

DEVELOPMENT OF A PROBLEM-BASED LEARNING MODEL IN CHEMISTRY RESPONSIVE TO CLIMATE CHANGE IN CHEMISTRY TEACHER TRAINING AT MADRASAH ALIYAH

PENGEMBANGAN MODEL PEMBELAJARAN *PROBLEM BASED LEARNING* (PBL) YANG RESPONSIF TERHADAP PERUBAHAN IKLIM PADA PELATIHAN GURU KIMIA MADRASAH ALIYAH DI LINGKUNGAN KEMENTERIAN AGAMA

Intan Pulungan^{1*}

Nurul Kamilaty²

Hironymus Ghodang³

¹Balai Pendidikan dan Pelatihan Keagamaan (BDK) Medan, Kementerian Agama Republik Indonesia

²Balai Pendidikan dan Pelatihan Keagamaan (BDK) Semarang, Kementerian Agama Republik Indonesia

³Badan Pengembangan Sumber Daya Manusia (BPSDM) Provinsi Sumatera Utara, Indonesia

*Email: intanpulungan1969@gmail.com

Abstract

Climate change is a global challenge that requires deep awareness and understanding across sectors, including chemistry teacher training. This study aims to develop a problem-based learning (PBL) model for chemistry that is responsive to climate change issues, and to examine its impact and effectiveness in enhancing trainees' understanding and awareness within their professional competencies. The research adopts a mixed-methods approach with a sequential exploratory design, involving 60 chemistry trainees as participants (30 experimental, 30 control) at the Center for Religious Education and Training in Medan. Data were collected through observation, interviews, questionnaires, and documentation, and were analyzed using thematic analysis for qualitative data and t-tests for quantitative data. Based on the ANCOVA test, the significance value was 0.000 ($p < 0.05$), leading to the rejection of H_0 and acceptance of H_a . This indicates that the responsive problem-based chemistry instructional model has a significant effect on trainees' awareness and understanding of climate change. The PBL approach proved more effective in internalizing chemistry concepts relevant to climate change than conventional instruction, while also enhancing critical awareness of environmental impacts. The adjusted R^2 value of 0.748 indicates that 74.8% of the variance in trainees' awareness and understanding can be explained by the experimental group variable (the PBL chemistry model), while the remaining 25.2% is attributable to other variables outside the model. The study concludes that the problem-based chemistry learning model is effective in increasing trainees' conceptual understanding and ecological awareness regarding climate change.

Keywords: Chemistry Learning Model; Climate Change; Curriculum Integration; Problem-Based Learning (PBL); Trainees

PENDAHULUAN

Perubahan iklim merupakan tantangan global yang berdampak pada hampir seluruh sektor kehidupan. Laporan *Intergovernmental Panel on Climate Change* menegaskan bahwa peningkatan konsentrasi gas rumah kaca akibat aktivitas antropogenik telah menyebabkan perubahan iklim yang nyata dan berisiko tinggi terhadap ekosistem maupun kehidupan manusia, termasuk di Indonesia (IPCC, 2014). Pendidikan, khususnya pendidikan kimia, memiliki peran strategis dalam membangun pemahaman dan mitigasi perubahan iklim karena banyak konsep kimia reaksi pembakaran, siklus karbon, gas rumah kaca, dan pencemaran udara berkaitan langsung dengan fenomena tersebut (Situmorang, Sitorus, Hutabarat, & Situmorang, 2015; Wissinger et al., 2021). Namun demikian, pembelajaran kimia di lembaga pelatihan maupun sekolah masih didominasi pendekatan teoretis yang menekankan hafalan konsep tanpa mengaitkannya dengan persoalan lingkungan yang nyata (Liarakou, Athanasiadis, & Gavrilakis, 2018).

Kesenjangan kesiapan guru dalam mengajarkan perubahan iklim juga terlihat dalam survei global UNESCO dan Education International. Melalui survei terhadap 58.280 guru di berbagai negara, UNESCO dan Education International (2021) menemukan bahwa hanya sekitar 37% guru yang menyatakan mampu menjelaskan dengan baik tingkat keparahan perubahan iklim, sementara hanya sekitar 32% yang merasa mampu menjelaskan dampak perubahan iklim terhadap wilayah atau lokalitasnya. Temuan tersebut menunjukkan bahwa meskipun guru umumnya menyadari pentingnya isu perubahan iklim, kemampuan mereka untuk menjelaskan dan mengajarkannya secara lebih mendalam masih memerlukan penguatan. Kondisi ini menjadi semakin penting dalam konteks pendidikan kimia karena banyak fenomena perubahan iklim berkaitan dengan konsep-konsep kimia yang perlu diterjemahkan ke dalam pembelajaran yang bermakna dan kontekstual.

Persoalan ini juga berkaitan dengan tantangan kompetensi pendidik secara lebih luas, mengingat capaian literasi sains peserta didik Indonesia dalam berbagai asesmen internasional masih tergolong rendah (OECD, 2016) dan tuntutan kompetensi abad ke-21 berpikir kritis, kolaborasi, komunikasi, dan kreativitas semakin mendesak untuk dipenuhi (Trilling & Fadel, 2009; Risdianto, 2019). Dari perspektif teori belajar, konstruktivisme menekankan bahwa pengetahuan dibangun secara aktif oleh individu melalui pengalaman dan interaksi dengan lingkungan (Trianto, 2007), sehingga *Problem-Based Learning* (PBL) yang menghadapkan peserta pelatihan pada masalah nyata perubahan iklim sejalan dengan prinsip tersebut. PBL menempatkan peserta didik dalam skenario masalah otentik yang mendorong eksplorasi konsep secara aktif, kolaboratif, dan reflektif (Savery, 2006), sekaligus menggeser peran pengajar dari penyampai informasi menjadi fasilitator pembelajaran (Barrows & Tamblyn, 1980). Pendekatan berbasis masalah dan proyek lingkungan yang serupa juga terbukti meningkatkan keterlibatan peserta dalam isu keberlanjutan pada berbagai jenjang pendidikan (Monroe, Plate, & Oxarart, 2019; Andersson & Shon, 2019).

Secara operasional, PBL memiliki sintaks yang khas: peserta dihadapkan pada suatu masalah otentik untuk diorientasikan, mengorganisasikan diri untuk belajar, melakukan penyelidikan mandiri maupun kelompok, mengembangkan dan menyajikan hasil karya atau solusi, kemudian merefleksikan proses pemecahan masalah yang telah dilakukan (Hmelo-Silver, 2004). Sintaks tersebut memungkinkan peserta pelatihan tidak hanya memperoleh pengetahuan konseptual tentang kimia, tetapi juga mengembangkan keterampilan pemecahan masalah dan regulasi diri yang relevan dengan kompleksitas isu perubahan iklim. Karakteristik inilah yang menjadikan PBL sebagai pendekatan yang dipandang tepat untuk dijadikan basis pengembangan model pembelajaran dalam penelitian ini.

