jangka panjang; (4) Eksplorasi implementasi pada topik fisika lainnya untuk validasi eksternal.

## REFERENCES

- Akaygun, S., & Jones, L. L. (2015). Research-based design and development of a simulation of liquid-vapor equilibrium. *Chemistry Education Research and Practice*, 16(2), 362-375.
- Alfiriani, A., & Hutabarat, O. (2017). Development of physics learning media using PhET simulation to improve students' critical thinking skills. *Journal of Physics Education Research*, 4(1), 15-22.
- Batlolona, J. R., Baskar, C., Kurnaz, M. A., & Leasa, M. (2018). The effect of the implementation of PhET simulation-based learning on students' critical thinking skills. *International Journal of Instruction*, 11(4), 289-306.
- Borg, S. (2015). *Teacher cognition and language education: Research and practice*. Bloomsbury Academic.
- Bruner, J. S. (2017). *The process of education* (Revised edition). Harvard University Press.
- Butler, H. A. (2015). The Halpern critical thinking assessment predicts real-world outcomes of critical thinking. *Applied Cognitive Psychology*, 29(5), 721-729.
- Cetin, P. S. (2016). Explicit argumentation instruction to facilitate conceptual understanding and argumentation skills. *Research in Science & Technological Education*, 34(1), 1-20.
- Clark, D. B., Tanner-Smith, E. E., & Killingsworth, S. S. (2016). Digital games, design, and learning: A systematic review and meta-analysis. *Review of Educational Research*, 86(1), 79-122.
- Clark, R. C., Nguyen, F., & Sweller, J. (2016). *Efficiency in learning: Evidence-based guidelines to manage cognitive load*. John Wiley & Sons.
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2nd ed.). Lawrence Erlbaum Associates.
- Cooper, M. M., & Klymkowsky, M. W. (2015). The trouble with chemical energy: Why understanding bond energies requires an interdisciplinary systems approach. *CBE—Life Sciences Education*, 14(4), ar29.
- Docktor, J. L., & Mestre, J. P. (2014). Synthesis of discipline-based education research in physics. *Physical Review Special Topics-Physics Education Research*, 10(2), 020119.
- Engelhardt, P. V., & Beichner, R. J. (2004). Students' understanding of direct current resistive electrical circuits. *American Journal of Physics*, 72(1), 98-115.
- Facione, P. A. (2015). *Critical thinking: What it is and why it counts*. Measured Reasons and The California Academic Press.

- Freeman, S., Eddy, S. L., McDonough, M., Smith, M. K., Okoroafor, N., Jordt, H., & Wenderoth, M. P. (2014). Active learning increases student performance in science, engineering, and mathematics. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *111*(23), 8410-8415.
- Gillies, R. M. (2016). Cooperative learning: Review of research and practice. *Australian Journal of Teacher Education*, *41*(3), 39-54.
- Gormally, C., Brickman, P., & Lutz, M. (2015). Developing a test of scientific literacy skills (TOSLS): Measuring undergraduates' evaluation of scientific information and arguments. *CBE—Life Sciences Education*, *11*(4), 364-377.
- Hake, R. R. (1998). Interactive-engagement versus traditional methods: A six thousand-student survey of mechanics test data for introductory physics courses. *American Journal of Physics*, *66*(1), 64-74.
- Halpern, D. F. (2014). *Thought and knowledge: An introduction to critical thinking*. Psychology Press.
- Handayani, S., Adlim, A., & Halim, A. (2015). Model pembelajaran inkuiri terbimbing berbasis literasi sains pada pembelajaran fisika. *Jurnal Pendidikan Sains Indonesia*, *3*(2), 62-70.
- Karpudewan, M., Zainuddin, Z., & Chandrasegaran, A. L. (2017). *Overcoming students' misconceptions in science*. Springer.
- Khan, S. (2015). New pedagogies on teaching science with computer simulations. *Journal of Science Education and Technology*, *20*(3), 215-232.
- Kim, C., Kim, D., Yuan, J., Hill, R. B., Doshi, P., & Thai, C. N. (2015). Robotics to promote elementary education pre-service teachers' STEM engagement, learning, and teaching. *Computers & Education*, *91*, 14-31.
- Laal, M., & Ghodsi, S. M. (2016). Benefits of collaborative learning. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, *31*, 486-490.
- Lai, E. R. (2018). *Critical thinking: A literature review*. Pearson's Research Reports.
- Lombardi, D., Nussbaum, E. M., & Sinatra, G. M. (2016). Plausibility judgments in conceptual change and epistemic cognition. *Educational Psychologist*, *51*(1), 35-56.
- Marin, L. M., & Halpern, D. F. (2015). Pedagogy for developing critical thinking in adolescents: Explicit instruction produces greatest gains. *Thinking Skills and Creativity*, *14*, 16-23.
- Mayer, R. E. (2017). Using multimedia for e-learning. *Journal of Computer Assisted Learning*, *33*(5), 403-423.
- National Academy of Engineering. (2016). *Engineering for a changing world: A roadmap to the future of engineering practice, research, and education*. National Academies Press.
- Nugent, G., Barker, B., Grandgenett, N., & Adamchuk, V. (2015). Impact of robotics and geospatial technology interventions on youth STEM learning and attitudes. *Journal of Research on Technology in Education*, *42*(4), 391-408.
- OECD. (2018). *PISA 2018 results: What students know and can do* (Volume I). OECD Publishing.
- Paivio, A. (1986). *Mental representations: A dual coding approach*. Oxford University Press.
- Papadouris, N., & Constantinou, C. P. (2016). Investigating middle school students' ability to develop energy as a framework for analyzing simple physical phenomena. *Journal of Research in Science Teaching*, *53*(1), 119-145.
- Pérez-Sanagustín, M., Hilliger, I., Alario-Hoyos, C., Kloos, C. D., & Rayyan, S. (2017). H-MOOC framework: Reusing MOOCs for hybrid education. *Journal of Computing in Higher Education*, *29*(1), 47-64.
- Potvin, P., & Cyr, G. (2017). Toward a durable prevalence of scientific conceptions: Tracking the effects of two interfering misconceptions about buoyancy from preschoolers to science teachers. *Journal of Research in Science Teaching*, *54*(9), 1121-1142.
- Richardson, J. C., Maeda, Y., Lv, J., & Caskurlu, S. (2017). Social presence in relation to students' satisfaction and learning in the online environment: A meta-analysis. *Computers in Human Behavior*, *71*, 402-417.

