SCHOLARIA
Jurnal Pendidikan dan Sains

Published by Yayasan Yetti Afrida Center
pISSN 3164-2837 | eISSN 3163-9046
Vol. 1 No. 1 Juni 2026 | Pages 32-41
https://yettiafridacenter.com/scholaria/index
This Article is licensed under a CC BY-SA 4.0 International License

Integrasi PhET dan Guided Inquiry dalam Kimia: Pengaruh terhadap Keterampilan Proses Sains dan Konsep Abstrak

Qomariah Hasanah [1]

Program Studi Pendidikan IPA

Fakultas Tarbiyah dan Tadris, Universitas Islam Negeri Fatmawati Sukarno Bengkulu, Indonesia

[1]Email: qomariah.hasanah@mail.uinfasbengkulu.ac.id

ABSTRACT.
Purpose: *This study aims to analyze the effectiveness of integrating PhET Virtual Laboratory assisted by the Guided Inquiry model on students' science process skills (SPS) and abstract concept understanding in chemistry learning.*
Design/Methodology: *A quasi-experimental study with a Nonequivalent Control Group Design was conducted involving 66 tenth-grade students. The experimental group learned using PhET integrated with Guided Inquiry, while the control group used conventional methods. Instruments included an SPS test and a two-tier abstract concept test. Data were analyzed using N-Gain and independent t-tests.*
Findings*: The results showed significant improvements in the experimental group. SPS increased with an N-Gain of 0.71 (high category), significantly higher than the control group (0.38). Abstract concept understanding also improved significantly with an N-Gain of 0.74 compared to 0.35 in the control group ($p < 0.001$).*
Originality/Value: *This study highlights the synergistic effect of combining dynamic visual simulations with cognitive scaffolding, bridging the submicroscopic gap in chemistry education*
Keywords: *Virtual Laboratory, PhET, Guided Inquiry, Science Process Skills, Abstract Concepts*

Received: 07/05/2026 Accepted: 11/05/2026 Published: 10/06/2026

A. INTRODUCTION (PENDAHULUAN)

Kimia merupakan cabang sains yang mempelajari materi beserta perubahan-perubahannya pada tingkat makroskopis, submikroskopis, dan simbolik. Salah satu karakteristik unik kimia adalah dominasi konsep-konsep abstrak yang berada pada level submikroskopis, seperti atom, ion, molekul, dan orbital, yang tidak dapat diamati secara langsung oleh indra manusia (Taber, 2022). Bagi siswa sekolah menengah, konsep-konsep ini seringkali menjadi sumber miskonsepsi dan hambatan kognitif yang serius, karena mereka dituntut untuk membayangkan entitas yang berada di luar pengalaman sehari-hari (Sanger & Greenbowe, 2021). Pembelajaran konvensional yang hanya mengandalkan ceramah dan

[1] qomariah.hasanah@mail.uinfasbengkulu.ac.id

This Article is licensed under a CC BY-SA 4.0 International License

gambar dua dimensi terbukti kurang efektif dalam membangun pemahaman konseptual yang mendalam dan keterampilan proses sains (KPS) siswa (Treagust et al., 2021).

Keterampilan Proses Sains (KPS) merupakan kompetensi fundamental yang harus dikembangkan dalam pembelajaran sains, mencakup kemampuan mengamati, menafsirkan data, merencanakan percobaan, hingga mengkomunikasikan hasil (Lawson, 2021). Dalam konteks kimia, KPS sangat vital untuk melatih siswa menganalisis pola data dan menarik kesimpulan dari fenomena yang diamati. Namun, rendahnya pemahaman konsep abstrak berimplikasi langsung pada rendahnya KPS siswa, karena mereka kesulitan merancang atau menafsirkan percobaan yang melibatkan entitas submikroskopis (Rustaman et al., 2021).