Secara kelembagaan, Balai Pendidikan dan Pelatihan Keagamaan (BDK) Medan memegang peran penting dalam peningkatan kompetensi profesional guru kimia Madrasah Aliyah di wilayah Sumatera Utara dan sekitarnya, sebuah kawasan yang tergolong rentan terhadap dampak perubahan iklim seperti kebakaran hutan dan lahan, banjir, serta pencemaran udara lintas wilayah. Kondisi ini menuntut widyaiswara dan peserta pelatihan guru kimia untuk tidak hanya menguasai konsep kimia secara teoretis, tetapi juga mampu menerjemahkannya ke dalam konteks lingkungan lokal yang dihadapi peserta didik mereka di madrasah. Namun demikian, materi dan modul pelatihan kimia yang tersedia pada umumnya belum secara eksplisit mengintegrasikan isu perubahan iklim ke dalam rancangan pembelajarannya.

Kajian terhadap penelitian terdahulu menunjukkan bahwa integrasi isu keberlanjutan dan perubahan iklim dalam pembelajaran kimia telah berkembang dalam beberapa arah. Penelitian Wissinger et al. (2021), misalnya, menekankan pentingnya mengintegrasikan perspektif keberlanjutan ke dalam pendidikan kimia, tetapi kajiannya lebih berfokus pada

arah dan prinsip integrasi keberlanjutan daripada pengujian model pembelajaran tertentu pada peserta pelatihan guru. Penelitian Liarakou, Athanasiadis, dan Gavrilakis (2018) menunjukkan bahwa teknologi dapat dimanfaatkan untuk mengajarkan konsep kimia dan isu lingkungan yang berkaitan dengan perubahan iklim, tetapi fokusnya belum secara khusus pada pengembangan model PBL untuk pelatihan guru kimia. Sementara itu, kajian Misseyanni, Marouli, dan Papadopoulou (2020) menunjukkan pentingnya pembelajaran dalam membentuk sikap terhadap lingkungan dan keberlanjutan, tetapi konteksnya berada pada pendidikan tinggi secara umum dan belum secara khusus mengkaji guru kimia sebagai peserta pelatihan profesional. Penelitian Minata, Rahayu, dan Dasna (2022) memperlihatkan bahwa pembelajaran kimia berbasis konteks dapat membantu menghubungkan konsep kimia dengan situasi nyata, sedangkan Zakiah (2020) mengembangkan bahan pengayaan kimia yang terintegrasi dengan pendidikan pembangunan berkelanjutan pada isu perubahan iklim. Kedua penelitian tersebut menunjukkan pentingnya konteks lingkungan dalam pembelajaran kimia, tetapi belum menjelaskan secara empiris penerapan model PBL yang secara khusus dirancang untuk meningkatkan pemahaman dan kesadaran guru terhadap perubahan iklim.

Dari kajian tersebut terlihat bahwa penelitian terdahulu telah memberikan dasar penting mengenai integrasi keberlanjutan, konteks lingkungan, dan pembelajaran berbasis masalah dalam pendidikan sains dan kimia. Namun, masih terdapat beberapa kesenjangan. Secara empiris, penelitian yang secara simultan menguji perubahan pemahaman konsep kimia dan kesadaran peserta terhadap perubahan iklim melalui penerapan PBL masih terbatas. Secara metodologis, penelitian terdahulu lebih banyak membahas integrasi keberlanjutan, penggunaan konteks lingkungan, atau pengembangan bahan ajar, sementara pengujian model PBL melalui desain kuasi-eksperimen dengan kelompok pembandingan pada konteks pelatihan guru masih terbatas. Secara kontekstual, penelitian yang secara khusus menempatkan guru kimia Madrasah Aliyah sebagai peserta pelatihan di lingkungan Kementerian Agama juga masih terbatas. Dari sisi produk, penelitian terdahulu telah menghasilkan bahan ajar atau sumber belajar yang berkaitan dengan keberlanjutan, tetapi belum banyak yang mengintegrasikan sintaks PBL, isu perubahan iklim, perangkat pelatihan, dan instrumen penilaian dalam satu model pembelajaran yang dirancang untuk digunakan oleh widyaiswara dalam pelatihan guru kimia.

Dengan demikian, posisi penelitian ini tidak sekadar mengulang penerapan PBL pada pembelajaran kimia, tetapi mengembangkan PBL yang diberi konteks dan arah khusus pada perubahan iklim serta mengujinya pada peserta pelatihan guru kimia Madrasah Aliyah. Model yang dikembangkan menghubungkan masalah perubahan iklim yang autentik dengan konsep kimia, proses penyelidikan dan pemecahan masalah, serta refleksi terhadap dampak dan respons terhadap persoalan lingkungan. Penelitian ini sekaligus menguji apakah karakteristik tersebut berkontribusi terhadap peningkatan pemahaman konsep kimia dan kesadaran peserta terhadap perubahan iklim dibandingkan pembelajaran konvensional. Dengan posisi tersebut, penelitian ini memperluas penerapan PBL dari sekadar strategi pembelajaran berbasis masalah menjadi model pembelajaran yang menggunakan isu perubahan iklim sebagai konteks utama untuk membangun pemahaman konseptual sekaligus kesadaran ekologis guru kimia.

Keterkaitan antara PBL responsif terhadap perubahan iklim dan fokus pada pemahaman serta kesadaran guru terletak pada karakteristik PBL yang menjadikan masalah autentik sebagai titik awal untuk membangun pengetahuan. Ketika masalah perubahan iklim digunakan sebagai konteks pembelajaran kimia, peserta tidak hanya dituntut memahami konsep yang berkaitan dengan fenomena tersebut, tetapi juga mengidentifikasi penyebab, dampak, dan kemungkinan respons terhadap masalah yang dikaji. Proses tersebut memberikan ruang bagi berkembangnya pemahaman konseptual sekaligus kesadaran terhadap dimensi lingkungan dari konsep kimia. Dalam konteks pelatihan guru, proses ini menjadi penting karena peningkatan pemahaman guru tentang perubahan iklim tidak berhenti pada penguasaan pengetahuan, tetapi diharapkan memengaruhi cara guru memaknai dan mengintegrasikan isu tersebut dalam pembelajaran. Oleh karena itu, penelitian ini menempatkan pemahaman konsep kimia dan kesadaran terhadap perubahan iklim sebagai dua hasil yang saling berkaitan untuk melihat efektivitas PBL responsif perubahan iklim pada peserta pelatihan guru kimia.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk: (1) mengembangkan model pembelajaran kimia berbasis masalah yang responsif terhadap perubahan iklim; (2) mengetahui dampak penerapan model tersebut terhadap kesadaran dan pemahaman peserta pelatihan guru kimia tentang perubahan iklim; dan (3) mengungkapkan efektivitas model pembelajaran tersebut, melalui modul pembelajaran, dalam meningkatkan kesadaran dan pemahaman peserta pelatihan terhadap perubahan iklim.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan *mixed methods* dengan desain *sequential explanatory*, yang memadukan analisis kuantitatif dan kualitatif secara berurutan untuk memperoleh pemahaman yang komprehensif mengenai pengembangan dan efektivitas model pembelajaran (Creswell, 2014). Tahap kuantitatif dilakukan lebih dahulu melalui eksperimen semu (*quasi-experiment*) untuk menguji dampak dan efektivitas model, kemudian dilanjutkan dengan tahap kualitatif melalui wawancara mendalam dan observasi untuk memperdalam dan menjelaskan temuan kuantitatif tersebut.