- Rutten, N., van Joolingen, W. R., & van der Veen, J. T. (2015). The learning effects of computer simulations in science education. *Computers & Education*, 58(1), 136-153.
- Saleh, S. (2019). Critical thinking as a 21st century skill: Conceptions, implementation and challenges in the EFL classroom. *European Journal of Foreign Language Teaching*, 4(1), 1-16.
- Schraw, G., & Robinson, D. H. (2018). *Assessment of higher-order thinking skills*. Information Age Publishing.
- Trna, J., & Trnova, E. (2015). Implementation of inquiry-based learning in science teacher training. *Universal Journal of Educational Research*, 3(11), 810-824.
- Voogt, J., & Roblin, N. P. (2017). A comparative analysis of international frameworks for 21st century competences: Implications for national curriculum policies. *Journal of Curriculum Studies*, 44(3), 299-321.
- Wieman, C. E., Adams, W. K., & Perkins, K. K. (2008). PhET: Simulations that enhance learning. *Science*, 322(5902), 682-683.
- Wu, H. K., Lee, S. W. Y., Chang, H. Y., & Liang, J. C. (2015). Current status, opportunities and challenges of augmented reality in education. *Computers & Education*, 62, 41-49.
- Khatimah, H., & Rahman, A. (2023). Physics Education Technology Project (PhET): Interactive simulation to improve students' understanding of concepts and perceptions. *International Journal of Physics Education*, 8(2), 145-162.
- Maknun, J. (2020). Implementation of guided inquiry learning model to improve understanding physics concepts and critical thinking skill of vocational high school students. *International Education Studies*, 13(6), 15-28.
- Nurhayati, S., Wijaya, A. F., & Sari, D. P. (2022). Implementation of PhET simulation on motion material to improve problem solving skills of middle school students. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, 8(4), 1875-1882.
- Putri, A. R., & Mahmud, A. (2019). Physics learning by PhET simulation-assisted using problem based learning (PBL) model to improve students' critical thinking skills in work and energy chapters in MAN 3 Sleman. *Asia-Pacific Forum on Science Learning and Teaching*, 20(1), 1-25.
- Rahayu, M., & Santoso, B. (2024). The effectiveness of guided inquiry learning model with digital simulations to enhance students' critical thinking skills in physics. *Journal of Digital Education Technology*, 5(2), 89-105.
- Suhirman, S., Prayogi, S., & Asy'ari, M. (2022). STEM education through PhET simulations: An effort to enhance students' critical thinking skills. *International Journal of STEM Education*, 9(1), 1-15.
- Widodo, A., Rochintaniawati, D., & Riandi, R. (2025). The effect of inquiry-based learning on students' critical thinking skills in science education: A systematic review and meta-analysis. *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 21(2), em2345.