

BAB II

KAJIAN PUSTAKA DAN HIPOTESIS PENELITIAN

A. Kajian Pustaka

Kajian pustaka dalam penelitian ini mencakup teori-teori utama yang relevan dengan pendekatan pembelajaran STEM-PjBL (*Science, Technology, Engineering, and Mathematics*) dan kemampuan berpikir kreatif dalam konteks pembelajaran fisika materi Perubahan Iklim. Kajian ini bertujuan untuk membangun landasan teoretis yang kokoh dalam memahami variabel-variabel yang diteliti serta mendukung penyusunan kerangka berpikir dan hipotesis.

1. Pendekatan Pembelajaran STEM-PjBL (*Science, Technology, Engineering, and Mathematics – Project Based Learning*)

Pendekatan *Science, Technology, Engineering, and Mathematics – Project-Based Learning* (STEM-PjBL) merupakan strategi pembelajaran transdisipliner yang mengintegrasikan sains (*Science*), teknologi (*Technology*), rekayasa (*Engineering*), dan matematika (*Mathematics*) ke dalam kerangka pembelajaran berbasis proyek untuk memecahkan masalah dunia nyata secara autentik. Lin et al. (2021) menjelaskan bahwa STEM menuntut peserta didik memadukan proses desain rekayasa meliputi definisi masalah, pemodelan, dan analisis kelayakan dengan disiplin ilmu lain guna menghadapi tantangan kontekstual yang tidak dapat diselesaikan melalui satu bidang ilmu saja.

Model *Project-Based Learning* (PjBL) yang menjadi basis STEM-PjBL didefinisikan sebagai "*ill-defined task with a well-defined outcome*",

yaitu tugas yang bersifat terbuka namun diarahkan pada capaian pembelajaran yang jelas melalui pendekatan *backward design* (Capraro et al., 2013). Peserta didik dalam model ini terlibat aktif dalam proses investigasi, perancangan, dan produksi solusi atas permasalahan autentik yang relevan dengan kehidupan nyata. Integrasi *PjBL* ke dalam pendekatan *STEM* umumnya mengadopsi sintaks lima tahap yang dikembangkan oleh (Laboy-Rush, 2011), yaitu: (1) *Reflection*, tahap yang membawa peserta didik ke dalam konteks masalah dan memberikan inspirasi untuk mulai melakukan investigasi; (2) *Research*, tahap yang memfasilitasi peserta didik melakukan penelitian mandiri, mengkaji konsep sains, dan mengumpulkan informasi dari sumber yang relevan; (3) *Discovery*, tahap penemuan yang menjembatani hasil *research* dengan penyusunan solusi awal secara kolaboratif; (4) *Application*, tahap pengujian dan penerapan solusi yang telah dirancang untuk memecahkan masalah yang diajukan; serta (5) *Communication*, tahap presentasi dan pertanggungjawaban hasil proyek kepada audiens. Kelima tahap tersebut selanjutnya diadaptasi oleh peneliti ke dalam istilah operasional *Reflection*, *Research*, *Design*, *Prototype*, dan *Communication* sebagaimana dijelaskan pada bagian metode penelitian, untuk disesuaikan dengan konteks pengembangan dan implementasi *EduPhy-AI* dalam pembelajaran perubahan iklim.

Roslina et al. (2022) dalam studi literatur sistematisnya menegaskan bahwa integrasi STEM-PjBL memberikan dampak positif yang luas terhadap aspek kognitif, keterampilan proses, dan sikap siswa. Dalam

pembelajaran fisika secara khusus, implementasi STEM-PjBL membantu siswa memahami konsep abstrak melalui aplikasi praktis berbasis proyek nyata. Mahombar. A et al. (2023) menjelaskan bahwa pendekatan ini memberi ruang bagi siswa untuk bereksperimen dan berinovasi, yang secara langsung menstimulasi proses kognitif tingkat tinggi serta mengasah kemampuan berpikir kreatif siswa; penelitian tersebut bahkan melaporkan nilai *effect size STEM-PjBL* terhadap kemampuan berpikir kreatif mencapai 3,49, jauh melampaui ambang batas efek besar menurut standar Cohen.

Temuan tersebut diperkuat oleh meta-analisis terbaru Kwon & Lee (2025) terhadap delapan studi dengan tiga belas *effect size*, yang menyimpulkan bahwa STEM-PjBL berpengaruh positif signifikan terhadap kreativitas siswa dengan *effect size* sebesar 3,888. Konsistensi temuan lintas meta-analisis tersebut menempatkan STEM-PjBL sebagai salah satu pendekatan pembelajaran yang berpengaruh dalam riset pendidikan sains kontemporer untuk mengatasi persoalan rendahnya kemampuan berpikir kreatif siswa.

Efektivitas *STEM-PjBL* turut dikonfirmasi melalui sejumlah studi eksperimental pada konteks yang beragam. Baran et al. (2021) menemukan bahwa penerapan pendekatan *Project-Based STEM* pada siswa kelas 10 secara signifikan meningkatkan otonomi, kerja sama, dan kepekaan lingkungan siswa. Muzana et al. (2021) melaporkan bahwa model E-STEM *Project-Based Learning* efektif meningkatkan literasi TIK dan kemampuan pemecahan masalah siswa kelas VIII. Lin et al. (2021) menunjukkan bahwa

integrasi proses desain teknik ke dalam STEM-PjBL mengembangkan skema desain calon guru teknologi, khususnya pada aspek definisi masalah, pemodelan, dan analisis kelayakan. Rangkaian temuan tersebut menegaskan bahwa STEM-PjBL secara konsisten memberikan dampak positif tidak hanya terhadap kreativitas, tetapi juga terhadap keterampilan abad ke-21 secara lebih luas pada jenjang pendidikan dasar dan menengah.