Pengembangan model pembelajaran mengikuti prosedur *Research and Development* (R&D) dengan model ADDIE (*Analysis, Design, Development, Implementation, Evaluation*). Tahap analisis mencakup kajian kurikulum kimia yang berkaitan dengan isu perubahan iklim serta karakteristik peserta pelatihan guru kimia. Tahap desain menghasilkan kerangka modul pembelajaran berbasis PBL beserta instrumen *pretest-posttest* dan angket kesadaran-pemahaman. Tahap pengembangan menghasilkan modul, panduan praktik, dan instrumen penilaian yang divalidasi oleh ahli materi dan ahli media menggunakan indeks *Aiken's V*. Tahap implementasi dilakukan melalui uji coba kelompok kecil (10 peserta) dan uji coba kelompok besar (30 peserta eksperimen dan 30 peserta kontrol), sedangkan tahap evaluasi mengintegrasikan umpan balik validator ahli, peserta pelatihan, dan hasil uji coba untuk penyempurnaan model.

Pada tahap implementasi, produk pembelajaran terlebih dahulu diuji coba dalam kelompok kecil yang melibatkan 10 peserta untuk memperoleh masukan mengenai keterlaksanaan, kejelasan materi, dan respons peserta terhadap perangkat pembelajaran. Peserta pada uji coba kelompok kecil tidak termasuk dalam 60 peserta penelitian utama, sehingga tidak diperhitungkan dalam analisis eksperimen. Setelah dilakukan penyempurnaan berdasarkan hasil uji coba tersebut, model pembelajaran diterapkan pada 60 peserta pelatihan guru kimia yang terdiri atas 30 peserta kelompok eksperimen dan 30 peserta kelompok kontrol. Kelompok eksperimen memperoleh pembelajaran menggunakan model PBL responsif terhadap perubahan iklim, sedangkan kelompok kontrol memperoleh pembelajaran konvensional dengan materi yang sama. Penetapan kelompok dilakukan berdasarkan kelompok pelatihan yang telah terbentuk, sehingga penelitian ini menggunakan desain *quasi-experiment* dan tidak melibatkan *random assignment* individual terhadap peserta.

Penelitian melibatkan 60 peserta pelatihan guru kimia Madrasah Aliyah di Balai Pendidikan dan Pelatihan Keagamaan (BDK) Medan, terbagi ke dalam kelompok eksperimen ($n=30$) yang menerima pembelajaran menggunakan model PBL responsif perubahan iklim, dan kelompok kontrol ($n=30$) yang menjalani pembelajaran konvensional. Data primer dikumpulkan melalui kuesioner (skala Likert dan Guttman), wawancara mendalam, dan observasi, sedangkan data sekunder diperoleh dari literatur ilmiah terkait pendidikan kimia dan perubahan iklim. Instrumen tes dan angket telah melalui uji validitas isi (*Aiken's V*) dan diuji reliabilitasnya dengan *Cronbach's Alpha* sebelum digunakan dalam pengumpulan data.

Validasi instrumen dilakukan oleh tiga orang ahli (ahli materi kimia, ahli evaluasi pembelajaran, dan ahli media pembelajaran) menggunakan indeks *Aiken's V*, dengan kriteria butir dinyatakan valid apabila $V \geq 0,4$. Hasil validasi menunjukkan bahwa angket kesadaran dan pemahaman peserta terhadap perubahan iklim memperoleh nilai rata-rata V sebesar 0,708, sedangkan soal tes kimia yang responsif terhadap perubahan iklim memperoleh nilai rata-rata V sebesar 0,687; kedua instrumen tergolong pada kategori validitas isi sedang hingga tinggi dan layak digunakan untuk pengumpulan data. Uji reliabilitas dengan *Cronbach's Alpha* menghasilkan nilai 0,777 untuk angket kesadaran-pemahaman dan 0,735 untuk soal tes kimia, yang keduanya berada di atas ambang batas kritis 0,70 sehingga instrumen dinyatakan reliabel dan konsisten digunakan dalam pengumpulan data penelitian.

Data kuantitatif berupa skor pretest dan posttest tes kimia serta angket kesadaran-pemahaman dianalisis melalui statistik deskriptif dan inferensial. Uji prasyarat meliputi uji normalitas *Kolmogorov-Smirnov* dan *Shapiro-Wilk* serta uji homogenitas *Levene*. Pengujian hipotesis dilakukan melalui uji proporsi ketuntasan klasikal, uji beda proporsi (*independent sample t-test*), uji peningkatan (*paired sample t-test*), dan uji regresi menggunakan *Analysis of Covariance* (ANCOVA) untuk mengetahui pengaruh kelompok perlakuan terhadap pemahaman dan kesadaran peserta dengan mengontrol skor *pretest* sebagai kovariat. Data kualitatif dari transkrip wawancara dan hasil observasi dianalisis melalui reduksi data, penyajian data, dan penarikan simpulan, dengan uji keabsahan data melalui kredibilitas dan transferabilitas untuk memastikan temuan mencerminkan realitas lapangan secara akurat.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

Penelitian ini melibatkan 60 peserta pelatihan guru kimia Madrasah Aliyah di BDK Medan yang terbagi ke dalam kelompok eksperimen dan kelompok kontrol (**Tabel 1**).

Tabel 1. Distribusi Peserta Pelatihan Berdasarkan Kelompok dan Jenis Kelamin

No	Kelompok	Laki-laki	Perempuan	Jumlah
1	Eksperimen	6	24	30
2	Kontrol	4	26	30
	Jumlah	10	50	60

Sumber: Data Diolah (2025)

Produk utama penelitian ini berupa model pembelajaran kimia berbasis masalah yang dilengkapi dengan modul pelatihan kontekstual, meliputi rencana pelaksanaan pembelajaran (RPP) berbasis isu perubahan iklim, rubrik penilaian, studi kasus nyata (seperti kabut asap akibat kebakaran lahan dan emisi industri), proyek mini bertema lingkungan, serta pemanfaatan sumber belajar terbuka seperti video simulasi NASA dan *PhET Interactive Simulations*. Model ini dirancang agar widyaiswara dan peserta pelatihan memiliki panduan yang konkret dan mudah direplikasi, alih-alih hanya mengandalkan teori abstrak tentang PBL. Modul yang dihasilkan telah melalui proses validasi ahli materi dan ahli media sebagaimana dijelaskan pada bagian metode, sehingga kelayakannya sebagai instrumen pembelajaran dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah.