Untuk mengatasi tantangan ini, dua inovasi pedagogis telah banyak diteliti: Virtual Laboratory berbasis simulasi PhET dan model pembelajaran Guided Inquiry. PhET menyediakan simulasi interaktif yang memungkinkan siswa memanipulasi variabel dan mengamati dampaknya secara visual dan dinamis, sehingga menjembatani level submikroskopis (Adams et al., 2021; Moore & Perkins, 2021). Sementara itu, Guided Inquiry memberikan struktur pertanyaan dan aktivitas yang membimbing siswa untuk menemukan konsep secara mandiri melalui scaffolding kognitif (Furtak et al., 2021; Minami & Nesbit, 2022). Meskipun penelitian terdahulu telah menunjukkan efektivitas PhET dan Guided Inquiry secara terpisah (Zhou et al., 2022), penelitian yang mengkaji integrasi sinergis keduanya dalam pembelajaran kimia pada materi yang sangat abstrak masih terbatas. Kebanyakan studi hanya menggunakan PhET sebagai media pelengkap tanpa kerangka pedagogis yang jelas.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efektivitas integrasi Virtual Laboratory PhET berbantuan model Guided Inquiry terhadap peningkatan KPS dan pemahaman konsep abstrak siswa pada materi struktur atom dan ikatan kimia. Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan desain kuasi-eksperimen untuk mengukur dampak intervensi secara empiris.

B. LITERATURE REVIEW

1. Hakikat Konsep Abstrak dan Segitiga Johnstone dalam Pendidikan Kimia.

Kimia sebagai cabang sains memiliki karakteristik unik yang membedakannya dari disiplin ilmu lainnya, yaitu objek kajiannya yang mencakup tiga level representasi: makroskopis, submikroskopis, dan simbolik, yang dikenal dengan Segitiga Johnstone (Johnstone, 2021). Level makroskopis merujuk pada fenomena yang dapat diamati secara langsung oleh indra, seperti perubahan warna, pembentukan endapan, atau pelepasan gas. Level submikroskopis melibatkan entitas partikel yang tidak kasat mata seperti atom, ion, molekul, dan orbital. Sementara itu, level simbolik mencakup penggunaan bahasa kimia seperti rumus, persamaan reaksi, dan notasi matematika.

Tantangan kognitif utama dalam pembelajaran kimia terletak pada kemampuan siswa untuk menavigasi dan mengintegrasikan ketiga level ini secara simultan (Taber, 2022). Siswa sekolah menengah sering kali mengalami kesulitan yang signifikan dalam mentranslasikan fenomena makroskopis ke dalam penjelasan submikroskopis, atau memahami makna di balik simbol-simbol kimia. Tanpa pemahaman yang utuh terhadap ketiga level ini, pembelajaran kimia akan bermuara pada hafalan mekanistik yang rapuh dan rentan terhadap miskonsepsi

mendalam (Sanger & Greenbowe, 2021). Konsep-konsep seperti struktur atom, bentuk orbital, dan bilangan kuantum berada pada puncak abstraksi dalam Segitiga Johnstone, di mana siswa dituntut untuk membayangkan entitas matematis dan probabilistik yang sama sekali jauh dari pengalaman empiris sehari-hari. Oleh karena itu, diperlukan intervensi pedagogis yang mampu menjembatani kesenjangan antara yang abstrak dan yang konkret.

2. Keterampilan Proses Sains (KPS) dalam Konteks Pembelajaran Kimia.

Keterampilan Proses Sains (KPS) merupakan rangkaian kemampuan kognitif dan psikomotorik yang esensial untuk membangun pengetahuan ilmiah dan memecahkan masalah (Lawson, 2021). KPS tidak hanya terbatas pada keterampilan manipulatif di laboratorium fisik, tetapi juga mencakup keterampilan kognitif tingkat tinggi seperti merumuskan hipotesis, merancang percobaan, memanipulasi variabel, menafsirkan data, hingga mengkomunikasikan hasil (Rustaman et al., 2021). Dalam konteks kimia, pengembangan KPS sangat vital karena kimia bukan sekadar kumpulan fakta, melainkan cara pandang dan metode investigasi terhadap materi.

Namun, pengembangan KPS sering kali terhambat ketika berhadapan dengan materi kimia yang bersifat submikroskopis. Siswa sulit untuk merancang atau menafsirkan percobaan terkait perilaku elektron atau pembentukan orbital jika mereka tidak memiliki representasi mental yang jelas tentang entitas tersebut (Treagust et al., 2021). Rendahnya pemahaman konsep abstrak berimplikasi langsung pada rendahnya KPS, karena siswa kehilangan bahan mental untuk dianalisis dan disintesis. Oleh karena itu, lingkungan pembelajaran yang menyediakan fenomena yang dapat dimanipulasi secara visual dan sistematis sangat dibutuhkan untuk melatih KPS siswa pada materi-materi abstrak.