2. Materi Perubahan Iklim dan Pemanasan Global dalam Kurikulum Fisika

Materi perubahan iklim dan pemanasan global merupakan salah satu materi fisika yang memiliki karakteristik kontekstual, multidisiplin, dan berorientasi pada penyelesaian permasalahan nyata. Materi ini membahas perubahan kondisi iklim bumi dalam jangka panjang akibat peningkatan konsentrasi gas rumah kaca yang dipengaruhi oleh aktivitas manusia maupun proses alam. Dalam pembelajaran fisika, materi perubahan iklim tidak hanya mencakup pemahaman mengenai kenaikan suhu rata-rata permukaan bumi, tetapi juga mengintegrasikan berbagai konsep fundamental, seperti suhu, kalor, perpindahan kalor, radiasi elektromagnetik, efek rumah kaca (*greenhouse effect*), keseimbangan energi bumi (*Earth's energy balance*), serta hubungan antara energi Matahari dengan atmosfer bumi. Keterkaitan berbagai konsep tersebut menyebabkan perubahan iklim menjadi salah satu materi yang menuntut kemampuan peserta didik untuk menghubungkan berbagai konsep fisika secara terpadu dalam menjelaskan fenomena yang terjadi di lingkungan.

Pemahaman ilmiah mengenai mekanisme tersebut merujuk pada konsensus internasional yang disusun oleh Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), khususnya terkait keseimbangan energi bumi (*Earth's energy budget*) dan sensitivitas iklim terhadap peningkatan konsentrasi gas rumah kaca (IPCC, 2021). Data pemantauan jangka panjang turut menunjukkan bahwa konsentrasi CO₂ atmosfer global terus mengalami peningkatan dari tahun ke tahun (Lan et al., 2026), sehingga materi ini relevan diajarkan berdasarkan data ilmiah yang aktual, bukan sekadar konsep teoretis.

Karakteristik materi perubahan iklim berbeda dengan materi fisika yang hanya berorientasi pada penyelesaian persoalan matematis. Sistem iklim merupakan sistem kompleks yang dipengaruhi oleh interaksi berbagai variabel, seperti konsentrasi karbon dioksida (CO₂), metana (CH₄), *radiative forcing*, perubahan tutupan lahan, aktivitas industri, serta berbagai mekanisme umpan balik (*feedback mechanism*) yang saling memengaruhi secara dinamis. Kompleksitas tersebut menyebabkan hubungan sebab-akibat dalam sistem iklim tidak selalu dapat diamati secara langsung sehingga peserta didik memerlukan representasi visual maupun simulasi ilmiah untuk memahami bagaimana perubahan suatu parameter memengaruhi kondisi iklim secara keseluruhan.

Pendidikan perubahan iklim dalam beberapa tahun terakhir tidak lagi dipandang sekadar sebagai sarana penyampaian konsep-konsep ilmiah mengenai pemanasan global, tetapi juga sebagai wahana untuk membentuk

kemampuan peserta didik dalam mengambil keputusan terhadap berbagai persoalan lingkungan. Trott et al. (2023) melalui kajian sistematis menjelaskan bahwa pembelajaran perubahan iklim selama ini masih didominasi oleh penyampaian konsep-konsep ilmiah, seperti efek rumah kaca dan siklus karbon, sedangkan aspek *climate justice*, pengambilan keputusan, serta tindakan nyata terhadap permasalahan perubahan iklim masih relatif jarang diintegrasikan dalam proses pembelajaran. Padahal, pendidikan perubahan iklim diharapkan mampu mengembangkan kemampuan peserta didik dalam mengevaluasi berbagai alternatif solusi berdasarkan bukti ilmiah sehingga pembelajaran tidak berhenti pada penguasaan konsep, tetapi juga membentuk kesadaran dan tanggung jawab terhadap keberlanjutan lingkungan.

Integrasi pendidikan perubahan iklim ke dalam kurikulum sekolah juga menjadi perhatian berbagai negara sebagai bagian dari pengembangan *Education for Sustainable Development* (ESD). Mhlongo (2024) menjelaskan bahwa perubahan iklim merupakan isu global yang memerlukan integrasi lintas disiplin ilmu sehingga pembelajarannya perlu diimplementasikan secara sistematis dalam kurikulum sekolah. Hasil kajian tersebut menunjukkan bahwa berbagai negara telah mengembangkan pendidikan perubahan iklim melalui integrasi sains, teknologi, lingkungan, dan kebijakan publik untuk meningkatkan *climate literacy*, kesadaran lingkungan, serta kemampuan peserta didik dalam menghadapi tantangan perubahan iklim di masa depan. Integrasi tersebut menegaskan bahwa

pembelajaran perubahan iklim tidak hanya bertujuan meningkatkan penguasaan konsep ilmiah, tetapi juga membangun kemampuan berpikir kritis, pengambilan keputusan, dan partisipasi aktif peserta didik dalam menyelesaikan berbagai persoalan lingkungan.

Karakteristik materi perubahan iklim yang mengintegrasikan berbagai disiplin ilmu menjadikan materi ini sangat sesuai diterapkan melalui pendekatan *Science, Technology, Engineering, and Mathematics* (STEM). Solihah et al. (2024) menunjukkan bahwa integrasi STEM dengan *Education for Sustainable Development* (ESD) pada materi pemanasan global mampu menghubungkan konsep-konsep fisika, seperti suhu, kalor, dan efek rumah kaca, dengan permasalahan lingkungan yang nyata. Melalui pendekatan tersebut, peserta didik tidak hanya memperoleh pemahaman konseptual mengenai mekanisme perubahan iklim, tetapi juga didorong untuk merancang alternatif solusi yang mempertimbangkan aspek ilmiah, teknologi, sosial, dan keberlanjutan lingkungan. Dengan demikian, pembelajaran perubahan iklim menjadi lebih bermakna karena menghubungkan konsep fisika dengan persoalan yang dihadapi masyarakat.