Untuk menunjukkan secara konkret perbedaan perlakuan antara kedua kelompok, pelaksanaan pembelajaran pada kelompok eksperimen dirancang mengikuti kelima tahapan sintaks PBL sebagaimana dikonseptualisasikan oleh Hmelo-Silver (2004), yaitu peserta dihadapkan pada masalah otentik untuk diorientasikan, mengorganisasikan diri untuk belajar, melakukan penyelidikan mandiri maupun kelompok, mengembangkan dan menyajikan hasil karya atau solusi, kemudian merefleksikan proses pemecahan masalah yang telah dilakukan. Kelima tahapan tersebut diterapkan secara eksplisit pada kelompok eksperimen dan dikontraskan dengan aktivitas pembelajaran konvensional pada kelompok kontrol, sebagaimana dirangkum pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Perbandingan Tahapan Pelaksanaan Pembelajaran pada Kelompok Eksperimen dan Kelompok Kontrol

Tahapan Sintaks PBL (Hmelo-Silver, 2004)	Kelompok Eksperimen (PBL Responsif Perubahan Iklim)	Kelompok Kontrol (Pembelajaran Konvensional)
1. Orientasi pada masalah otentik	Widyaiswara membuka sesi dengan menyajikan skenario nyata perubahan iklim (kabut asap akibat kebakaran lahan, emisi gas rumah kaca dari industri) yang terkait langsung dengan konsep kimia (reaksi pembakaran, siklus karbon), dilengkapi tayangan video simulasi NASA tentang perubahan iklim global sebagai pemantik pembelajaran.	Widyaiswara menyampaikan materi kimia (reaksi pembakaran, siklus karbon, gas rumah kaca) secara langsung melalui ceramah dan slide presentasi sesuai urutan buku ajar, tanpa skenario masalah kontekstual perubahan iklim.
2. Mengorganisasikan diri untuk belajar	Peserta dibagi ke dalam kelompok kecil (4–5 orang), merumuskan pertanyaan penyelidikan terkait skenario yang diberikan, dan menyusun rencana kerja untuk mencari solusi, difasilitasi oleh widyaiswara sebagai fasilitator, bukan sumber informasi utama.	Peserta mencatat materi yang disampaikan secara individual dan mengerjakan latihan soal terstruktur sesuai instruksi widyaiswara, tanpa tahapan perumusan masalah maupun perencanaan kerja kelompok.
3. Penyelidikan mandiri dan kelompok	Peserta melakukan eksperimen laboratorium sederhana (simulasi efek rumah kaca, uji reaksi pembakaran), mengeksplorasi simulasi interaktif <i>PhET Interactive Simulations</i> , dan berdiskusi	Peserta menyimak demonstrasi eksperimen yang dilakukan widyaiswara secara satu arah, tanpa keterlibatan aktif peserta dalam proses penyelidikan.

Tahapan Sintaks PBL (Hmelo-Silver, 2004)	Kelompok Eksperimen (PBL Responsif Perubahan Iklim)	Kelompok Kontrol (Pembelajaran Konvensional)
	kelompok untuk mengumpulkan data pendukung solusi mitigasi.	
4. Mengembangkan dan menyajikan hasil karya/solusi	Setiap kelompok menyusun produk berupa rancangan RPP kontekstual dan proyek mini edukasi mitigasi perubahan iklim (misalnya kampanye pengurangan emisi di madrasah), lalu mempresentasikannya untuk memperoleh umpan balik dari widyaiswara dan kelompok lain, dinilai menggunakan rubrik penilaian yang telah disusun.	Peserta mengerjakan soal evaluasi tertulis secara individual di akhir sesi, tanpa produk kolaboratif maupun presentasi hasil karya.
5. Refleksi proses pemecahan masalah	Peserta melakukan refleksi terstruktur (jurnal reflektif) mengenai keterkaitan konsep kimia yang dipelajari dengan kesadaran dan tindakan mitigasi perubahan iklim yang dapat mereka terapkan di satuan kerja masing-masing.	Peserta mengikuti sesi tanya jawab singkat mengenai materi yang telah disampaikan, tanpa refleksi terstruktur terhadap keterkaitan materi dengan isu lingkungan.

Sumber: Data Diolah (2025)

Perbedaan operasional pada kelima tahapan tersebut menunjukkan secara nyata bagaimana kelompok eksperimen mengalami proses belajar yang menempatkan peserta sebagai pemecah masalah aktif sejak tahap orientasi hingga refleksi, sedangkan kelompok kontrol tetap berada pada pola pembelajaran konvensional yang berpusat pada widyaiswara sebagai satu-satunya sumber informasi. Pada kelompok eksperimen, setiap tahapan secara konsisten menghadirkan konteks perubahan iklim mulai dari skenario kabut asap dan emisi industri pada tahap orientasi, hingga proyek mitigasi dan refleksi keberlanjutan pada tahap akhir sehingga konsep kimia tidak dipelajari secara terisolasi, melainkan senantiasa dikaitkan dengan persoalan lingkungan nyata. Perbedaan perlakuan inilah yang secara substansial mendasari perbedaan capaian antara kedua kelompok yang dipaparkan pada bagian statistik deskriptif dan pengujian hipotesis berikut.

Kualitas instrumen penelitian dikonfirmasi melalui uji validitas isi dan reliabilitas sebelum digunakan dalam pengumpulan data (**Tabel 2**). Kedua instrumen angket kesadaran-pemahaman dan soal tes kimia terbukti valid dan reliabel sehingga layak digunakan untuk mengukur variabel penelitian secara konsisten.

Tabel 3. Hasil Uji Validitas dan Reliabilitas Instrumen Penelitian

Instrumen	Rata-rata Aiken's V	Kategori	Cronbach's Alpha	Keterangan
Angket Kesadaran dan Pemahaman terhadap Perubahan Iklim	0,708	Sedang	0,777	Reliabel
Soal Tes Kimia yang Responsif terhadap Perubahan Iklim	0,687	Sedang	0,735	Reliabel

Sumber: Data Diolah, SPSS (2025)

Statistik deskriptif skor *pretest* dan *posttest* pada kedua kelompok disajikan pada **Tabel 3** dan **Tabel 4**. Data pada **Tabel 3** menunjukkan bahwa rata-rata skor tes kimia kelompok eksperimen meningkat dari 74,67 (*pretest*) menjadi 86,50 (*posttest*), sedangkan kelompok kontrol meningkat dari 77,86 menjadi 84,29. Pola serupa terlihat pada **Tabel 4**, yaitu rata-rata skor angket kesadaran-pemahaman kelompok eksperimen meningkat dari 93,10 menjadi 103,53, sementara kelompok kontrol meningkat dari 96,94 menjadi 101,83. Penurunan nilai simpangan baku (SD) *posttest* pada kelompok eksperimen turut mengindikasikan bahwa penerapan model PBL tidak hanya meningkatkan skor rata-rata, tetapi juga menghasilkan pemahaman yang lebih merata di antara peserta.