3. Virtual Laboratory PhET: Menjadikan yang Tak Terlihat Menjadi Terlihat.

Untuk mengatasi keterbatasan laboratorium fisik dalam memvisualisasikan level submikroskopis, teknologi simulasi interaktif seperti PhET (Physics Education Technology) dari University of Colorado Boulder hadir sebagai solusi inovatif. PhET dirancang berdasarkan prinsip-prinsip konstruktivisme dan penelitian kognitif, yang memungkinkan konsep-konsep abstrak divisualisasikan secara dinamis dan interaktif (Wieman & Perkins, 2021). Simulasi PhET menyediakan laboratorium virtual di mana siswa dapat memanipulasi variabel-variabel kunci (misalnya, jumlah proton, elektron, atau tingkat energi) dan secara langsung mengamati dampaknya terhadap sistem.

Keunggulan utama PhET dalam pendidikan kimia adalah kemampuannya untuk menyajikan representasi visual yang akurat secara ilmiah namun tetap dapat diakses secara kognitif oleh siswa (Adams et al., 2021). Misalnya, alih-alih hanya menggambar orbital atom sebagai bentuk geometris statis (seperti bola atau dumbbell), PhET dapat menampilkan distribusi probabilitas elektron sebagai awan elektron yang dinamis, memberikan intuisi yang lebih kuat tentang mekanika kuantum dasar. Moore dan Perkins (2021) menekankan bahwa fitur interaktif dan umpan balik langsung dari PhET mendorong siswa untuk melakukan eksplorasi berbasis penemuan, yang secara langsung melatih keterampilan observasi dan interpretasi data. Meta-analisis yang dilakukan oleh Zhou et al. (2022) juga mengonfirmasi bahwa penggunaan simulasi PhET secara konsisten memberikan efek positif yang signifikan terhadap hasil belajar sains dan pemecahan masalah.

This Article is licensed under a CC BY-SA 4.0 International License

4. Model Guided Inquiry: Scaffolding Kognitif untuk Pembelajaran Bermakna.

Meskipun simulasi interaktif seperti PhET sangat kaya akan visualisasi, penyajiannya tanpa kerangka pedagogis yang jelas sering kali berujung pada eksplorasi yang tidak terarah (trial and error) dan beban kognitif yang berlebihan (cognitive overload). Di sinilah peran model pembelajaran Guided Inquiry (Inkuiri Terbimbing) menjadi sangat krusial. Guided Inquiry merupakan pendekatan pembelajaran di mana siswa dilibatkan secara aktif dalam proses penemuan konsep, namun dengan tingkat scaffolding yang memadai dari guru atau bahan ajar (Minami & Nesbit, 2022).

Dalam sintaks Guided Inquiry, siswa dibimbing melalui serangkaian pertanyaan-pemandu (guiding questions) yang dirancang secara sistematis untuk mengarahkan perhatian mereka pada pola-pola spesifik, merumuskan hipotesis, dan menarik kesimpulan (Furtak et al., 2021). Pendekatan ini berakar pada teori Zona Perkembangan Proksimal (ZPD) Vygotsky, di mana scaffolding membantu siswa mencapai tingkat pemahaman yang tidak dapat mereka raih secara mandiri. Meta-analisis oleh Minami dan Nesbit (2022) menunjukkan bahwa inkuiri terbimbing secara signifikan lebih efektif dalam meningkatkan pemahaman konseptual dan keterampilan berpikir kritis dibandingkan dengan inkuiri terbuka (yang terlalu sulit bagi siswa pemula) atau pembelajaran langsung (yang terlalu pasif). Dalam konteks materi kimia yang abstrak, Guided Inquiry berfungsi sebagai peta kognitif yang mencegah siswa tersesat dalam kompleksitas visual simulasi, memastikan bahwa eksplorasi mereka berujung pada konstruksi konsep yang bermakna.

5. Sinergi Integrasi PhET dan Guided Inquiry.

Integrasi antara Virtual Laboratory PhET dan model Guided Inquiry menawarkan sinergi teoretis yang kuat. PhET menyediakan lingkungan eksperimental yang kaya dan interaktif (menyediakan bahan mental visual), sementara Guided Inquiry menyediakan kerangka kognitif untuk mengolah dan merefleksikan pengalaman tersebut (Furtak et al., 2021; Osborne & Dillon, 2021). Ketika siswa menggunakan PhET dalam bingkai Guided Inquiry, mereka tidak hanya melihat animasi, tetapi secara aktif menguji hipotesis, mengisolasi variabel, dan merekonstruksi pemahaman submikroskopis mereka berdasarkan bukti visual yang mereka hasilkan sendiri.

Beberapa penelitian terdahulu telah menginvestigasi penggunaan PhET dan inkuiri. Sanger dan Greenbowe (2021) menemukan bahwa simulasi interaktif efektif dalam memperbaiki miskonsepsi kimia. Namun, sebagian besar studi sebelumnya cenderung mengevaluasi PhET sebagai media pelengkap tanpa mengikatnya secara eksplisit pada sintaks inkuiri yang ketat, atau sebaliknya, menerapkan inkuiri pada materi makroskopis yang tidak memerlukan visualisasi submikroskopis.

6. Kesenjangan Penelitian (Research Gap).

Berdasarkan tinjauan literatur di atas, terdapat kesenjangan yang jelas dalam literatur pendidikan kimia. Penelitian yang mengkaji dampak simultan dari integrasi eksplisit PhET dan Guided Inquiry terhadap dua variabel dependen yang saling berkaitan, yaitu Keterampilan Proses Sains (KPS) dan pemahaman konsep abstrak (khususnya pada materi yang sangat abstrak seperti struktur atom dan ikatan kimia), masih sangat terbatas. Kebanyakan penelitian hanya berfokus pada hasil belajar kognitif (nilai tes) tanpa mengukur secara komprehensif

bagaimana integrasi ini memengaruhi keterampilan proses sains siswa dalam menavigasi konsep abstrak. Penelitian ini hadir untuk mengisi kesenjangan tersebut dengan mendemonstrasikan secara empiris bagaimana sinergi antara visualisasi dinamis PhET dan scaffolding kognitif Guided Inquiry dapat secara simultan menjembatani Segitiga Johnstone dan mengakselerasi pengembangan KPS serta pemahaman konsep abstrak siswa.

C. METHOD (METODE)

1. Desain dan Setting Penelitian.

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan desain kuasi-eksperimen (quasi-experimental) berbentuk Nonequivalent Control Group Design dengan pengukuran pretest-posttest. Desain ini dipilih karena pertimbangan etis dan praktis di mana pengacakan individu siswa tidak dapat dilakukan tanpa mengganggu struktur kelas yang sudah ada di sekolah. Penelitian dilaksanakan selama 5 minggu pada salah satu Sekolah Menengah Atas Negeri (SMA N) di Indonesia. Setting penelitian dirancang sedemikian rupa untuk mengontrol variabel ekstraneous, di mana kedua kelompok diajar oleh guru yang sama, dengan alokasi waktu yang setara (4 jam pelajaran per minggu), dan menggunakan silabus serta tujuan pembelajaran yang identik.

2. Populasi dan Sampel .

Populasi dalam penelitian ini adalah seluruh siswa kelas X IPA di sekolah tempat penelitian. Teknik pengambilan sampel menggunakan purposive cluster sampling, di mana dua kelas yang memiliki tingkat kemampuan akademik awal yang relatif setara (berdasarkan rekomendasi guru dan rata-rata nilai kimia semester sebelumnya) dipilih sebagai sampel. Sampel terdiri dari 66 siswa yang terbagi secara seimbang menjadi Kelas Eksperimen (n = 33) dan Kelas Kontrol (n = 33). Kelas Eksperimen menerapkan integrasi simulasi PhET dengan model Guided Inquiry, sedangkan Kelas Kontrol menerapkan pembelajaran konvensional berbantuan praktikum fisik dan metode demonstrasi.

3. Prosedur Penelitian dan Perlakuan (Treatment) .

Perlakuan diberikan selama 5 minggu dengan rincian 1 minggu untuk pretest, 3 minggu untuk intervensi pembelajaran (9 kali pertemuan), dan 1 minggu untuk posttest.

Kelas Eksperimen: Pembelajaran dirancang menggunakan sintaks Guided Inquiry yang diintegrasikan dengan Virtual Laboratory PhET. Sintaks meliputi: (1) Orientasi: Guru menyajikan fenomena makroskopis dan masalah; (2) Konseptualisasi: Siswa dibimbing merumuskan hipotesis; (3) Investigasi: Siswa memanipulasi variabel menggunakan simulasi PhET (seperti Build an Atom untuk struktur atom dan Models of the Hydrogen Atom untuk orbital) berdasarkan Lembar Kerja Peserta Didik (LKPD) inkuiri; (4) Kesimpulan: Siswa mengolah data visual dari PhET untuk menarik kesimpulan; (5) Diskusi: Siswa mempresentasikan dan merefleksikan temuan submikroskopis mereka.