Efektivitas penerapan *STEM* pada materi perubahan iklim semakin diperkuat melalui implementasi *Project-Based Learning*. Hafitri & Efwinda (2024) melaporkan bahwa penerapan *STEM-Project Based Learning* (STEM-PjBL) pada materi pemanasan global mampu meningkatkan hasil belajar dan keterampilan proses sains peserta didik secara signifikan melalui kegiatan penyelidikan ilmiah, analisis data, dan pengembangan proyek

mitigasi perubahan iklim. Kegiatan tersebut memberikan kesempatan kepada peserta didik untuk mengidentifikasi permasalahan, mengumpulkan informasi, merancang solusi, melakukan pengujian, serta mengevaluasi hasil berdasarkan data ilmiah sehingga pembelajaran menjadi lebih kontekstual dan bermakna.

3. Kemampuan Berpikir Kreatif

Berpikir kreatif merupakan kompetensi esensial abad ke-21 yang memungkinkan siswa menghasilkan ide-ide baru dan orisinal dalam pemecahan masalah. Konsep berpikir kreatif dalam penelitian ini merujuk pada teori Torrance (1974, dalam Alabbasi et al. (2022), yang menyatakan bahwa kemampuan berpikir kreatif dapat diukur melalui skor pada beberapa dimensi kognitif yang menggambarkan proses berpikir divergen individu. Definisi tersebut sejalan dengan pendapat Munandar (2014) yang mendefinisikan berpikir kreatif sebagai kemampuan seseorang untuk menemukan ide, gagasan, atau solusi baru dalam menyelesaikan suatu permasalahan.

Berdasarkan teori Torrance (1974, dalam Alabbasi et al. (2022) yang diperkuat oleh Munandar (2014), kemampuan berpikir kreatif diukur melalui empat indikator utama:

- a. Kelancaran (*Fluency*): Kemampuan mencetuskan banyak ide atau solusi yang relevan secara cepat.
- b. Keluwesan (*Flexibility*): Kemampuan menghasilkan gagasan yang bervariasi dari sudut pandang berbeda.

- c. Keaslian (*Originality*): Kemampuan menciptakan gagasan yang unik dan baru.
- d. Elaborasi (*Elaboration*): Kemampuan memperinci ide hingga menjadi lebih fungsional dan terstruktur.

Keempat indikator tersebut menjadi dasar penyusunan instrumen tes dalam penelitian ini untuk mengukur kemampuan berpikir kreatif siswa dalam merancang solusi terhadap permasalahan fisika terkait isu perubahan iklim dan pemanasan global. Torrance (1974, dalam Alabbasi et al., 2022) menjelaskan bahwa *fluency* diukur dari jumlah ide relevan dan dapat diinterpretasikan yang dihasilkan sebagai respons terhadap suatu stimulus, sedangkan *flexibility* diukur dari jumlah kategori berbeda dari ide-ide yang dihasilkan. Adapun *originality* dinilai berdasarkan kelangkaan statistik suatu respons dibandingkan respons umum lainnya, dan *elaboration* diukur dari jumlah detail yang ditambahkan pada suatu ide dasar. Keempat konsep tersebut konsisten dengan pandangan Munandar (2014) yang menyebutnya sebagai keterampilan berpikir lancar, luwes, orisinal, dan memperinci.

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa pembelajaran berbasis *STEM* berdampak positif terhadap perkembangan indikator berpikir kreatif siswa. Khalil et al. (2023) menemukan bahwa dampak signifikan kurikulum berbasis *STEM* pada indikator *fluency*, *flexibility*, dan *originality* mengindikasikan bahwa siswa yang terpapar pendidikan *STEM* menunjukkan peningkatan kemampuan dalam menghasilkan banyak ide (*fluency*), berpikir divergen dengan mempertimbangkan berbagai perspektif

(*flexibility*), serta menghasilkan ide yang baru dan unik (*originality*). Selain itu, Qadafi. M et al. (2022) menjelaskan bahwa tahapan rekayasa (*Engineering*) dalam STEM-PjBL memberikan kesempatan bagi siswa untuk melakukan desain dan redesain, yang merupakan inti dari pengembangan kreativitas. Beberapa penelitian terdahulu juga menunjukkan bahwa pembelajaran yang melibatkan aktivitas rekayasa dan pemecahan masalah nyata efektif menstimulasi kemampuan berpikir kreatif siswa, dengan effect size yang tergolong tinggi (Mahombar. A et al., 2023; Roslina et al., 2022).

4. *Large Language Model (LLM)* untuk Pendidikan

Large Language Model (LLM) adalah model kecerdasan buatan berbasis arsitektur Transformer yang dilatih pada korpus teks skala besar untuk memahami dan menghasilkan bahasa alami. Dalam konteks pendidikan, LLM dimanfaatkan sebagai agen dialog interaktif yang mampu memberikan penjelasan, umpan balik, dan bimbingan belajar secara adaptif kepada siswa (Kasneci et al., 2023).

LLM dalam aplikasi simulasi EduPhy-AI berperan sebagai asisten tutor virtual yang dapat merespons pertanyaan siswa seputar fenomena fisika Perubahan Iklim secara kontekstual dan ilmiah. Kemampuan LLM dalam memproses bahasa alami memungkinkan interaksi yang natural antara siswa dan sistem simulasi, sehingga mendukung proses eksplorasi konsep secara mandiri dan mendorong munculnya pertanyaan-pertanyaan

kritis (Kasneci et al., 2023; Wang & Li, 2026), yang pada gilirannya berpotensi menstimulasi kemampuan berpikir kreatif peserta didik.