Tabel 4. Statistik Deskriptif Skor Tes Kimia yang Responsif terhadap Perubahan Iklim

Statistik	Pretest Eksperimen	Posttest Eksperimen	Pretest Kontrol	Posttest Kontrol
N	30	30	30	30

Mean	74,67	86,50	77,86	84,29
SD	14,499	4,939	8,070	9,560
Minimum	30	80	60	60
Maximum	95	100	90	100

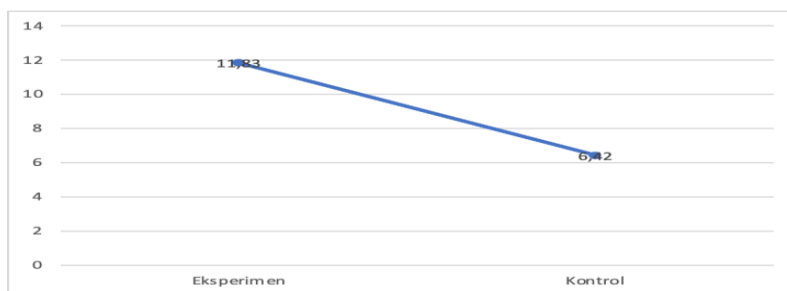
Sumber: Data Diolah, SPSS (2025)

Tabel 5. Statistik Deskriptif Skor Angket Kesadaran dan Pemahaman terhadap Perubahan Iklim

Statistik	Pretest Eksperimen	Posttest Eksperimen	Pretest Kontrol	Posttest Kontrol
N	30	30	30	30
Mean	93,10	103,53	96,94	101,83
SD	8,181	9,126	2,930	2,358
Minimum	75	85	91	97
Maximum	111	119	103	106

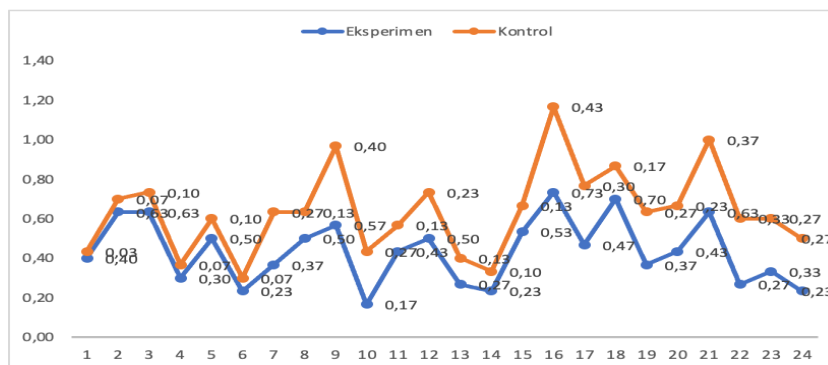
Sumber: Data Diolah, SPSS (2025)

Hasil *pretest* tes kimia menunjukkan rentang nilai 30–95 pada kedua kelompok, dengan sebagian besar peserta berada pada rentang 65–75 (15 peserta eksperimen dan 11 peserta kontrol), yang mengindikasikan kemampuan awal yang relatif setara antarkelompok sebelum perlakuan diberikan. Setelah penerapan model PBL, hasil *posttest* kelompok eksperimen meningkat secara nyata, dengan mayoritas peserta mencapai rentang nilai 80–100, sedangkan kelompok kontrol tetap didominasi rentang nilai 65–90. Rata-rata selisih skor (*gain score*) tes kimia kelompok eksperimen tercatat sebesar 11,83, hampir dua kali lipat dibandingkan kelompok kontrol yang hanya sebesar 6,42 (**Gambar 1**). Pola peningkatan yang lebih tinggi pada kelompok eksperimen juga tampak pada angket kesadaran dan pemahaman peserta terhadap perubahan iklim, dengan kelompok eksperimen menunjukkan peningkatan yang lebih stabil dan konsisten pada seluruh item pernyataan dibandingkan kelompok kontrol yang mengalami fluktuasi lebih tajam, khususnya pada pernyataan terkait kesadaran akan solusi dan mitigasi perubahan iklim (**Gambar 2**).



Gambar 1. Rata-rata Selisih Skor Pretest–Posttest Tes Kimia pada Kelompok Eksperimen dan Kontrol

Sumber: Data Diolah (2025)



Gambar 2. Selisih Skor Angket Kesadaran dan Pemahaman Peserta terhadap Perubahan Iklim

Sumber: Data Diolah (2025)

Uji prasyarat analisis menunjukkan bahwa seluruh data skor pretest dan posttest pada kedua kelompok berdistribusi normal (uji *Kolmogorov-Smirnov* dan *Shapiro-Wilk*, Sig. > 0,05 untuk seluruh kelompok data) dan homogen (uji *Levene*, Sig. = 0,074 > 0,05), sehingga data memenuhi syarat untuk dianalisis lebih lanjut menggunakan statistik parametrik.

Ringkasan hasil pengujian hipotesis disajikan pada **Tabel 5**. Uji proporsi pihak kanan menunjukkan bahwa kelompok eksperimen mencapai ketuntasan klasikal ($Z_{hitung} = 3,164 > Z_{tabel} = 1,645$), yang berarti sedikitnya 75% peserta pelatihan mencapai kriteria keberhasilan belajar setelah penerapan model PBL. Uji beda proporsi (*independent sample t-test*) menunjukkan nilai signifikansi sebesar 0,009 ($p < 0,05$), yang berarti terdapat perbedaan rata-rata pemahaman dan kesadaran yang signifikan antara kelompok eksperimen dan kelompok kontrol. Uji peningkatan (*paired sample t-test*) pada kedua kelompok menunjukkan nilai signifikansi 0,000 ($p < 0,05$), yang berarti masing-masing kelompok mengalami peningkatan pemahaman yang signifikan dari *pretest* ke *posttest*, meskipun besaran peningkatan pada kelompok eksperimen jauh lebih tinggi. Hasil uji regresi ANCOVA, dengan skor pretest sebagai kovariat, menunjukkan bahwa kelompok perlakuan berpengaruh signifikan terhadap skor *posttest* ($F = 34,442$; Sig. = 0,000), dengan nilai *Adjusted R²* sebesar 0,748. Nilai ini menunjukkan bahwa 74,8% variasi pemahaman dan kesadaran peserta terhadap perubahan iklim dapat dijelaskan oleh penerapan model pembelajaran kimia berbasis masalah, sedangkan 25,2% sisanya dipengaruhi oleh variabel lain di luar model penelitian.