Kelas Kontrol: Pembelajaran menggunakan pendekatan konvensional. Guru menjelaskan konsep melalui ceramah interaktif, menampilkan gambar dua dimensi, dan menggunakan model atom fisik (bola-bola atom). Siswa melakukan pengamatan demonstrasi guru dan mengerjakan LKPD konvensional yang bersifat verifikasi (membuktikan rumus/teori yang sudah ada), tanpa intervensi simulasi virtual atau scaffolding inkuiri.

This Article is licensed under a CC BY-SA 4.0 International License

4. Instrumen Penelitian .

Data dikumpulkan menggunakan dua instrumen utama yang telah melalui proses validasi ahli (expert judgment) oleh tiga dosen pendidikan kimia dan uji coba lapangan untuk memastikan reliabilitas.

Tes Keterampilan Proses Sains (KPS): Berupa tes esai terbatas yang terdiri dari 25 soal, dirancang untuk mengukur 8 indikator KPS integral: (1) Mengobservasi, (2) Merumuskan hipotesis, (3) Mendefinisikan secara operasional, (4) Mengidentifikasi variabel, (5) Merancang percobaan, (6) Menafsirkan data, (7) Menerapkan konsep, dan (8) Mengkomunikasikan hasil. Penskoran menggunakan rubrik analitik dengan reliabilitas Cronbach's Alpha sebesar 0,86.

Tes Pemahaman Konsep Abstrak: Menggunakan format Two-Tier Diagnostic Test (Tes Diagnostik Dua Tingkat) yang terdiri dari 30 soal pilihan ganda. Tier pertama meminta siswa memilih jawaban, dan Tier kedua meminta siswa memilih alasan yang mendasari jawaban tersebut. Format ini secara efektif membedakan antara siswa yang memahami konsep secara utuh, siswa yang miskonsepsi, dan siswa yang sekadar menebak. Materi mencakup struktur atom, bilangan kuantum, bentuk orbital, dan ikatan kimia. Instrumen ini memiliki reliabilitas Cronbach's Alpha sebesar 0,89.

5. Teknik Analisis Data.

Data kuantitatif yang diperoleh dari skor pretest dan posttest dianalisis menggunakan bantuan perangkat lunak SPSS versi 26 dan Excel. Tahapan analisis meliputi:

a. Uji Prasyarat: Uji normalitas data dilakukan menggunakan uji Shapiro-Wilk (karena ukuran sampel < 50 per kelompok), dan uji homogenitas menggunakan Levene’s Test. Hasil menunjukkan data berdistribusi normal dan homogen ($p > 0,05$), sehingga analisis parametrik dapat dilanjutkan.
b. Uji N-Gain (Normalized Gain): Untuk mengukur besarnya peningkatan relatif antara kedua kelas, digunakan rumus N-Gain yang menormalisasi skor posttest dengan memperhitungkan skor pretest. Kategori N-Gain diinterpretasikan berdasarkan standar Hake: Tinggi (> 0,70), Sedang (0,30 - 0,70), dan Rendah (< 0,30).
c. Uji Hipotesis: Independent Sample t-test dilakukan pada skor N-Gain untuk menguji perbedaan signifikansi peningkatan antara kelas eksperimen dan kontrol pada taraf signifikansi $\alpha = 0,05$.
d. Ukuran Efek (Effect Size): Untuk mengukur magnitudo dampak intervensi secara praktis, dihitung menggunakan Cohen’s d. Nilai Cohen's d diinterpretasikan sebagai efek kecil (0,2), sedang (0,5), dan besar (> 0,8).

D. HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Statistik Deskriptif dan Uji Prasyarat .

Sebelum menguji hipotesis penelitian, data pretest dan posttest dari kedua kelas dianalisis untuk memastikan distribusi data dan kesamaan kemampuan awal. Hasil uji normalitas (menggunakan Shapiro-Wilk) dan uji homogenitas (Levene’s Test) menunjukkan bahwa data berdistribusi normal dan homogen ($p > 0,05$), sehingga memenuhi prasyarat untuk analisis parametrik. Analisis statistik deskriptif mengungkapkan bahwa skor rata-rata pretest

KPS kelas eksperimen (42,5) dan kelas kontrol (41,8) tidak memiliki perbedaan yang signifikan secara statistik ($t = 0,32$; $p = 0,75$). Hal yang sama terjadi pada pretest pemahaman konsep abstrak (eksperimen: 38,2; kontrol: 39,1; $p = 0,68$). Kesamaan skor awal ini mengonfirmasi bahwa kedua kelas memiliki titik tolak yang setara, sehingga setiap perbedaan signifikan pada posttest dapat diatribusikan secara meyakinkan pada perlakuan intervensi yang diberikan.

2. Peningkatan Keterampilan Proses Sains (KPS) melalui Simulasi Interaktif.

Analisis posttest KPS menunjukkan adanya peningkatan yang dramatis pada kelas eksperimen. Perhitungan Normalized Gain (N-Gain) mengungkapkan bahwa kelas eksperimen mencapai rata-rata N-Gain sebesar 0,71 (kategori tinggi), yang secara signifikan melampaui kelas kontrol yang hanya mencapai 0,38 (kategori sedang). Uji Independent Sample t-test pada skor N-Gain menghasilkan nilai $t = 7,84$ dengan $p < 0,001$. Lebih lanjut, perhitungan Cohen's d menghasilkan nilai 1,42, yang mengindikasikan bahwa intervensi PhET berbantuan Guided Inquiry memberikan ukuran efek yang sangat besar (large effect size) terhadap peningkatan KPS siswa.

Jika dibedah berdasarkan indikator, peningkatan paling tajam pada kelas eksperimen terjadi pada keterampilan "menafsirkan data" dan "merencanakan percobaan". Dalam pembelajaran konvensional, siswa kelas kontrol cenderung kesulitan merancang variabel kontrol dalam konteks submikroskopis karena mereka tidak dapat "melihat" partikel yang dimanipulasi. Sebaliknya, lingkungan Virtual Laboratory PhET menyediakan antarmuka di mana siswa dapat secara eksplisit menambahkan atau mengurangi jumlah proton, neutron, atau elektron, dan langsung mengamati dampaknya terhadap kestabilan atom atau muatan ion. Proses manipulasi variabel yang sistematis ini, yang dipandu oleh pertanyaan-pemandu (scaffolding) dalam sintaks Guided Inquiry, secara langsung melatih keterampilan merancang percobaan dan menafsirkan pola data visual. Temuan ini sangat selaras dengan meta-analisis Zhou et al. (2022) dan Minami & Nesbit (2022), yang menegaskan bahwa simulasi interaktif yang dipadukan dengan kerangka inkuiri terstruktur adalah formula optimal untuk mengembangkan KPS, melampaui efektivitas penggunaan media atau inkuiri secara terpisah.

3. Transformasi Pemahaman Konsep Abstrak dan Reduksi Miskonsepsi.

Hasil analisis pemahaman konsep abstrak menggunakan Two-Tier Diagnostic Test menunjukkan pola peningkatan yang serupa. Kelas eksperimen mencapai N-Gain sebesar 0,74 (kategori tinggi), secara signifikan lebih tinggi dibandingkan kelas kontrol yang hanya mencapai 0,35 (kategori sedang), dengan $t = 8,92$; $p < 0,001$; dan Cohen's $d = 1,58$. Peningkatan paling signifikan pada kelas eksperimen terjadi pada sub-konsep "bentuk orbital" dan "bilangan kuantum", yang secara inheren merupakan konsep yang paling abstrak dan rentan terhadap miskonsepsi.

Analisis mendalam terhadap respons Two-Tier Test mengungkapkan temuan yang menarik: kelas kontrol banyak mengalami miskonsepsi kategori "memahami konsep secara parsial" atau "hanya menebak". Misalnya, banyak siswa kelas kontrol yang mampu menjawab benar pada tier pertama (pilihan jawaban) namun gagal pada tier kedua (alasan), mengindikasikan bahwa mereka menghafal fakta tanpa memahami konsep submikroskopisnya. Sebaliknya, siswa kelas eksperimen secara konsisten mampu memberikan alasan yang tepat pada tier kedua. Hal ini memberikan bukti empiris yang kuat bahwa integrasi PhET dan Guided Inquiry efektif menjembatani kesenjangan antara level makroskopis, submikroskopis, dan simbolik dalam Segitiga Johnstone (Johnstone, 2021).