5. Kecerdasan Buatan atau *Artificial Intelligence* (AI) untuk Pendidikan

Kecerdasan Buatan (*Artificial Intelligence/AI*) dalam pendidikan merupakan penerapan teknologi komputasi yang mampu mensimulasikan proses berpikir manusia untuk mendukung kegiatan belajar melalui personalisasi pembelajaran, pemberian umpan balik adaptif, analisis perkembangan belajar, serta penyediaan bantuan belajar secara real-time. Perkembangan AI generatif dan Large Language Models (LLMs) telah memperluas peran AI dari sekadar sistem otomatis menjadi pendamping belajar (*Intelligent Learning Companion*) yang mampu memberikan penjelasan konseptual, menjawab pertanyaan, serta menyesuaikan respons sesuai kebutuhan peserta didik (Kasneci et al., 2023; Almasri, 2024).

Dalam konteks penelitian ini, integrasi *AI* pada media pembelajaran *EduPhy-AI* bertujuan membangun lingkungan belajar yang interaktif dan responsif selama implementasi *STEM-PjBL*. *AI Tutor* tidak berfungsi sebagai pengganti guru, melainkan sebagai *learning assistant* yang memberikan penjelasan konsep, pertanyaan pemantik (*scaffolding questions*), umpan balik langsung terhadap hasil investigasi, serta membantu peserta didik merefleksikan keputusan yang diambil selama proses penyelesaian proyek. Pendekatan tersebut sejalan dengan perkembangan pemanfaatan AI dalam pendidikan yang menekankan personalisasi pembelajaran, peningkatan keterlibatan peserta didik, dan

dukungan terhadap pengembangan keterampilan berpikir tingkat tinggi, termasuk kreativitas dan pemecahan masalah (Almasri, 2024; Wang & Li, 2026).

6. Metode Iterasi *Runge-Kutta Orde 4* (RK4) untuk Aplikasi Simulasi Fisika

Runge–Kutta Orde Empat (RK4) merupakan metode numerik eksplisit orde empat yang banyak digunakan untuk memperoleh solusi aproksimasi persamaan diferensial biasa (*Ordinary Differential Equations/ODE*) dengan tingkat akurasi dan stabilitas yang tinggi. Metode ini dikembangkan untuk menyelesaikan masalah nilai awal (*initial value problem*) melalui perhitungan kemiringan (slope) pada beberapa titik dalam setiap langkah iterasi sehingga mampu menghasilkan galat numerik yang lebih kecil dibandingkan metode numerik orde rendah seperti metode Euler (Kartono, 2012). Menurut Workineh et al. (2024), RK4 memiliki galat pemotongan lokal sebesar $O(h^5)$ dan galat global sebesar $O(h^4)$, sehingga memberikan keseimbangan yang baik antara akurasi, stabilitas, dan efisiensi komputasi dalam penyelesaian sistem persamaan diferensial. Karakteristik tersebut menjadikan RK4 sebagai salah satu metode numerik yang banyak diterapkan pada berbagai pemodelan dinamis, termasuk simulasi sistem fisis dan lingkungan menggunakan metode berbasis Runge-Kutta, seperti pada pemodelan siklus karbon dan Earth System Model (Choi & Manousiouthakis, 2022; Fernández Villanueva & Shaffer, 2025), yang secara metodologis merujuk pada penerapan umum metode *Runge-Kutta*

orde 4 untuk penyelesaian sistem persamaan diferensial biasa (Hetmaniok & Pleszczyński, 2022).

Adapun formula iterasi *Runge-Kutta Orde 4* secara lengkap adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 k_1 &= f(t_n, y_n) \\
 k_2 &= f\left(t_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{h}{2} \cdot k_1\right) \\
 k_3 &= f\left(t_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{h}{2} \cdot k_2\right) \\
 k_4 &= f(t_n + h, y_n + h \cdot k_3) \\
 y_{n+1} &= y_n + \frac{h}{6} (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)
 \end{aligned}$$

Keterangan:

t_n : nilai waktu/variabel independen pada langkah ke-n

y_n : nilai aproksimasi solusi pada langkah ke-n

h : ukuran langkah iterasi (*step size*)

k_1 : kemiringan (*slope*) di awal *interval*

k_2 : kemiringan di tengah *interval* menggunakan k_1

k_3 : kemiringan di tengah *interval* menggunakan k_2

k_4 : kemiringan di akhir *interval* menggunakan k_3

y_{n+1} : nilai aproksimasi solusi pada langkah berikutnya

Pada persamaan tersebut, nilai k_2 dan k_3 diberikan bobot dua kali lebih besar dibandingkan k_1 dan k_4 . Pembobotan ini bertujuan agar estimasi kemiringan pada bagian tengah interval memperoleh kontribusi yang lebih dominan karena dianggap lebih representatif terhadap perubahan fungsi

sepanjang satu langkah iterasi, sehingga menghasilkan aproksimasi solusi yang lebih akurat (Kartono, 2012; Workineh et al., 2024).

Pada penelitian ini, *Runge–Kutta* Orde Empat (RK4) digunakan sebagai *engine* perhitungan numerik pada aplikasi *EduPhy-AI* untuk menyelesaikan sistem persamaan diferensial yang merepresentasikan dinamika efek rumah kaca, siklus karbon, dan perubahan suhu global. Pemilihan RK4 didasarkan pada kemampuannya menghasilkan solusi numerik yang akurat dengan galat yang relatif kecil serta stabil untuk simulasi dinamis, sehingga hasil simulasi yang ditampilkan kepada peserta didik tetap konsisten dengan model matematis yang digunakan, sebagaimana metode Runge-Kutta secara umum diterapkan untuk menyelesaikan sistem persamaan diferensial secara numerik (Hetmaniok & Pleszczyński, 2022; Workineh et al., 2024), dan mampu merepresentasikan fenomena perubahan iklim secara lebih ilmiah (Choi & Manousiouthakis, 2022; Fernández Villanueva & Shaffer, 2025).