Tabel 6. Ringkasan Hasil Pengujian Hipotesis

Pengujian	Statistik Uji	Sig./p	Keputusan
Ketuntasan klasikal (uji proporsi pihak kanan)	$Z_{hitung} = 3,164 > Z_{tabel} = 1,645$	–	H ₀ ditolak; ketuntasan klasikal ($\geq 75\%$) tercapai
Beda proporsi antarkelompok (<i>independent sample t-test</i>)	$t = 1,969$; df = 63	0,009	H ₀ ditolak; eksperimen > kontrol
Peningkatan kelompok eksperimen (<i>paired sample t-test</i>)	$t = -13,350$; df = 29	0,000	H ₀ ditolak; peningkatan signifikan
Peningkatan kelompok kontrol (<i>paired sample t-test</i>)	$t = -14,924$; df = 34	0,000	H ₀ ditolak; peningkatan signifikan (lebih rendah)
Pengaruh model pembelajaran (ANCOVA, kovariat pretest)	$F = 34,442$; <i>Adjusted R²</i> = 0,748	0,000	H ₀ ditolak; pengaruh signifikan (74,8%)

Sumber: Data Diolah (2025)

Analisis data kualitatif melalui wawancara mendalam dan observasi mengungkap lima tema utama yang menjelaskan bagaimana model PBL memengaruhi pemahaman dan kesadaran peserta, sebagaimana dirangkum pada **Tabel 6**.

Tabel 7. Ringkasan Tema Utama Hasil Analisis Kualitatif

No	Tema	Deskripsi Singkat
1	Pemahaman konseptual	Peserta memahami keterkaitan konsep kimia (reaksi pembakaran, siklus karbon) dengan fenomena perubahan iklim yang mereka hadapi sehari-hari.
2	Kesadaran ekologis	Peserta semakin menyadari dampak aktivitas industri, transportasi, dan pola konsumsi energi terhadap peningkatan emisi karbon di wilayahnya.
3	Peran transformasional pendidik	Peserta mengalami pergeseran peran dari sekadar penyampai teori menjadi fasilitator yang mengaitkan kimia dengan tanggung jawab lingkungan.
4	Efektivitas PBL sebagai pendekatan kontekstual	Skenario masalah nyata meningkatkan partisipasi aktif dan intensitas diskusi dibandingkan pembelajaran ceramah konvensional.
5	Kebutuhan modul praktis	Peserta menekankan perlunya modul yang secara sistematis menghubungkan konsep kimia dasar dengan isu perubahan iklim.

Sumber: Data Diolah (2025)

Sebagian besar peserta menyatakan bahwa skenario masalah nyata seperti kabut asap akibat pembakaran lahan atau emisi gas rumah kaca dari industri membantu mereka memahami bahwa konsep kimia seperti reaksi pembakaran dan siklus karbon tidak berdiri sendiri, melainkan berkaitan langsung dengan fenomena lingkungan yang mereka hadapi sehari-hari. Salah satu peserta pelatihan menyatakan, "Setelah mengikuti skenario PBL tentang industri dan emisi karbon, saya jadi lebih memahami bahwa reaksi pembakaran tidak hanya menghasilkan energi, tetapi juga menyumbang terhadap peningkatan suhu global." Peserta lain turut mengungkapkan perubahan cara pandang mereka sebagai pendidik, dari sekadar penyampai teori menjadi fasilitator yang mengaitkan materi kimia dengan tanggung jawab ekologis, serta menekankan pentingnya tersedianya modul praktis yang secara sistematis menghubungkan konsep kimia dengan isu perubahan iklim agar dapat diterapkan secara konsisten dalam pelatihan.

Tema kesadaran ekologis tercermin dari pernyataan peserta yang semakin menyadari keterkaitan antara aktivitas industri, transportasi, dan pola konsumsi energi dengan peningkatan emisi karbon di wilayah tempat tinggal mereka. Sementara itu, tema efektivitas PBL sebagai pendekatan kontekstual diperkuat oleh catatan observasi fasilitator yang menunjukkan peningkatan partisipasi aktif dan intensitas diskusi kelompok pada kelas eksperimen dibandingkan kelas kontrol yang menggunakan metode ceramah. Salah satu peserta lain menambahkan, "Modul yang menghubungkan langsung antara reaksi kimia dengan kasus-kasus lingkungan di sekitar kami membuat materi lebih mudah dipahami dan diingat." Temuan-temuan kualitatif ini memperkuat hasil kuantitatif bahwa model PBL yang responsif terhadap perubahan iklim tidak hanya efektif secara statistik, tetapi juga secara substansi mengubah cara peserta memaknai dan menerapkan konsep kimia dalam konteks lingkungan mereka sehari-hari.

Diskusi

Model PBL Responsif Perubahan Iklim yang dikembangkan mempertahankan sintaks utama *Problem-Based Learning (PBL)*, tetapi memberikan konteks khusus pada setiap tahap melalui isu perubahan iklim yang berkaitan dengan konsep kimia. Pembelajaran diawali dengan orientasi peserta pada masalah autentik, seperti kabut asap akibat kebakaran lahan dan emisi gas rumah kaca, kemudian peserta mengorganisasikan diri untuk mengidentifikasi informasi dan pertanyaan yang perlu dikaji. Selanjutnya, peserta melakukan penyelidikan secara mandiri maupun kelompok dengan menghubungkan fenomena perubahan iklim dengan konsep kimia, seperti reaksi pembakaran, emisi karbon, dan siklus karbon, dengan dukungan modul, studi kasus, video, dan *PhET Interactive Simulations*. Hasil penyelidikan kemudian dikembangkan dan disajikan dalam bentuk hasil kerja atau solusi melalui diskusi dan presentasi, sebelum peserta melakukan refleksi terhadap proses pemecahan masalah serta keterkaitan konsep kimia dengan persoalan perubahan iklim. Dengan demikian, kekhasan model ini tidak terletak pada perubahan sintaks dasar PBL, tetapi pada integrasi isu perubahan iklim secara konsisten sebagai konteks masalah, objek penyelidikan, dasar penerapan konsep kimia, dan bahan refleksi. RPP, modul, studi kasus, proyek mini, rubrik, serta media pembelajaran yang digunakan berfungsi sebagai perangkat pendukung untuk mengimplementasikan model tersebut dalam pelatihan guru kimia.

Temuan ini sejalan dengan Hmelo-Silver (2004) yang menempatkan masalah sebagai pemicu utama proses belajar dalam PBL. Namun, dalam penelitian ini masalah yang digunakan tidak bersifat umum, melainkan dipilih berdasarkan isu perubahan iklim yang memiliki keterkaitan langsung dengan konsep kimia. Penggunaan konteks tersebut memungkinkan peserta menghubungkan konsep yang sebelumnya dipelajari secara abstrak dengan fenomena lingkungan yang mereka kenal. Hasil wawancara dan observasi yang menunjukkan meningkatnya pemahaman konseptual, kesadaran ekologis, serta partisipasi dalam diskusi mendukung interpretasi bahwa integrasi konteks perubahan iklim terjadi dalam proses belajar, bukan hanya pada materi atau contoh yang diberikan.