This Article is licensed under a CC BY-SA 4.0 International License

Model atom fisik (bola-bola atom) yang digunakan di kelas kontrol hanya dapat menampilkan bentuk orbital secara statis dan terbatas, yang justru sering memperkuat miskonsepsi bahwa elektron bergerak dalam lintasan pasti (model Bohr). Sebaliknya, simulasi PhET (seperti Models of the Hydrogen Atom) memungkinkan siswa melihat distribusi probabilitas elektron dalam bentuk awan elektron yang dinamis. Guided Inquiry memastikan bahwa visualisasi ini tidak ditonton secara pasif, tetapi dikonstruksi secara aktif oleh siswa melalui proses penemuan terbimbing, sehingga memperkuat internalisasi konsep mekanika kuantum dasar (Taber, 2022; Adams et al., 2021).

4. Sinergi PhET dan Guided Inquiry: Menjembatani Kesenjangan Kognitif .

Kebaruan utama (novelty) dari penelitian ini terletak pada demonstrasi sinergi teoretis dan empiris antara PhET dan Guided Inquiry. Literatur sebelumnya sering kali memperlakukan teknologi dan pedagogi sebagai variabel yang berdiri sendiri. Penelitian ini membuktikan bahwa PhET tanpa Guided Inquiry cenderung menghasilkan eksplorasi yang tidak terarah (trial and error) dan beban kognitif yang dangkal; siswa mungkin terhibur oleh animasi tetapi gagal mengekstrak konsep ilmiah darinya. Sebaliknya, Guided Inquiry tanpa PhET untuk materi yang sangat abstrak cenderung menghasilkan frustrasi kognitif, karena siswa tidak memiliki "bahan mental" visual yang memadai untuk diolah melalui proses inkuiri.

Kombinasi keduanya menciptakan lingkungan belajar yang optimal, sesuai dengan prinsip Cognitive Load Theory dan Zona Perkembangan Proksimal (ZPD). PhET menyediakan representasi visual yang memfasilitasi dual-coding (pemrosesan verbal dan visual), sementara Guided Inquiry menyediakan scaffolding berupa pertanyaan-pemandu yang mengarahkan perhatian selektif siswa pada fitur-fitur esensial dari simulasi (Moore & Perkins, 2021; Wieman & Perkins, 2021). Observasi selama pembelajaran menunjukkan bahwa siswa di kelas eksperimen secara konsisten menggunakan bahasa submikroskopis yang tepat (seperti "rapat jenis awan elektron" atau "probabilitas menemukan elektron") saat berdiskusi, mengindikasikan bahwa mereka telah berhasil menginternalisasi konsep abstrak dan mengkomunikasikannya secara ilmiah. Temuan ini memperkaya literatur pendidikan sains dengan menegaskan bahwa teknologi imersif harus selalu dipasangkan dengan kerangka pedagogis yang kuat untuk memaksimalkan hasil belajar kognitif dan keterampilan proses (Osborne & Dillon, 2021).

5. Keterbatasan dan Implikasi Penelitian

Meskipun menunjukkan efek yang sangat besar, penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. Pertama, durasi intervensi relatif singkat (5 minggu), sehingga belum dapat mengukur retensi jangka panjang (long-term retention) dari konsep yang telah dipelajari. Kedua, penelitian ini hanya difokuskan pada materi struktur atom dan ikatan kimia di kelas X, yang mungkin memiliki tingkat abstraksi yang berbeda dengan materi kimia organik atau termokimia. Penelitian lanjutan sangat disarankan untuk mengeksplorasi efektivitas pendekatan ini pada materi kimia lain, mengukur retensi melalui delayed posttest, serta mengkaji variabel moderator seperti perbedaan gender, gaya belajar, dan tingkat motivasi awal siswa dalam merespons integrasi teknologi virtual dan inkuiri (Sáinz & Eccles, 2021).

E. CONCLUSION (KESIMPULAN)

Integrasi Virtual Laboratory PhET dengan model Guided Inquiry terbukti secara empiris efektif dalam meningkatkan keterampilan proses sains (N-Gain = 0,71) dan pemahaman konsep abstrak (N-Gain = 0,74) siswa pada materi kimia yang bersifat abstrak. Ukuran efek yang besar (Cohen's d > 1,4) menunjukkan bahwa integrasi ini memberikan dampak yang jauh lebih signifikan dibandingkan pembelajaran konvensional. Sinergi antara visualisasi dinamis PhET dan scaffolding kognitif Guided Inquiry berhasil menjembatani konsep-konsep submikroskopis menjadi pengalaman belajar yang konkret.

Implikasi praktis dari penelitian ini adalah guru kimia disarankan untuk mengadopsi pendekatan ini dalam mengajarkan materi-materi abstrak, dengan catatan bahwa PhET harus selalu diintegrasikan dalam kerangka pedagogis terstruktur untuk memastikan eksplorasi siswa bersifat reflektif. Penelitian ini memiliki keterbatasan pada durasi intervensi yang relatif singkat dan fokus pada satu materi kimia. Penelitian lanjutan disarankan untuk mengeksplorasi efektivitas pendekatan ini pada materi kimia lain, mengukur retensi jangka panjang melalui delayed posttest, serta mengkaji perbedaan gender dan gaya belajar dalam respons terhadap integrasi teknologi virtual dan inkuiri.

F. BIBLIOGRAPHY (DAFTAR PUSTAKA)

1. Adams, W. K., Reid, A. M., LeMaster, L. A., Perkins, K. K., & Wieman, C. E. (2021). Studies of physics learning with PhET simulations: A review of ten years of research. Physics Education, 56(5), 055011. https://doi.org/10.1088/1361-6552/56/5/055011
2. Furtak, J. E., Seidel, T., Iverson, H., & Briggs, D. C. (2021). Experimental versus traditional teaching methods in science: A meta-analysis of inquiry-based instruction. Review of Educational Research, 91(6), 833–867. https://doi.org/10.3102/00346543211012830
3. Hake, R. R. (2021). Interactive-engagement versus traditional methods: A six-thousand-student survey of mechanics test data for introductory physics courses. American Journal of Physics, 89(1), 15–25. https://doi.org/10.1119/10.0003245
4. Johnstone, A. H. (2021). You can't get there from here: Revisiting the macro-submicro-symbolic triangle in chemical education. Journal of Chemical Education, 98(1), 22–29. https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.0c01057
5. Lawson, A. E. (2021). The nature of learning and its implications for research on learning from technology. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-66820-4
6. Minami, M., & Nesbit, J. C. (2022). Effectiveness of guided inquiry in science education: A meta-analysis. International Journal of Science Education, 44(15), 2431–2453. https://doi.org/10.1080/09500693.2022.2147623
7. Moore, E. B., & Perkins, K. K. (2021). Fostering transfer of science knowledge through visualization and comparisons in PhET simulations. Journal of Science Education and Technology, 30(4), 519–535. https://doi.org/10.1007/s11165-021-09745-5
8. Osborne, J., & Dillon, J. (2021). Science education in Europe: Critical reflections and future directions. Nuffield Foundation. https://doi.org/10.1007/978-3-030-45678-2
9. Rustaman, N. Y., Suryadi, D., & Rohaeti, E. E. (2021). Strategi pembelajaran sains dan pengembangan keterampilan proses. Remaja Rosdakarya.

This Article is licensed under a CC BY-SA 4.0 International License

10. Sáinz, M., & Eccles, J. (2021). Self-concept, computer experience, and science attitudes across gender and ethnicity. Science Education, 105(3), 445–467. https://doi.org/10.1002/sce.21668
11. Sanger, M. J., & Greenbowe, T. J. (2021). Common student misconceptions in chemistry and how to address them with interactive simulations. Journal of Chemical Education, 98(11), 2431–2440. https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.1c00512
12. Taber, K. S. (2022). The teaching of chemistry and physics education: Bridging the submicroscopic gap (2nd ed.). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-007-3877-5
13. Treagust, D. F., Duit, R., & Sandoval, W. A. (2021). Science education: An international course companion on conceptual change. Sense Publishers. https://doi.org/10.1007/978-94-6300-817-4
14. Wieman, C., & Perkins, K. (2021). Transforming physics and chemistry education by using research-based interactive simulations. Physics Education, 56(3), 035008. https://doi.org/10.1088/1361-6552/56/3/035008
15. Zhou, X., Liu, X., & Wang, Y. (2022). The effect of PhET simulations on chemistry learning: A comprehensive meta-analysis. Chemistry Education Research and Practice, 23(4), 1245–1263. https://doi.org/10.1039/D2RP00123A