7. *Stochastic Event, Feedback Loop dan Tipping Point*

Stochastic event (kejadian stokastik) dalam konteks perubahan iklim merujuk pada peristiwa-peristiwa iklim yang bersifat acak dan probabilistik, seperti *El Niño*, badai ekstrem, atau kekeringan mendadak. Pemodelan stokastik dalam simulasi memungkinkan representasi yang lebih realistis dari ketidakpastian sistem iklim bumi, sehingga siswa dapat memahami bahwa fenomena iklim tidak selalu bersifat deterministik (Farahbakhsh et al., 2024).

Feedback loop (lingkaran umpan balik) merupakan mekanisme di mana output dari suatu proses menjadi input yang memengaruhi proses itu sendiri. Dalam sistem iklim, *feedback loop* positif (seperti efek albedo es laut) memperkuat perubahan yang terjadi, sedangkan *feedback loop* negatif (seperti peningkatan tutupan awan) dapat meredam perubahan (Farahbakhsh et al., 2024; Lenton et al., 2008). *Tipping point* adalah ambang kritis di mana sistem iklim mengalami perubahan mendadak dan tidak dapat balik (*irreversible*), seperti mencairnya lapisan es Greenland atau hilangnya hutan Amazon. Pemahaman terhadap ketiga konsep ini melatih siswa untuk berpikir sistemik dan kreatif dalam merancang solusi mitigasi iklim yang berkelanjutan (Lenton et al., 2008).

8. Hubungan *Large Language Model*, Kecerdasan Buatan (AI), Metode Iterasi *Runge-Kutta* Orde 4, *Stochastic Event*, *Feedback Loop* dan *Tipping Point* pada Aplikasi Simulasi Fisika pada materi Perubahan Iklim dan Pemanasan Global untuk Pendidikan dan Kemampuan Berpikir Kreatif.

Aplikasi simulasi virtual EduPhy-AI dikembangkan sebagai suatu ekosistem pembelajaran yang mengintegrasikan pendekatan STEM-PjBL dengan teknologi kecerdasan buatan dan pemodelan numerik sehingga mampu merepresentasikan fenomena perubahan iklim secara ilmiah sekaligus mendukung proses pembelajaran yang interaktif. Pada lapisan komputasi, simulasi menggunakan metode *Runge–Kutta* Orde Empat (RK4) sebagai *numerical engine* untuk menyelesaikan sistem persamaan

diferensial yang memodelkan dinamika efek rumah kaca, siklus karbon, dan perubahan suhu global. RK4 dipilih karena memiliki tingkat akurasi yang baik, galat numerik yang kecil, serta stabilitas yang baik dalam menyelesaikan sistem dinamis, sehingga hasil simulasi tetap konsisten dengan model matematis yang digunakan (Hetmaniok & Pleszczyński, 2022; Kartono, 2012; Workineh et al., 2024). Penerapan RK4 dalam pemodelan sistem iklim juga telah digunakan pada simulasi dinamika siklus karbon dan *Earth System Model* sehingga mampu merepresentasikan perubahan iklim secara lebih realistis (Choi & Manousiouthakis, 2022; Fernández Villanueva & Shaffer, 2025).

Untuk meningkatkan realisme simulasi, model tersebut dipadukan dengan konsep *stochastic event*, *feedback loop*, dan *tipping point*. *Stochastic event* digunakan untuk merepresentasikan ketidakpastian kejadian iklim ekstrem yang bersifat probabilistik, sedangkan *feedback loop* menggambarkan hubungan timbal balik antarkomponen sistem iklim yang dapat memperkuat maupun melemahkan perubahan yang terjadi. Konsep *tipping point* digunakan untuk menunjukkan adanya ambang kritis ketika sistem iklim mengalami perubahan yang cepat dan sulit dipulihkan. Integrasi ketiga konsep tersebut memungkinkan peserta didik memahami bahwa perubahan iklim merupakan sistem kompleks yang dipengaruhi oleh interaksi berbagai variabel, bukan hubungan sebab-akibat yang bersifat linier (Farahbakhsh et al., 2024; Lenton et al., 2008).

Pada lapisan pedagogis, simulasi didukung oleh *Artificial Intelligence (AI)* dan *Large Language Model (LLM)* yang berfungsi sebagai *intelligent learning assistant*. *AI* memanfaatkan data interaksi peserta didik untuk memberikan umpan balik adaptif, menyesuaikan tingkat kesulitan skenario, serta mendukung personalisasi pembelajaran, sedangkan *LLM* memfasilitasi dialog ilmiah, memberikan penjelasan konseptual, mengajukan pertanyaan pemantik (*scaffolding questions*), dan membantu peserta didik merefleksikan hasil investigasi selama proses pembelajaran. Integrasi *AI* dan *LLM* tidak dimaksudkan untuk menggantikan peran guru, tetapi sebagai pendamping belajar yang mampu meningkatkan keterlibatan peserta didik, memperkuat pemahaman konsep, serta mendukung pembelajaran yang lebih personal dan interaktif (Kasneci et al., 2023; Wang & Li, 2026).

Integrasi RK4, pemodelan sistem iklim, *AI*, dan *LLM* selanjutnya diimplementasikan dalam sintaks *STEM-Project Based Learning (STEM-PjBL)* melalui aplikasi *EduPhy-AI*. Peserta didik tidak hanya mengamati hasil simulasi, tetapi juga mengeksplorasi berbagai skenario perubahan parameter, menganalisis hubungan sebab-akibat dalam sistem iklim, merancang alternatif solusi mitigasi, serta mengevaluasi dampak keputusan yang diambil berdasarkan hasil simulasi. Aktivitas tersebut memberikan kesempatan kepada peserta didik untuk melakukan eksplorasi, investigasi, desain, dan refleksi secara mandiri sehingga selaras dengan karakteristik

pembelajaran STEM-PjBL yang berorientasi pada pemecahan masalah autentik (Capraro et al., 2013; Laboy-Rush, 2011).

Sinergi antara pemodelan numerik RK4, representasi sistem iklim yang kompleks, AI, LLM, dan pendekatan STEM-PjBL secara konseptual berpotensi mengembangkan keempat indikator kemampuan berpikir kreatif menurut Torrance (1974, dalam Alabbasi et al. 2022), yaitu *fluency*, *flexibility*, *originality*, dan *elaboration*. *Fluency* berkembang ketika peserta didik mengeksplorasi berbagai kemungkinan skenario perubahan iklim melalui simulasi. *Flexibility* muncul ketika peserta didik membandingkan berbagai alternatif penyelesaian berdasarkan sudut pandang ilmiah yang berbeda. *Originality* berkembang melalui perancangan solusi mitigasi yang inovatif terhadap permasalahan perubahan iklim, sedangkan *elaboration* terlatih ketika peserta didik memperinci rancangan solusi menjadi produk atau proyek berbasis STEM yang dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah. Hubungan tersebut sejalan dengan temuan bahwa STEM-PjBL memberikan pengaruh positif terhadap pengembangan kreativitas peserta didik melalui aktivitas desain, investigasi, dan pemecahan masalah nyata (Khalil et al., 2023; Kwon & Lee, 2025; Mahombar. A et al., 2023; Roslina et al., 2022).

9. Penelitian Terdahulu

Beberapa penelitian terdahulu yang relevan dengan penelitian ini disajikan pada Tabel 2.1 berikut.

Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu

No	Peneliti/Tahun	Metode	Hasil Utama	Research Gap	Posisi EduPhy-AI
1	Muzana et al. (2021)	<i>Quasi Experiment</i>	E-STEM <i>Project-Based Learning</i> meningkatkan literasi TIK dan kemampuan pemecahan masalah siswa.	Pembelajaran masih berpusat pada proyek tanpa simulasi virtual yang mampu memvisualisasikan fenomena fisika secara dinamis.	Mengintegrasikan simulasi virtual berbasis AI sehingga siswa dapat mengeksplorasi berbagai skenario perubahan iklim secara interaktif.
2	Rohman et al. (2024)	<i>One Group Pretest-Posttest</i>	Ethnoecological STEM-PjBL meningkatkan kreativitas, berpikir kritis, dan penguasaan konsep sains.	Aktivitas proyek masih terbatas pada konteks lokal dan belum mampu merepresentasikan sistem iklim global yang kompleks.	Menyediakan simulasi perubahan iklim skala global yang dapat dimanipulasi secara <i>real-time</i> .
3	Wu et al. (2023)	<i>Epistemic Network Analysis</i>	Keberhasilan proyek STEM dipengaruhi kualitas eksplorasi ide dan proses pemecahan masalah.	Penelitian berfokus pada analisis proses berpikir tanpa menyediakan media yang memungkinkan eksplorasi parameter secara berulang.	Memberikan lingkungan simulasi yang memungkinkan eksplorasi berbagai kombinasi parameter iklim secara bebas.
4	Othman et al. (2022)	<i>Case Study</i>	Modul <i>Creative Teaching</i> STEM meningkatkan komunikasi dan pemecahan masalah siswa.	Aktivitas pembelajaran masih bergantung pada eksperimen fisik sehingga memerlukan waktu dan sumber daya yang besar.	Menghadirkan simulasi virtual yang memungkinkan investigasi ilmiah lebih efisien tanpa mengurangi pengalaman eksplorasi.
5	Septiadevana & Abdullah (2024)	<i>Design and Development Research</i>	Guru membutuhkan modul STEM-PjBL terutama untuk materi yang bersifat abstrak.	Penelitian hanya mengidentifikasi kebutuhan guru tanpa menawarkan solusi pembelajaran berbasis teknologi.	Mengembangkan media simulasi virtual berbasis AI untuk menjembatani konsep abstrak perubahan iklim.

6	Kwon & Lee (2025)	<i>Meta-analysis</i>	STEM-PjBL secara konsisten meningkatkan kreativitas siswa melalui aktivitas desain dan pemecahan masalah autentik.	Belum terdapat integrasi AI adaptif, simulasi numerik, dan visualisasi dinamis dalam implementasi STEM-PjBL.	Mengintegrasikan AI, simulasi RK4, dan proyek STEM dalam satu ekosistem pembelajaran.
7	Setiawan et al. (2025)	<i>Quasi Experiment</i>	STEM-PjBL meningkatkan <i>Higher Order Thinking Skills</i> pada pembelajaran kimia SMA.	Eksperimen masih didominasi aktivitas laboratorium konvensional yang sulit merepresentasikan fenomena global.	Memungkinkan eksperimen virtual terhadap perubahan suhu bumi dan emisi karbon yang tidak dapat dilakukan di laboratorium sekolah.
8	Chang & Chen (2022)	<i>Mixed Methods</i>	Siswa kerap menghadapi tantangan pada aspek teknis yang menuntut pemahaman konsep baru, seperti pemrograman, tanpa dukungan bimbingan tambahan yang memadai	Belum tersedia sistem pembelajaran adaptif yang mampu memberikan umpan balik secara real-time.	AI dan LLM memberikan scaffolding adaptif melalui umpan balik personal selama proses investigasi.
9	Baran et al. (2021)	<i>Quasi Experiment</i>	STEM-PjBL meningkatkan kreativitas serta keterampilan abad ke-21 siswa.	Pengembangan kreativitas belum didukung visualisasi fenomena kompleks yang dapat dieksplorasi secara multirepresentatif.	Menyajikan visualisasi simultan berupa animasi, grafik, dan data numerik untuk memperkuat kreativitas ilmiah siswa.
10	Vistara et al. (2022)	<i>Systematic Literature Review</i>	Integrasi <i>Engineering Design Process</i> dalam STEM-PjBL berpotensi meningkatkan	Kajian masih bersifat konseptual dan belum menghasilkan media pembelajaran	Merealisasikan rekomendasi tersebut melalui pengembangan EduPhy-AI sebagai media

	kemampuan berpikir kreatif.	adaptif berbasis teknologi.	STEM-PjBL berbasis AI.
--	--------------------------------	--------------------------------	---------------------------

Kajian terhadap sepuluh penelitian terdahulu pada Tabel 2.1 menunjukkan bahwa pendekatan STEM-PjBL telah terbukti efektif dalam meningkatkan berbagai kompetensi abad ke-21, seperti kreativitas, berpikir kritis, pemecahan masalah, literasi teknologi, dan penguasaan konsep. Namun demikian, sintesis terhadap metode, konteks, serta teknologi yang digunakan mengungkap lima kesenjangan penelitian utama yang hingga kini masih belum terjawab secara komprehensif.

- a. Pertama, sebagian besar penelitian masih menerapkan STEM-PjBL melalui proyek konvensional, modul pembelajaran, atau media yang bersifat statis sehingga belum mampu memvisualisasikan fenomena fisika yang kompleks secara dinamis dan interaktif (Muzana et al., 2021; Septiadevana & Abdullah, 2024; Vistara et al., 2022). Akibatnya, peserta didik belum memperoleh kesempatan untuk mengeksplorasi perubahan parameter ilmiah secara langsung.
- b. Kedua, implementasi STEM-PjBL masih didominasi eksperimen laboratorium atau proyek berskala lokal (Rohman et al., 2024; Setiawan et al., 2025). Pendekatan tersebut sulit merepresentasikan fenomena perubahan iklim yang berlangsung pada sistem bumi dengan karakteristik nonlinier, multidimensi, dan berskala global.
- c. Ketiga, meskipun beberapa penelitian menekankan pentingnya eksplorasi ide dan kreativitas, media pembelajaran yang digunakan belum memberikan keleluasaan bagi peserta didik untuk memanipulasi variabel

ilmiah secara berulang, cepat, dan aman sehingga proses investigasi ilmiah masih terbatas (Othman et al., 2022; Wu et al., 2023).

- d. Keempat, penelitian mengenai STEM-PjBL juga menunjukkan bahwa siswa kerap menghadapi tantangan pada aspek teknis yang menuntut pemahaman konsep baru, seperti pemrograman, tanpa dukungan bimbingan tambahan yang memadai (Chang & Chen, 2022). Hingga saat ini, pemanfaatan *Artificial Intelligence* dan *Large Language Model* sebagai tutor adaptif yang mampu memberikan umpan balik secara *real-time* masih sangat terbatas.
- e. Kelima, berbagai penelitian telah membuktikan efektivitas STEM-PjBL maupun *Engineering Design Process* dalam meningkatkan kreativitas (Baran et al., 2021; Kwon & Lee, 2025), namun belum terdapat penelitian yang mengintegrasikan simulasi numerik berbasis *Runge-Kutta* Orde 4 (RK4), pemodelan *stochastic event*, *feedback loop*, *tipping point*, serta *Artificial Intelligence* dan *Large Language Model* ke dalam satu ekosistem pembelajaran STEM-PjBL pada materi perubahan iklim dan pemanasan global.

Hasil research gap dari lima kriteria dari penelitian terdahulu, penelitian ini mengembangkan *EduPhy-AI*, yaitu media pembelajaran berbasis *STEM-PjBL* yang mengintegrasikan simulasi numerik *RK4*, pemodelan sistem iklim, *Artificial Intelligence*, dan *Large Language Model* dalam satu platform interaktif. Integrasi tersebut memungkinkan peserta didik melakukan eksperimen virtual terhadap parameter iklim global secara *real-time*,

memperoleh *scaffolding* adaptif melalui *AI*, serta menginterpretasikan hasil simulasi dalam bentuk visual, grafik, dan numerik secara simultan. Dengan demikian, *EduPhy-AI* tidak hanya mengisi kesenjangan teknologi pada penelitian sebelumnya, tetapi juga menawarkan pendekatan pembelajaran yang lebih komprehensif untuk mengembangkan kemampuan berpikir kreatif peserta didik.

B. Kerangka Berpikir

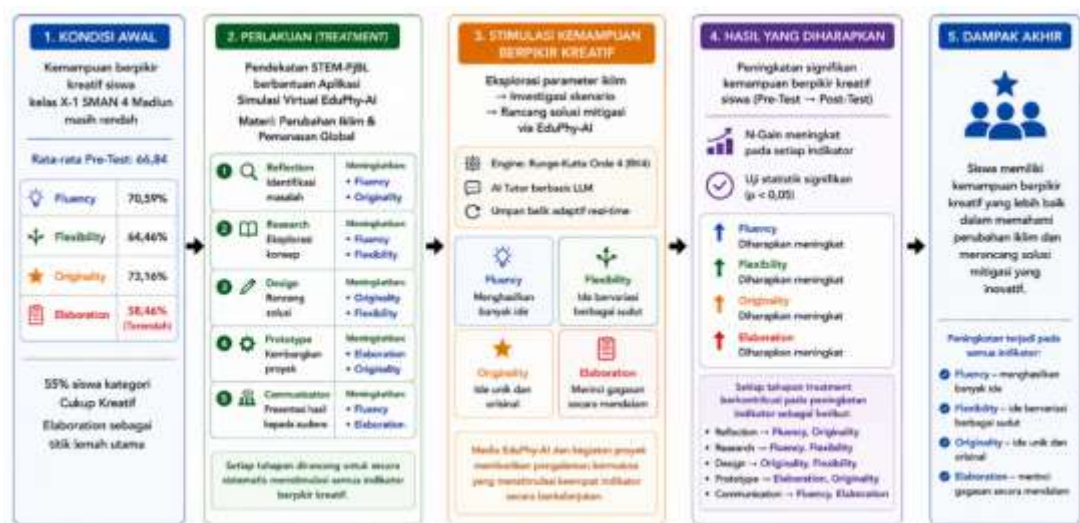
Kerangka berpikir dalam penelitian ini didasarkan pada alur pemecahan masalah pedagogis yang teridentifikasi di SMAN 4 Madiun melalui penerapan intervensi pembelajaran inovatif berbasis STEM-PjBL.

Titik tolak kerangka berpikir penelitian ini adalah identifikasi kesenjangan pada kondisi awal siswa. Data hasil observasi awal peneliti menunjukkan bahwa 55% siswa kelas X-1 SMAN 4 Madiun masih berada pada level "Menengah" dengan nilai rata-rata kelas sebesar 66,8. Meskipun indikator *Flexibility* mencapai 64% (kategori cukup baik), aspek *Elaboration* hanya mencapai 58%, yang menunjukkan kelemahan kritis dalam kemampuan siswa untuk memperinci dan mengembangkan ide-ide yang mereka miliki terhadap permasalahan fisika kontekstual.

Materi Perubahan Iklim dan Pemanasan Global dipilih sebagai konteks pembelajaran karena merupakan isu global yang kompleks, menuntut lebih dari sekadar pemahaman teoritis. Karakteristik materi ini membutuhkan kepekaan lingkungan dan kemampuan solutif tingkat tinggi, menjadikannya stimulus

yang tepat bagi siswa untuk bergerak dari sekadar menghafal konsep menuju proses berpikir kreatif yang aplikatif dan bermakna.

Pendekatan STEM-PjBL berbantuan aplikasi simulasi virtual terintegrasi *Artificial Intelligence* "EduPhy-AI" dipilih sebagai solusi strategis karena mampu menghadirkan suasana belajar yang menantang, transdisipliner, dan teknologis. Siswa diposisikan sebagai pemecah masalah autentik yang mengintegrasikan konsep sains (fisika atmosfer dan termodinamika), pemanfaatan Teknologi (data analysis dan simulasi digital), prinsip Rekayasa (merancang alat/strategi mitigasi iklim), dan Matematika (kalkulasi perubahan suhu dan pemodelan numerik). Integrasi keempat komponen ini menciptakan pengalaman belajar yang holistik dan bermakna.



Gambar 2.1. Kerangka Berpikir Penelitian

Mekanisme peningkatan kemampuan berpikir kreatif terjadi melalui aktivitas rekayasa (*engineering*) yang mendorong siswa berpikir divergen melalui siklus desain dan redesain solusi lingkungan. Proses ini secara

sistematis mengasah keempat indikator kreativitas: (1) Kelancaran (*Fluency*), siswa didorong menghasilkan banyak ide mitigasi iklim; (2) Keluwesan (*Flexibility*), siswa diajak melihat solusi dari berbagai perspektif disiplin ilmu; (3) Keaslian (*Originality*), siswa ditantang menciptakan prototipe atau metode mitigasi yang unik dan inovatif; dan (4) Elaborasi (*Elaboration*), siswa dituntut memperinci rancangan teknis agar dapat berfungsi dengan baik secara ilmiah dan praktis.

Dukungan empiris dari Mahombar. A et al. (2023) yang menunjukkan *effect size* sebesar 3,49 pendekatan STEM terhadap kreativitas memberikan landasan teoritis yang kuat akan keberhasilan metode ini. Berdasarkan alur logis tersebut, penerapan pendekatan STEM-PjBL berbantuan EduPhy-AI diyakini efektif untuk meningkatkan profil kemampuan berpikir kreatif siswa, khususnya dalam menutup kesenjangan pada aspek *Elaboration* yang menjadi kelemahan utama berdasarkan hasil observasi awal penelitian.

C. Hipotesis Penelitian

Berdasarkan kerangka berpikir yang telah diuraikan sebelumnya, penelitian ini mengajukan hipotesis untuk menguji efektivitas pendekatan STEM-PjBL dibandingkan dengan pendekatan konvensional. Pengujian dilakukan terhadap data hasil belajar siswa kelas X-1.

Adapun rumusan hipotesis penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Hipotesis Nol (H_0)

"Tidak terdapat peningkatan yang signifikan pada kemampuan berpikir kreatif siswa kelas X-1 SMA Negeri 4 Madiun antara sebelum dan

sesudah penerapan pendekatan STEM-PjBL berbantuan aplikasi simulasi virtual terintegrasi *Artificial Intelligence* “EduPhy-AI” pada materi Perubahan Iklim dan Pemanasan Global."

2. **Hipotesis Alternatif (H_a)**

"Terdapat peningkatan yang signifikan pada kemampuan berpikir kreatif siswa kelas X-1 SMA Negeri 4 Madiun antara sebelum dan sesudah penerapan pendekatan STEM-PjBL berbantuan aplikasi simulasi virtual terintegrasi *Artificial Intelligence* “EduPhy-AI” pada materi Perubahan Iklim dan Pemanasan Global."