Dampak penerapan model PBL tercermin dari peningkatan signifikan pada kedua indikator penelitian pemahaman konsep kimia dan kesadaran terhadap perubahan iklim dengan besaran peningkatan pada kelompok eksperimen yang jauh melampaui kelompok kontrol. Temuan ini memperkuat pandangan Barrows dan Tamblyn (1980) bahwa PBL mendorong integrasi pengetahuan dengan pengalaman nyata sekaligus membangun kesadaran peserta terhadap permasalahan dunia nyata. Dari perspektif konstruktivisme sosial, peningkatan ini juga mencerminkan bahwa pembelajaran yang bermakna terjadi ketika peserta terlibat aktif dalam interaksi sosial dan pemecahan masalah otentik (Vygotsky, 1978). Perubahan sikap peserta pelatihan dari sekadar penyampai teori menjadi fasilitator yang mengaitkan kimia dengan tanggung jawab lingkungan, sebagaimana terungkap dalam wawancara, menunjukkan bahwa dampak PBL tidak terbatas pada ranah kognitif, tetapi juga afektif dan pedagogis.

Efektivitas model PBL dikonfirmasi baik secara statistik maupun kualitatif. Nilai *Adjusted R²* sebesar 0,748 menunjukkan kontribusi yang besar dari model pembelajaran terhadap peningkatan pemahaman dan kesadaran peserta, jauh melampaui proporsi yang dijelaskan oleh variabel lain di luar model. Temuan ini konsisten dengan hasil kajian yang menunjukkan bahwa pembelajaran berbasis masalah dan proyek lingkungan efektif meningkatkan pemahaman konsep sains sekaligus kesadaran ekologis peserta didik (Monroe, Plate, & Oxarart, 2019; Liarakou, Athanasiadis, & Gavrilakis, 2018). Pendekatan kontekstual semacam ini juga sejalan dengan gagasan Dewey (1916) bahwa pembelajaran akan lebih bermakna ketika dihubungkan dengan pengalaman dan persoalan nyata peserta didik. Dengan demikian, PBL yang responsif terhadap perubahan iklim terbukti menjadi strategi yang efektif dan relevan untuk diterapkan dalam pelatihan profesional guru kimia, khususnya dalam mendukung integrasi isu keberlanjutan ke dalam kurikulum kimia (Wissinger et al., 2021; Zakiah, 2020).

Temuan kualitatif memperkuat hasil kuantitatif dengan memberikan gambaran mengenai proses dan pengalaman peserta selama mengikuti Model PBL Responsif Perubahan Iklim. Peningkatan pemahaman konseptual yang terlihat pada hasil tes didukung oleh pengalaman peserta dalam menghubungkan konsep kimia dengan masalah perubahan iklim melalui proses penyelidikan dan diskusi. Demikian pula, perubahan kesadaran terhadap perubahan iklim yang terlihat pada hasil angket diperkuat oleh munculnya tema kesadaran ekologis, ketika peserta mulai memandang persoalan perubahan iklim sebagai bagian yang dapat dihubungkan dengan konsep kimia dan praktik pembelajaran. Tema transformasi peran pendidik dan efektivitas PBL selanjutnya menunjukkan bahwa peserta tidak hanya memperoleh pengetahuan baru, tetapi juga mulai melihat perubahan pada cara mereka merancang dan memfasilitasi pembelajaran. Sementara itu, tema kebutuhan modul praktis menunjukkan bahwa keberlanjutan penerapan pendekatan tersebut masih memerlukan perangkat pembelajaran yang sistematis dan mudah digunakan. Dengan demikian, temuan kualitatif berfungsi melengkapi hasil kuantitatif dengan menjelaskan bagaimana model pembelajaran bekerja dari perspektif pengalaman peserta serta faktor-faktor yang mendukung penerapannya dalam konteks pelatihan guru kimia.

Relevansi model ini juga sejalan dengan arah kebijakan Kurikulum Merdeka yang menekankan pembelajaran berdiferensiasi, kontekstual, dan berorientasi pada penguatan karakter serta kompetensi abad ke-21 seperti berpikir kritis, kreativitas, kolaborasi, dan komunikasi. Integrasi isu perubahan iklim melalui pendekatan PBL memberikan konteks nyata bagi pengembangan kompetensi tersebut, sekaligus memperkuat literasi saintifik peserta pelatihan sebagai bekal dalam merancang pembelajaran yang adaptif terhadap tantangan lingkungan global maupun tuntutan kurikulum terkini.

Konvergensi antara temuan kuantitatif dan kualitatif dalam penelitian ini memperkuat keyakinan bahwa peningkatan yang teramati bukan sekadar artefak statistik, melainkan mencerminkan perubahan substantif dalam cara peserta memahami dan menyikapi isu perubahan iklim. Data kuantitatif menunjukkan besaran dan signifikansi peningkatan, sementara data kualitatif menjelaskan mekanisme di baliknya yaitu bagaimana skenario masalah otentik dalam PBL mendorong peserta untuk secara aktif menghubungkan konsep kimia dengan pengalaman lingkungan mereka. Triangulasi kedua jenis data ini menjadi salah satu kekuatan metodologis penelitian, sekaligus memberikan gambaran yang lebih utuh mengenai dampak dan efektivitas model dibandingkan bila hanya mengandalkan salah satu pendekatan saja.

Penelitian ini memiliki sejumlah keterbatasan yang perlu diperhatikan dalam menginterpretasikan temuan. Pertama, penelitian dilaksanakan pada satu lokasi pelatihan dengan jumlah sampel yang relatif terbatas (60 peserta), sehingga generalisasi hasil ke populasi widyaiswara dan guru kimia secara nasional perlu dilakukan secara hati-hati. Kedua, pengukuran dampak dan efektivitas model dilakukan dalam rentang waktu pelatihan yang relatif singkat, sehingga belum dapat menggambarkan keberlanjutan perubahan kesadaran dan perilaku peserta dalam jangka panjang setelah kembali ke satuan kerja masing-masing. Ketiga, desain kuasi-eksperimen yang digunakan, meskipun telah melalui uji prasyarat yang memadai, tetap memiliki keterbatasan dalam mengontrol variabel luar dibandingkan desain eksperimen murni. Keterbatasan-keterbatasan ini membuka ruang bagi penelitian lanjutan dengan cakupan sampel yang lebih luas, desain longitudinal, dan replikasi pada berbagai konteks kelembagaan pelatihan keagamaan lainnya.

Secara lebih luas, temuan ini memberikan kontribusi terhadap pengembangan strategi pembelajaran inovatif dan kreatif yang berorientasi pada hasil belajar sekaligus isu keberlanjutan (Suprihatiningrum, 2023). Integrasi isu perubahan iklim ke dalam pelatihan kimia tidak hanya relevan bagi peningkatan kompetensi profesional widyaiswara dan guru, tetapi juga sejalan dengan agenda pendidikan berkelanjutan yang menempatkan lembaga pendidikan dan pelatihan sebagai agen perubahan dalam merespons krisis iklim global. Dengan demikian, model pembelajaran kimia berbasis masalah yang

responsif terhadap perubahan iklim ini berpotensi direplikasi dan diadaptasi pada program pelatihan keagamaan lain yang memiliki karakteristik peserta dan kebutuhan kontekstual serupa.

KESIMPULAN

Penelitian ini mengembangkan model pembelajaran kimia berbasis masalah (Problem-Based Learning/PBL) yang mengintegrasikan isu perubahan iklim secara konsisten ke dalam tahapan pembelajaran melalui prosedur ADDIE. Model yang dilengkapi dengan modul, studi kasus, proyek mini, dan perangkat penilaian tersebut diterapkan pada pelatihan guru kimia Madrasah Aliyah di BDK Medan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kelompok yang mengikuti model PBL mengalami peningkatan pemahaman konsep kimia serta kesadaran dan pemahaman terhadap perubahan iklim yang lebih tinggi dibandingkan kelompok kontrol. Hasil ANCOVA juga menunjukkan adanya perbedaan yang signifikan antara kedua kelompok setelah skor pretest dikendalikan ($F = 34,442$; $p < 0,001$). Temuan kualitatif mendukung hasil tersebut dengan menunjukkan bahwa masalah yang kontekstual membantu peserta menghubungkan konsep kimia dengan persoalan perubahan iklim dan mendorong keterlibatan dalam penyelidikan serta diskusi. Dengan demikian, dalam konteks pelatihan yang diteliti, model PBL responsif perubahan iklim dapat menjadi salah satu pendekatan untuk mengintegrasikan konsep kimia dengan isu perubahan iklim. Mengingat penelitian dilakukan pada satu lokasi, melibatkan jumlah peserta yang terbatas, dan berlangsung dalam waktu pelatihan yang relatif singkat, penelitian selanjutnya diperlukan untuk menguji penerapan model pada konteks yang lebih beragam dan melihat keberlanjutan hasilnya setelah pelatihan.

REFERENSI

- Andersson, K., & Shon, A. (2019). Environmental education for climate change: A framework for teaching and learning. *Journal of Environmental Education*, 50(3), 231–248. <https://doi.org/10.1080/00958964.2019.1624903>
- Arifin, Z. (2023). Pengembangan modul pembelajaran berbasis augmented reality [Development of an augmented reality-based learning module]. *Jurnal Pendidikan Informatika*, 1–10.
- Barrows, H. S., & Tamblyn, R. M. (1980). *Problem-based learning: An approach to medical education*. Springer Publishing Company.
- Creswell, J. W. (2014). *Research Design: Qualitative, Quantitative, And Mixed Methods Approaches* (4th ed.). SAGE Publications.
- Dewey, J. (1916). *Democracy and education: An introduction to the philosophy of education*. Macmillan.
- Hmelo-Silver, C. E. (2004). Problem-based learning: What and how do students learn? *Educational Psychology Review*, 16(3), 235–266. <https://doi.org/10.1023/B:EDPR.0000034022.16470.f3>
- IPCC. (2022). *Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability*. Cambridge University Press.
- Liarakou, G., Athanasiadis, I., & Gavrillakis, C. (2018). Utilizing technology to teach chemistry and environmental issues related to climate change. *International Journal of Science Education*, 40(6), 733–751. <https://doi.org/10.1080/09500693.2018.1458003>
- Minata, Z. S., Rahayu, S., & Dasna, I. W. (2022). Context-based chemistry learning: A systematic literature review. *Jurnal Pendidikan MIPA*, 1446–1463.
- Misseyanni, A., Marouli, C., & Papadopoulou, P. (2020). How teaching affects student attitudes towards the environment and sustainability in higher education: An instructors' perspective. *European Journal of Sustainable Development*, 9, 172–182.
- Monroe, M. C., Plate, R. R., & Oxarart, A. (2019). Project-based learning and student engagement in environmental education. *Environmental Education Research*, 25(4), 500–515. <https://doi.org/10.1080/13504622.2019.1567207>
- OECD. (2025). *Preparing teachers for digital education: Continuing professional learning on digital skills and pedagogies*. OECD Education Policy Perspectives, No. 122. OECD Publishing.
- Risdianto, E. (2019). Analisis pendidikan Indonesia di era Revolusi Industri 4.0 [Analysis of Indonesian education in the industrial revolution 4.0 era]. *ResearchGate*, 1–16.

- Savery, J. R. (2006). Overview of problem-based learning: Definitions and distinctions. *Interdisciplinary Journal of Problem-Based Learning*, 1(1), 9–20. <https://doi.org/10.7771/1541-5015.1002>
- Situmorang, M., Sitorus, M., Hutabarat, W., & Situmorang, Z. (2015). The development of innovative chemistry learning material for bilingual senior high school students in Indonesia. *International Education Studies*, 8(10), 72–85.
- Suprihatiningrum. (2023). *Strategi pembelajaran inovatif dan kreatif: Berorientasi pada hasil belajar* [Innovative and creative learning strategies: Oriented toward learning outcomes]. Pustaka Pelajar.
- Tjiptiany, I. (2022). Pengembangan modul pembelajaran berbasis blended learning [Development of a blended learning-based instructional module]. *Jurnal Pendidikan dan Pengajaran*, 1–12.
- Trianto. (2007). *Model pembelajaran inovatif berorientasi konstruktivistik* [Constructivist-oriented innovative learning models]. Prestasi Pustaka.
- Trilling, B., & Fadel, C. (2009). *21st century skills: Learning for life in our times*. Jossey-Bass.
- UNESCO & Education International. (2021). *Teachers have their say: Motivation, skills and opportunities to teach education for sustainable development and global citizenship*. UNESCO & Education International.
- Utami, S. (2020). Kesiapan widyaiswara kimia dalam mengintegrasikan isu perubahan iklim dalam pembelajaran [Readiness of chemistry instructors to integrate climate change issues into learning]. *Jurnal Pendidikan dan Pembelajaran*, 21(1), 103–111.
- Vygotsky, L. S. (1978). *Mind in society: The development of higher psychological processes*. Harvard University Press.
- Wissinger, J. E., Visa, A., Saha, B. B., Matlin, S. A., Mahaffy, P. G., Kümmerer, K., & Cornell, S. (2021). Integrating sustainability into learning in chemistry. *Journal of Chemical Education*, 98(4), 1061–1063. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.1c00284>
- Zakiah, K. (2020). *Pengembangan buku pengayaan kimia terintegrasi Pendidikan Pembangunan Berkelanjutan (PPB) pada isu perubahan iklim* [Development of a sustainable development education-integrated chemistry enrichment book on climate change issues]. Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah.