**How project-based learning enhances pre-service science teachers’ integrative lesson planning competence: a Structural equation modeling approach**

Novi Ratna Dewi1\* [ORCID](https://orcid.org/0000-0002-0210-6496), Rizki Nor Amelia1 [ORCID](https://orcid.org/0000-0002-9128-9131), Septiko Aji1 [ORCID](https://orcid.org/0009-0006-5111-8721), Ismail Okta Kurniawan2 [ORCID](https://orcid.org/0009-0009-4667-4258)

1 Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Universitas Negeri Semarang, Central Java, Indonesia

2Directorate of Information System and Public Relation, Universitas Negeri Semarang, Central Java, Indonesia

**Corresponding author:** \*noviratnadewi@mail.unnes.ac.id

**Abstract**

Mempersiapkan calon guru IPA untuk merancang RPP yang secara simultan mengintegrasikan Technological Pedagogical Content Knowledge (TPACK), Science-Technology-Engineering-Mathematics (STEM), dan Education for Sustainable Development (ESD) merupakan tantangan kritis namun kurang diteliti dalam pendidikan guru. Penelitian ini menguji pengaruh Project-Based Learning (PjBL) terhadap pengembangan ketiga dimensi integrasi tersebut dan kualitas RPP integratif, serta memodelkan hubungan struktural di antaranya. Desain pra-eksperimen one-group pretest–posttest diterapkan pada 95 calon guru IPA di sebuah universitas negeri di Semarang, Indonesia. Data diperoleh dari penilaian berbasis rubrik terhadap RPP (14 indikator) dan kuesioner kualitas implementasi PjBL, lalu dianalisis menggunakan uji berpasangan, normalized gain (N-Gain), serta Partial Least Squares Structural Equation Modeling (PLS-SEM) dengan 5.000 iterasi bootstrap. Seluruh konstruk meningkat signifikan setelah intervensi PjBL, dengan ukuran efek besar (Cohen’s d>2,3) dan N-Gain kategori Medium; namun ESD memiliki N-Gain terlemah dan tidak ada partisipan mencapai N-Gain High. Hasil PLS-SEM menunjukkan PjBL secara signifikan memprediksi ketiga dimensi integrasi dengan ukuran efek besa: TPACK (β=0,727; p<0,001; f²=1,123), STEM (β=0,683; p<0,001; f²=0,872), dan ESD (β=0,617; p<0,001; f²=0,614). Ketiga dimensi berkontribusi signifikan terhadap kualitas RPP integratif dengan ukuran efek besar. Pola full mediation teramati: PjBL memengaruhi kualitas RPP melalui peningkatan kompetensi integrasi, dengan efek tidak langsung signifikan melalui STEM (β=0,330), TPACK (β=0,309), dan ESD (β=0,213); total indirect effect substansial (β=0,852; p<0,001) sementara direct effect tidak signifikan. Temuan ini menjadi uji empiris pertama model struktural yang menghubungkan PjBL dengan desain RPP integratif melalui TPACK, STEM, dan ESD, serta memberi panduan praktis bagi institusi pendidikan guru yang berupaya mengembangkan kompetensi desain komprehensif pada calon guru IPA.

**Kata kunci:** Project-Based Learning, TPACK, Pendidikan STEM, Education for Sustainable Development, Desain RPP Integratif, PLS-SEM,

1. **Introduction**

Lanskap pendidikan IPA abad ke-21 menuntut guru memiliki kompetensi multifaset yang melampaui penguasaan konten disiplin ilmu semata. Guru IPA kini diharapkan merancang pembelajaran yang secara bermakna mengintegrasikan teknologi digital, mendorong penalaran interdisipliner, dan mengatasi tantangan keberlanjutan yang mendesak (Kelley T. R., 2016; UNESCO, 2017). Ekspektasi ini sangat tinggi bagi calon guru IPA. Dalam persiapan profesionalnya, mereka perlu dibekali tidak hanya pemahaman teoretis tentang berbagai kerangka pedagogik, tetapi juga keterampilan praktis untuk menggabungkan beragam kerangka tersebut menjadi RPP yang runtut dan saling terhubung. Namun, program pendidikan guru yang ada sering kali masih memperlakukan aspek-aspek ini (Technological Pedagogical Content Knowledge (TPACK), integrasi Science-Technology-Engineering-Mathematics (STEM), dan Education for Sustainable Development (ESD)) sebagai bagian kurikulum yang terpisah. Akibatnya, calon guru seringkali harus menghadapi sendiri kompleksitas merancang RPP yang integratif.

Kemampuan merancang RPP integrative (RPP yang secara simultan menyematkan pedagogi berbasis teknologi, koneksi STEM interdisipliner, dan perspektif keberlanjutan) merepresentasikan kompetensi profesional tingkat tinggi yang disebut *teacher design capacity* (Matthew W . Brown, 2011). Kapasitas ini bukan sekadar kumpulan keterampilan yang berdiri sendiri, melainkan kompetensi yang muncul (emergen) yang menuntut guru mengintegrasikan berbagai jenis pengetahuan secara simultan (McKenney et al., 2015). Satu aspek kunci integrasi ini melalui kerangka TPACK, yaitu irisan domain pengetahuan yang memungkinkan guru memanfaatkan teknologi untuk mendukung pedagogi yang selaras dengan karakteristik konten (Mishra P., 2006). Kajian selanjutnya memperluas logika integratif tersebut ke pendidikan STEM, di mana perancangan pembelajaran yang efektif menuntut penggabungan yang disengaja antara inkuiri ilmiah, pemanfaatan teknologi, desain rekayasa, dan penalaran matematis (Kelley & Knowles, 2016; Pitot L. N., 2024; Portillo-Blanco A., 2025). Lebih mutakhir, tuntutan global terhadap pendidikan keberlanjutan menambahkan dimensi integrasi ketiga kompetensi ESD mengharuskan guru mengintegrasikan isu keberlanjutan, pendekatan inkuiri terhadap tantangan lingkungan, serta pemikiran evaluatif atas dilema sosio-ilmiah dalam pembelajaran IPA (Purwianingsih W., 2022; UNESCO, 2017; Vidal S., 2025).

Meskipun setiap dimensi diakui penting, temuan empiris masih menunjukkan literatur yang terpisah-pisah. Penelitian tentang pengembangan TPACK pada calon guru IPA cukup banyak (misalnya, Offermann et al., 2025; Salleh et al., 2025; Stinken-Rosner et al., 2023), demikian pula studi kompetensi integrasi STEM (Tucker et al., 2024; Mansour et al., 2024) dan, meski lebih terbatas, kemampuan pedagogis ESD (Purwianingsih et al., 2022; Vidal & Kuckuck, 2025). Namun, ketiga rumpun penelitian ini umumnya berjalan sendiri-sendiri. Masih sedikit studi yang menelaah bagaimana calon guru mengembangkan kemampuan mengintegrasikan TPACK, STEM, dan ESD secara bersamaan, dan belum ada yang memodelkan hubungan struktural ketiganya sebagai jalur mediasi melalui mana intervensi pembelajaran memengaruhi kualitas RPP integratif.

Project-Based Learning (PjBL) secara teoretis merupakan pendekatan yang menjanjikan untuk meningkatkan kompetensi calon guru dalam merancang RPP integratif. PjBL dipahami sebagai inkuiri jangka panjang yang terstruktur melalui pertanyaan pendorong autentik dan diakhiri dengan produk yang dipublikasikan (Krajcik & Shin, 2014). Sejumlah studi menunjukkan bahwa PjBL efektif meningkatkan kompetensi tersebut secara terpisah, misalnya peningkatan TPACK melalui scaffolding PjBL (Dewi et al., 2022) dan peningkatan kualitas desain unit STEM interdisipliner pada calon guru (Pitot et al., 2024; Portillo-Blanco et al., 2025). Namun, jalur pengaruh PjBL terhadap kualitas RPP integrative (apakah langsung atau melalui mediasi peningkatan TPACK, STEM, dan ESD) masih belum dibuktikan secara empiris.

Kesenjangan ini berdampak pada teori dan praktik. Secara teoretis, perlu dipahami apakah PjBL meningkatkan kualitas RPP terutama melalui penguatan dimensi integrasi (TPACK/STEM/ESD) atau melalui pengaruh langsung. Temuan ini dapat memperjelas mekanisme bagaimana intervensi pedagogis membentuk kompetensi desain, sekaligus menyempurnakan kerangka *Teacher Design Capacity* (Brown, 2009) dengan merinci jalur pembentukan kompetensi tersebut. Secara praktis, pemetaan dimensi integrasi yang paling responsif terhadap PjBL membantu guru menyesuaikan fokus pembelajaran dan strategi *scaffolding*, termasuk memberi dukungan tambahan pada dimensi yang belum berkembang optimal melalui PjBL saja.

Penelitian ini menutup kesenjangan dengan mengusulkan dan menguji model struktural yang menempatkan PjBL sebagai prediktor eksogen bagi tiga dimensi integrasi (TPACK, STEM, dan ESD), yang selanjutnya memengaruhi kualitas RPP integratif. Investigasi ini dipandu oleh lima pertanyaan penelitian:

**RQ1.** Bagaimana kompetensi integrasi TPACK, STEM, dan ESD calon guru IPA dalam desain RPP berubah dari pre- ke post-intervensi PjBL?

**RQ2.** Apakah implementasi PjBL secara signifikan mempengaruhi kualitas desain RPP di seluruh dimensi integrasi TPACK, STEM, dan ESD?

**RQ3.** Dimensi integrasi mana (TPACK, STEM, atau ESD) yang paling kuat dipengaruhi oleh PjBL?

**RQ4.** Bagaimana kompetensi integrasi TPACK, STEM, dan ESD berkontribusi terhadap kualitas RPP integratif secara keseluruhan setelah implementasi PjBL?

**RQ5.** Apakah peningkatan TPACK, STEM, dan ESD memediasi pengaruh PjBL terhadap kualitas RPP integratif?

Penelitian ini memberi kontribusi pada literatur dalam tiga hal. Pertama, penelitian ini menjadi uji empiris awal atas model integratif yang menempatkan TPACK, STEM, dan ESD secara simultan sebagai mediator hubungan antara intervensi pedagogis dan kualitas RPP. Kedua, kualitas RPP integratif diukur sebagai konstruk tingkat tinggi melalui penilaian rubrik (bukan self-report), sehingga pengukuran lebih kontekstual dan valid. Ketiga, melalui PLS-SEM untuk memetakan efek langsung, tidak langsung, dan total, penelitian ini menjelaskan secara rinci mekanisme bagaimana PjBL membentuk kompetensi calon guru IPA dalam mendesain pembelajaran, dengan implikasi langsung bagi perancangan kurikulum di lembaga pendidikan guru.

1. **Literature review**
   1. *Project-based learning dalam pendidikan guru*

Project-Based Learning (PjBL) adalah pendekatan pembelajaran yang berpusat pada pertanyaan autentik dan kompleks untuk mendorong investigasi berkelanjutan, inkuiri kolaboratif, serta menghasilkan artefak nyata (Krajcik & Shin, 2014). Elemen kunci PjBL mencakup pertanyaan pendorong berbasis masalah dunia nyata, inkuiri melalui penelitian, kolaborasi, produksi artefak yang dibagikan secara publik, dan refleksi terstruktur (Bell, 2010; Krajcik & Shin, 2014). Sejumlah studi mendukung efektivitasnya dalam meningkatkan kompetensi calon guru, termasuk TPACK dan kemampuan desain pembelajaran melalui scaffolding (Dewi et al., 2022), kompetensi pedagogis melalui pembelajaran proyek (Novallyan & Nehru, 2025), serta kompetensi terkait teknologi (Akbulut & Oner, 2021). Temuan lain menunjukkan PjBL/PBL cenderung memperkuat kolaborasi, produksi artefak, dan praktik inkuiri, meski elemen seperti pertanyaan pendorong yang sepenuhnya dihasilkan siswa masih menantang (Markula & Aksela, 2022), dan penelitian terbaru juga melaporkan peningkatan pada kualitas desain unit STEM interdisipliner serta design thinking calon guru (Pitot et al., 2024; Portillo-Blanco et al., 2025; Yuksel, 2025). Secara umum, studi-studi tersebut menempatkan PjBL sebagai intervensi yang layak untuk meningkatkan berbagai dimensi kompetensi guru, namun pengaruh simultannya terhadap banyak dimensi integrasi dalam satu model struktural masih jarang diteliti.

* 1. *Technological pedagogical content knowledge (tpack)*

Kerangka TPACK yang diperkenalkan oleh Mishra dan Koehler (2006), dengan dasar konsep Pedagogical Content Knowledge (PCK) dari Shulman (1986), menjelaskan pengetahuan yang saling beririsan untuk mendukung pengajaran efektif berbantuan teknologi. TPACK mencakup tujuh komponen: Technology Knowledge (TK), Pedagogical Knowledge (PK), Content Knowledge (CK), tiga irisan berpasangan (TPK, TCK, PCK), serta inti integratif TPACK yang merepresentasikan kemampuan mengajarkan konten spesifik menggunakan teknologi yang tepat melalui strategi pedagogis yang sesuai.

Pengukuran TPACK bergeser dari survei laporan diri menuju asesmen berbasis kinerja, misalnya evaluasi rencana pembelajaran dengan rubrik yang menangkap integrasi teknologi–pedagogi–konten (Offermann et al., 2025); Sejumlah studi SEM terbaru menunjukkan keterkaitan TPACK dengan konstruk lain: Mansour et al. (2024) menemukan hubungan signifikan antara komponen TPACK dan efikasi pengajaran STEM, Salleh et al. (2025) menegaskan peran pengetahuan konten dan efikasi diri teknologi sebagai prediktor, dan Stinken-Rosner et al. (2023) melaporkan modul implementasi teknologi yang terstruktur dapat meningkatkan TPACK serta orientasi perilaku penggunaan teknologi. Namun, TPACK masih jarang dimodelkan secara simultan bersama STEM dan ESD dalam satu kerangka struktural, sehingga menjadi celah yang ingin dijembatani dalam penelitian ini.

* 1. *Pendidikan STEM dan desain pembelajaran integratif*

Pendidikan STEM dipahami sebagai integrasi yang disengaja antara sains, teknologi, teknik, dan matematika, dan kini semakin kuat menjadi filosofi pendidikan sekaligus kerangka kurikulum (Kelley & Knowles, 2016). Perbedaan antara STEM yang diajarkan terpisah per disiplin dan STEM integrative berdampak langsung pada desain rencana pembelajaran. Kelley dan Knowles (2016) menawarkan kerangka STEM terintegrasi yang menekankan pembelajaran situated, desain teknik sebagai strategi pedagogis, inkuiri ilmiah sebagai proses membangun pengetahuan, serta pemikiran matematis sebagai dasar analitis; kualitas rencana pembelajaran dapat ditinjau dari akurasi-kedalaman konten sains, integrasi teknologi yang purposif, hadirnya pemikiran desain teknik, dan penerapan penalaran matematis.

Bagi calon guru IPA, kompetensi integrasi STEM menuntut pengembangan efikasi diri STEM (keyakinan dan kemampuan merancang pembelajaran interdisipliner (Tucker et al., 2024)) yang dapat diperkuat melalui perencanaan kolaboratif lintas mata kuliah dan integrasi eksplisit engineering design dalam kerangka PBL-STEM (Pitot et al., 2024; Portillo-Blanco et al., 2025), serta latihan desain berkelanjutan berbasis umpan balik (Wu et al., 2021). Tantangan ini cenderung lebih berat pada integrasi yang terkait ESD karena calon guru perlu memasukkan konteks keberlanjutan yang sering kurang familiar dibanding topik STEM tradisional.

* 1. *Education for sustainable development (ESD) dalam pengajaran IPA*

Education for Sustainable Development (ESD) merupakan paradigma pendidikan global yang membekali peserta didik dengan pengetahuan, keterampilan, nilai, dan sikap untuk merespons tantangan keberlanjutan yang saling terhubung (UNESCO, 2017). Dalam pendidikan guru IPA, ESD menuntut kompetensi yang melampaui pedagogi IPA tradisional, yaitu kemampuan mengaitkan konsep ilmiah dengan isu keberlanjutan (ESD-PCK), menerapkan pendekatan inkuiri untuk mengkaji persoalan lingkungan dan sosial (ESD-INQ), serta menumbuhkan pemikiran evaluatif terhadap dilema sosio-ilmiah dan berbagai trade-off (ESD-EVA) (UNECE, 2012).

Sejumlah studi menunjukkan upaya integrasi ESD pada pendidikan calon guru, misalnya program Purwianingsih et al. (2022) yang mengintegrasikan ESD ke dalam TPACK calon guru biologi. Shumba dan Kampamba (2013) juga menegaskan bahwa guru memerlukan pengetahuan pedagogis-konten spesifik ESD. Namun, integrasi ESD masih relatif kurang berkembang dibandingkan TPACK dan integrasi STEM, termasuk dalam desain rencana pembelajaran; selain itu, action competence ESD calon guru cenderung masih lemah dan sering diukur lewat self-report potong lintang, sehingga asesmen berbasis kinerja dan tugas desain menjadi penting (Vidal & Kuckuck, 2025; Singh-Pillay, 2023). Temuan lain menunjukkan pengetahuan SDG calon guru pada pelatihan awal juga sering terbatas, sehingga dukungan kurikuler ESD yang eksplisit tetap diperlukan (Calero et al., 2024); implikasinya, kompetensi ESD kemungkinan memerlukan scaffolding yang lebih intensif atau lebih panjang, dan responsnya terhadap intervensi PjBL jangka pendek dapat berbeda.

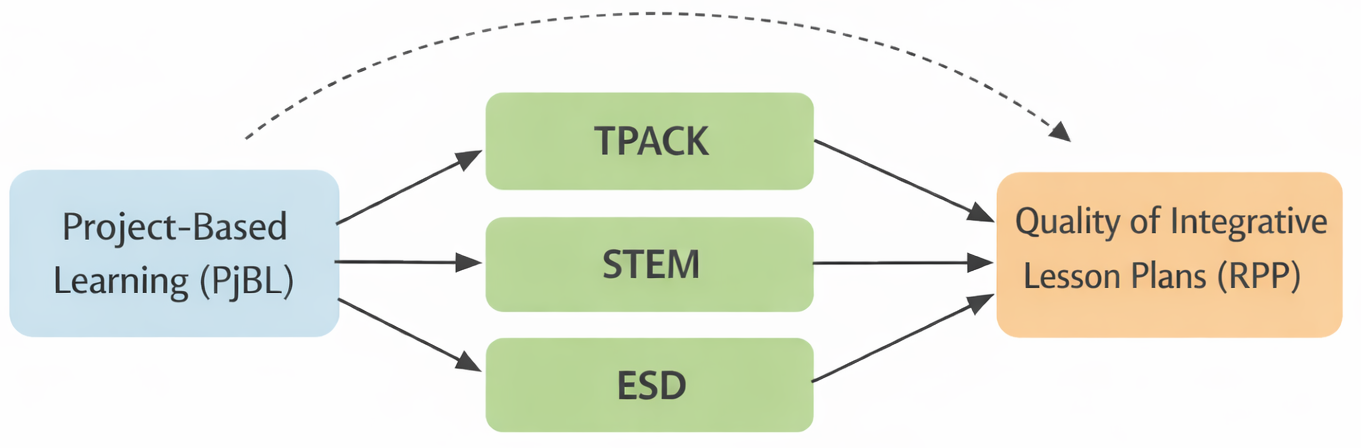
* 1. *Perencanaan pembelajaran integratif sebagai kompetensi desain guru*

Konsep *teacher design capacity* yang diperkenalkan oleh Brown (2009) dan dielaborasi oleh McKenney et al. (2015) menjadi landasan teoretis untuk memandang perencanaan pembelajaran integratif sebagai kompetensi profesional tingkat tinggi. Brown (2009) menekankan bahwa penggunaan kurikulum yang efektif menuntut guru berperan sebagai desainer yang secara aktif menafsirkan, menyesuaikan, dan mengembangkan materi pembelajaran sesuai konteks; kapasitas ini bersifat dinamis dan berkembang melalui keterlibatan dalam tugas desain serta umpan balik. McKenney et al. (2015) menambahkan bahwa kompetensi desain guru ditopang oleh basis pengetahuan spesifik (pengetahuan teknologi, pedagogis, dan materi subjek) yang terbentuk dari interaksi antara pengetahuan personal, pengetahuan formal, dan pengalaman praktik.

Dalam studi ini, kompetensi perencanaan pembelajaran integratif dioperasionalisasikan sebagai kualitas rencana pembelajaran yang secara simultan mengintegrasikan dimensi TPACK, STEM, dan ESD. Rencana pembelajaran dipahami sebagai konstruk tingkat tinggi (*higher-order construct*, HOC) yang merepresentasikan kualitas emergen dari integrasi yang koheren antardimensi, bukan sekadar penjumlahan skor komponen. Karena itu, asesmen berbasis rubrik (bukan laporan diri) digunakan untuk menangkap kompetensi desain yang benar-benar didemonstrasikan, bukan yang hanya dipersepsikan.

* 1. *Kerangka konseptual dan model yang dihipotesiskan*

Berdasarkan landasan teoretis tersebut, studi ini mengusulkan sebuah model struktural yang menempatkan PjBL sebagai konstruk eksogen yang memengaruhi tiga konstruk endogen orde pertama, yaitu kompetensi integrasi TPACK, STEM, dan ESD, yang selanjutnya berkontribusi pada kualitas rencana pembelajaran integratif (lihat Gambar 1). Model ini mengasumsikan adanya efek langsung (PjBL -> TPACK, PjBL -> STEM, PjBL -> ESD) serta efek tidak langsung (PjBL -> TPACK/STEM/ESD -> Kualitas Rencana Pembelajaran Integratif). Dalam kerangka ini, ketiga dimensi integrasi tersebut dihipotesiskan berperan sebagai mediator antara PjBL dan kualitas rencana pembelajaran.



*Gambar 1.* Model struktural yang dihipotesiskan.

PjBL mempengaruhi tiga dimensi integrasi (TPACK, STEM, ESD) yang kemudian berkontribusi terhadap kualitas rencana pembelajaran integratif. Garis putus-putus menunjukkan jalur langsung PjBL ke RPP, yang dihipotesiskan tidak signifikan (mediasi penuh).

Justifikasi teoretis untuk setiap jalur adalah sebagai berikut:

1. PjBL -> TPACK: Penekanan PjBL pada penciptaan artefak dan investigasi berbasis inkuiri secara alami memerlukan mobilisasi teknologi untuk pedagogi spesifik konten (Dewi et al., 2022).
2. PjBL -> STEM: Pertanyaan pendorong autentik PjBL biasanya mencakup berbagai disiplin STEM, memerlukan pemikiran desain interdisipliner (Krajcik & Shin, 2014).
3. PjBL -> ESD: Fokus PjBL pada masalah dunia nyata menciptakan peluang untuk mengatasi isu keberlanjutan, meskipun kekuatan tautan ini mungkin bergantung pada scaffolding eksplisit (Purwianingsih et al., 2022).
4. TPACK/STEM/ESD -> Kualitas Rencana Pembelajaran Integratif: Setiap dimensi menyumbang elemen desain substantif—integrasi teknologi, koneksi interdisipliner, dan perspektif keberlanjutan—yang secara kolektif menentukan kualitas rencana pembelajaran integratif (Brown, 2009; McKenney et al., 2015).
5. Mediasi: PjBL dihipotesiskan mempengaruhi kualitas rencana pembelajaran tidak secara langsung tetapi melalui peningkatan kompetensi integrasi, konsisten dengan pandangan bahwa intervensi pedagogis beroperasi dengan mengembangkan basis pengetahuan profesional spesifik yang kemudian termanifestasi dalam kinerja desain.

Hipotesis berikut dirumuskan berdasarkan kerangka teoretis

H1: PjBL secara positif dan signifikan mempengaruhi kompetensi integrasi TPACK, STEM, dan ESD.

H2: Kompetensi integrasi TPACK, STEM, dan ESD secara signifikan berkontribusi terhadap kualitas RPP integratif.

H3: TPACK, STEM, dan ESD memediasi hubungan antara PjBL dan kualitas RPP integratif.

1. **Methods**
   1. *Desain penelitian*

Penelitian ini menerapkan desain pra-eksperimental satu kelompok pretest–posttest (Creswell & Creswell, 2018). Partisipan menyusun rencana pembelajaran sebelum dan sesudah intervensi PjBL; kualitasnya dinilai dengan rubrik terstandar pada tiga dimensi integrasi, yaitu TPACK, STEM, dan ESD. Desain ini dipilih karena penelitian berfokus pada pendokumentasian perubahan kompetensi setelah intervensi serta pemodelan hubungan struktural antara kualitas implementasi PjBL, dimensi integrasi, dan kualitas rencana pembelajaran menggunakan PLS-SEM, bukan pada pembuktian kausal yang ketat melalui perbandingan antar-kelompok.

* 1. *Partisipan*

Partisipan penelitian ini terdiri atas 95 calon guru IPA pada program studi Pendidikan IPA sebuah universitas Pendidikan negeri di Semarang Indonesia. Seluruh partisipan merupakan mahasiswa sarjana tahun ketiga atau keempat yang telah menuntaskan mata kuliah dasar konten sains, pedagogi umum, dan teknologi pendidikan. Sampel dipilih secara purposif, yakni mahasiswa yang sekaligus mengambil mata kuliah Strategi dan Desain Pembelajaran IPA sebagai konteks natural pelaksanaan intervensi PjBL. Ukuran sampel (N=95) melampaui ambang minimum PLS-SEM; Hair et al. (2022) merekomendasikan minimal 10 kali jumlah maksimum jalur struktural yang menuju satu konstruk (pada model ini, empat jalur menuju konstruk RPP, sehingga minimum 40).

* 1. *Intervensi: implementasi PjBL*

Intervensi PjBL dilaksanakan selama 16 kali pertemuan melalui sesi yang terstruktur. Partisipan mengikuti siklus proyek untuk menyusun rencana pembelajaran integratif yang memadukan TPACK, STEM, dan ESD secara simultan. Intervensi mengacu pada lima tahap yang diadaptasi dari Krajcik dan Shin (2014): (1) Orientasi dan pertanyaan pendorong; (2) Perencanaan dan investigasi; (3) Penciptaan artefak. (4) Peer review dan revisi; (5) Presentasi dan refleksi.

Kualitas implementasi PjBL dievaluasi melalui instrumen observasi yang diisi oleh 10 observer.

* 1. *Instrumen*
     1. *Rubrik rencana pembelajaran integratif (pretest-posttest)*

Instrumen utama adalah rubrik untuk mengevaluasi kualitas rencana pembelajaran integratif, diskor pada skala Likert empat poin (1 = tidak memenuhi kriteria, 2 = sebagian memenuhi, 3 = memenuhi, 4 = melampaui kriteria). Rubrik menilai tiga dimensi integrasi yang terdiri dari 14 indikator:

1. TPACK (7 indikator): TK, PK, CK, TPK, TCK, PCK, TPACK integratif.
2. STEM (4 indikator): Integrasi konten Sains (S), Aplikasi Teknologi (T), Proses desain Teknik/Engineering (E), dan Penalaran Matematis (M).
3. ESD (3 indikator): ESD-Pedagogical Content Knowledge (ESD-PCK), ESD-Inquiry (ESD-INQ), dan ESD-Evaluative thinking (ESD-EVA).

Skor komposit setiap dimensi dihitung sebagai rata-rata (mean) dari indikator penyusunnya. Skor kualitas keseluruhan rencana pembelajaran integratif (RPPInt\_total) dihitung sebagai grand mean dari 14 indikator. Rubrik disusun melalui penilaian ahli oleh lima spesialis pendidikan IPA dan menunjukkan validitas konten yang memadai.

* + 1. *Instrumen observasi implementasi PjBL*

Kualitas implementasi PjBL diukur menggunakan instrumen observasi lima item, dengan setiap item diskor pada skala 1–4 yang sesuai dengan lima tahap PjBL. Instrumen diisi oleh instruktur mata kuliah yang mengobservasi proses implementasi.

* 1. *Prosedur pengumpulan data*

Pengumpulan data mengikuti timeline tiga tahap: (a) pretest; (b) intervensi PjBL; dan (c) posttest. Rencana pembelajaran dianonimkan sebelum penskoran untuk mengurangi bias penilai.

* 1. *Analisis data*

Analisis data berlangsung dalam dua fase.

1. Fase 1: Perbandingan pre-post (RQ1)

Analisis yang dilakukan untuk menjawab RQ1: Statistik deskriptif (mean, standar deviasi, minimum, maksimum); Uji normalitas (uji Shapiro-Wilk), Uji inferensial berpasangan (paired-samples t-test untuk data terdistribusi normal, dan uji Wilcoxon signed-rank untuk data terdistribusi tidak normal dengan ; Effect sizes (Cohen’s untuk uji parametrik dan korelasi rank-biserial untuk uji non-parametrik). Effect sizes diinterpretasikan mengikuti Cohen (1988): kecil (), sedang (), dan besar (). Normalized gain (N-Gain) dihitung menggunakan formula Hake (1998): N-Gain , di mana max (skor rubrik maksimum). Nilai N-Gain dikategorikan sebagai Tinggi (), Sedang (–), atau Rendah (). Seluruh analisis Fase 1 dilakukan di Python 3.11 menggunakan pandas, scipy, dan pingouin.

1. Fase 2: Structural equation modeling (RQ2–RQ5)

Partial Least Squares Structural Equation Modeling (PLS-SEM) digunakan untuk menjawab RQ2 sampai RQ5 karena: (a) sifat eksploratori-konfirmatori penelitian; (b) inklusi konstruk indikator tunggal; (c) ukuran sampel moderat (); dan (d) kapasitas PLS-SEM untuk menangani data non-normal dan pengukuran formatif (Hair et al., 2022).

*Spesifikasi model.* Model struktural terdiri dari lima konstruk: PjBL (eksogen), TPACK, STEM, ESD, dan RPP (endogen). Seluruh konstruk dispesifikasikan sebagai reflektif (Mode A). Jalur struktural mencakup tujuh hubungan: PjBL TPACK, PjBL STEM, PjBL ESD, PjBL RPP (langsung), TPACK RPP, STEM RPP, dan ESD RPP. Konstruk RPP dioperasionalisasikan sebagai konstruk indikator tunggal menggunakan skor kualitas rencana pembelajaran integratif komposit (RPPInt\_total\_post), dengan loading indikator difiksasi ke 1,000. Matriks data untuk analisis SEM menggunakan skor posttest untuk TPACK, STEM, ESD, dan RPP, serta skor observasi PjBL, menghasilkan 19 variabel manifes.

*Evaluasi model pengukuran.* Model outer (pengukuran) dinilai menggunakan kriteria PLS-SEM standar (Hair et al., 2022):

1. Reliabilitas indikator: outer loadings (indikator antara 0,40 dan 0,70 dipertahankan jika penghapusannya tidak meningkatkan AVE atau CR, mengikuti rekomendasi Hair et al. untuk penelitian eksploratori).
2. Validitas konvergen: Average Variance Extracted (AVE) .
3. Reliabilitas konsistensi internal: Composite Reliability (CR) dan Cronbach’s .
4. Validitas diskriminan: rasio Heterotrait-Monotrait (HTMT) (Henseler et al., 2015), dilengkapi dengan kriteria Fornell-Larcker.

*Evaluasi model struktural.* Model inner (struktural) dinilai melalui: Koefisien jalur (); Signifikansi statistic; Koefisien determinasi (); Effect size (); Relevansi prediktif ()

*Analisis komparatif (RQ3).* Pengaruh relatif PjBL terhadap setiap dimensi integrasi dinilai dengan membandingkan koefisien jalur dan nilai terkait.

*Analisis mediasi (RQ5).* Efek tidak langsung dihitung sebagai produk koefisien jalur penyusun. Signifikansi statistik efek tidak langsung ditentukan melalui metode confidence interval bootstrap (Preacher & Hayes, 2008): efek tidak langsung dianggap signifikan jika confidence interval percentile 95% tidak mencakup nol. Uji Sobel juga dihitung sebagai cross-check. Variance Accounted For (VAF) dihitung untuk mengklasifikasikan tipe mediasi: mediasi penuh (VAF ), mediasi parsial ( VAF ), atau tanpa mediasi (VAF ) (Hair et al., 2022).

*Perangkat lunak.* Analisis PLS-SEM dilakukan menggunakan paket Python plspm (versi 0.5.7) dengan random seed 42 untuk reprodusibilitas. Seluruh prosedur bootstrap menggunakan 5.000 iterasi dengan konfigurasi single-process untuk memastikan eksekusi deterministik. Gambar dihasilkan menggunakan matplotlib.

1. **Results**
   1. *Statistik deskriptif*

Statistik deskriptif untuk seluruh konstruk dilakukan sebelum uji hipotesis. Tabel 1 menyajikan rata-rata dan simpangan baku tingkat konstruk pada pretest dan posttest.

**Tabel 1.** Statistik deskriptif per konstruk (pretest vs posttest)

| Konstruk |  | Pre | Pre | Post | Post |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| TPACK | 95 | 2,306 | 0,390 | 3,319 | 0,294 | 1,013 |
| STEM | 95 | 2,172 | 0,393 | 3,222 | 0,378 | 1,051 |
| ESD | 95 | 1,929 | 0,328 | 2,726 | 0,259 | 0,798 |
| RPP Integratif | 95 | 2,136 | 0,256 | 3,089 | 0,237 | 0,954 |

Sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 1, seluruh konstruk menunjukkan peningkatan substansial setelah intervensi PjBL (terlihat dari nilai . Perbedaan rata-rata terbesar diamati pada STEM, diikuti TPACK, RPP Integratif, dan ESD.

* 1. *RM1: Perubahan pre-post*
     1. *Uji normalitas dan uji berpasangan dan ukuran efek*

Normalitas dinilai menggunakan uji Shapiro-Wilk. Tabel 2 merangkum hasilnya.

**Tabel 2.** Hasil uji normalitas shapiro-wilk untuk skor selisih

| Konstruk |  |  | Normal |
| --- | --- | --- | --- |
| TPACK | 0,968 | ,020 | Tidak |
| STEM | 0,977 | ,088 | Ya |
| ESD | 0,990 | ,704 | Ya |
| RPP Integratif | 0,986 | ,418 | Ya |

Sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2, skor selisih untuk STEM, ESD, dan RPP Integratif terdistribusi normal (). Namun, skor selisih TPACK menyimpang signifikan dari normalitas. Oleh karena itu, paired-samples t-test diterapkan pada STEM, ESD, dan RPP Integratif, sementara Wilcoxon signed-rank test digunakan untuk TPACK.

**Tabel 3.** Hasil uji berpasangan

| Konstruk | Uji | Statistik |  | Cohen’s | Interpretasi |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| TPACK | Wilcoxon |  |  | 2,705 | Besar |
| STEM | Paired t |  |  | 2,657 | Besar |
| ESD | Paired t |  |  | 2,338 | Besar |
| RPP Integratif | Paired t |  |  | 4,194 | Besar |

Sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 3, keempat konstruk menunjukkan peningkatan signifikan secara statistik dari pretest ke posttest (). Ukuran efek seragam besar, dengan nilai Cohen’s melebihi 2,3 untuk seluruh konstruk.

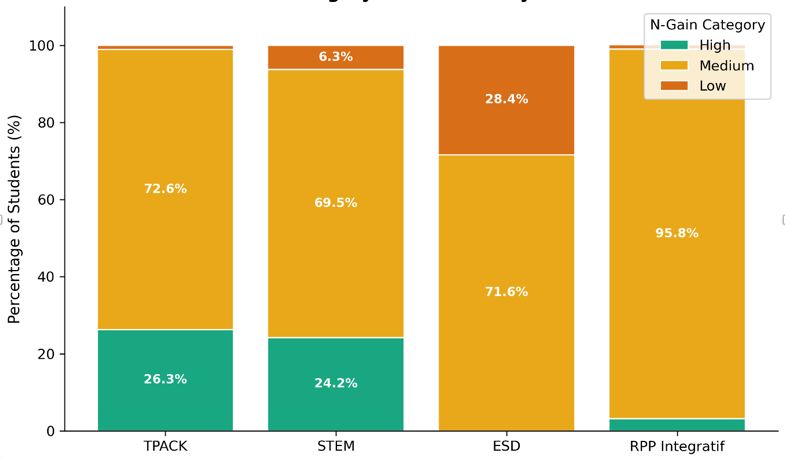
* + 1. *Normalized gain*

Proporsi peningkatan maksimum yang dapat dicapai diukur menggunakan normalized gain (N-Gain). Tabel 4 menyajikan ringkasan N-Gain, sementara Gambar 2. memvisualisasikan distribusi kategori gain.

**Tabel 4.** Ringkasan N-Gain

| Konstruk | N-Gain |  | Kategori | High (%) | Medium (%) | Low (%) |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| TPACK | 0,596 | 0,160 | Medium | 26,3 | 72,6 | 1,1 |
| STEM | 0,574 | 0,179 | Medium | 24,2 | 69,5 | 6,3 |
| ESD | 0,376 | 0,129 | Medium | 0,0 | 71,6 | 28,4 |
| RPP Integratif | 0,513 | 0,103 | Medium | 3,2 | 95,8 | 1,1 |

Sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4, seluruh konstruk mencapai kategori Medium gain (–). TPACK memperoleh rata-rata N-Gain tertinggi, diikuti STEM, RPP Integratif, dan ESD.



Gambar 2. Distribusi kategori N-Gain setiap konstruk

Analisis pre-post (RM1) menunjukkan bahwa PjBL secara signifikan meningkatkan keempat konstruk dengan ukuran efek besar, meskipun ESD menunjukkan gain terkecil. Untuk memahami hubungan struktural antar konstruk ini, kami beralih ke analisis PLS-SEM yang menjawab RM2–RM5.

* 1. *RM2–RM5: Analisis PLS-SEM*
     1. *Evaluasi model pengukuran*

Evaluasi model pengukuran untuk memastikan reliabilitas dan validitas yang memadai sebelum uji hipotesis struktural. Tabel 5 menyajikan outer loadings untuk seluruh indikator.

**Tabel 5.** Outer loadings

| Konstruk | Indikator | Loading |  |
| --- | --- | --- | --- |
| ESD | ESD-EVA | 0,780 | Ya |
| ESD | ESD-INQ | 0,894 | Ya |
| ESD | ESD-PCK | 0,867 | Ya |
| PjBL | PjBL01 | 0,815 | Ya |
| PjBL | PjBL02 | 0,804 | Ya |
| PjBL | PjBL03 | 0,835 | Ya |
| PjBL | PjBL04 | 0,850 | Ya |
| PjBL | PjBL05 | 0,840 | Ya |
| TPACK | TK | 0,689 | Tidak |
| TPACK | PK | 0,224 | Tidak |
| TPACK | CK | 0,673 | Tidak |
| TPACK | TPK | 0,760 | Ya |
| TPACK | TCK | 0,795 | Ya |
| TPACK | PCK | 0,400 | Tidak |
| TPACK | TPACK\_int | 0,759 | Ya |
| STEM | Science | 0,484 | Tidak |
| STEM | Technology | 0,713 | Ya |
| STEM | Engineering | 0,577 | Tidak |
| STEM | Mathematics | 0,916 | Ya |
| RPP | RPPInt\_total | 1,000 | Ya |

Indikator dengan loading antara 0,40 dan 0,70 dipertahankan mengikuti rekomendasi Hair et al. (2022) untuk penelitian eksploratoris.

**Tabel 6a.** Reliabilitas konstruk dan validitas konvergen

| Konstruk | AVE | CR | Cronbach’s alpha |
| --- | --- | --- | --- |
| ESD | 0,720 | 0,886 | 0,807 |
| PjBL | 0,687 | 0,917 | 0,886 |
| RPP | 1,000 | 1,000 | — |
| STEM | 0,480 | 0,814 | 0,694 |
| TPACK | 0,418 | 0,834 | 0,766 |

Threshold: AVE >= 0,50, CR >= 0,70, alpha >= 0,70. RPP adalah konstruk single-indicator.

**Tabel 6b.** Matriks heterotrait-monotrait (HTMT)

| Konstruk | PjBL | TPACK | STEM | ESD |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| PjBL | — |  |  |  |
| TPACK | 0,837 | — |  |  |
| STEM | 0,871 | 0,770 | — |  |
| ESD | 0,716 | 0,298 | 0,456 | — |

Seluruh nilai , mendukung validitas diskriminan.

* + 1. *Model struktural: Efek langsung (RM2)*

Uji hubungan struktural untuk menjawab RM2 dilakukan setelah model pengukuran terkonfirmasi. Tabel 7 menyajikan koefisien jalur, statistik bootstrap (5.000 iterasi, seed = 42), dan ukuran efek untuk seluruh jalur langsung.

**Tabel 7.** Model struktural — koefisien jalur dan signifikansi

| Jalur | |  | |  | |  | |  | CI 95% | Sig. | |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| PjBL TPACK | 0,727 | | 0,055 | | 13,295 | |  | | [0,610; 0,823] | Ya | 1,123 (Big) | | |
| PjBL STEM | 0,683 | | 0,054 | | 12,616 | |  | | [0,573; 0,782] | Ya | 0,872 (Big) | | |
| PjBL ESD | 0,617 | | 0,065 | | 9,496 | |  | | [0,485; 0,739] | Ya | 0,614 (Big) | | |
| PjBL RPP | 0,030 | | 0,045 | | 0,770 | | ,441 | | [-0,055; 0,123] | Tidak | 0,007 (Negligible) | | |
| TPACK RPP | 0,425 | | 0,037 | | 11,346 | |  | | [0,345; 0,491] | Ya | 2,783 (Big) | | |
| STEM RPP | 0,484 | | 0,037 | | 13,116 | |  | | [0,412; 0,556] | Ya | 5,444 (Big) | | |
| ESD RPP | 0,345 | | 0,040 | | 8,355 | |  | | [0,264; 0,423] | Ya | 2,399 (Big) | | |

Sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 7, PjBL memberikan efek positif signifikan terhadap ketiga dimensi integrasi: TPACK (, , ), STEM (, , ), dan ESD (, , ). Seluruh ukuran efek besar. Penting dicatat, jalur langsung dari PjBL ke RPP tidak signifikan (, ), menunjukkan bahwa PjBL tidak langsung mempengaruhi kualitas RPP tetapi bekerja melalui konstruk mediator.

Model menjelaskan 97,7% varians RPP (), 52,9% TPACK (), 46,6% STEM (), dan 38,0% ESD (). Relevansi prediktif () bernilai positif dan substansial untuk seluruh konstruk endogen: RPP (0,974), TPACK (0,503), STEM (0,430), dan ESD (0,355), menunjukkan kapasitas prediktif yang kuat melampaui prediksi rerata sederhana.

* + 1. *Analisis komparatif: Dimensi dominan (RM3)*

Berdasarkan temuan RM2, RM3 menanyakan dimensi integrasi mana yang paling responsif terhadap PjBL. Tabel 8 membandingkan koefisien jalur PjBL ke dimensi.

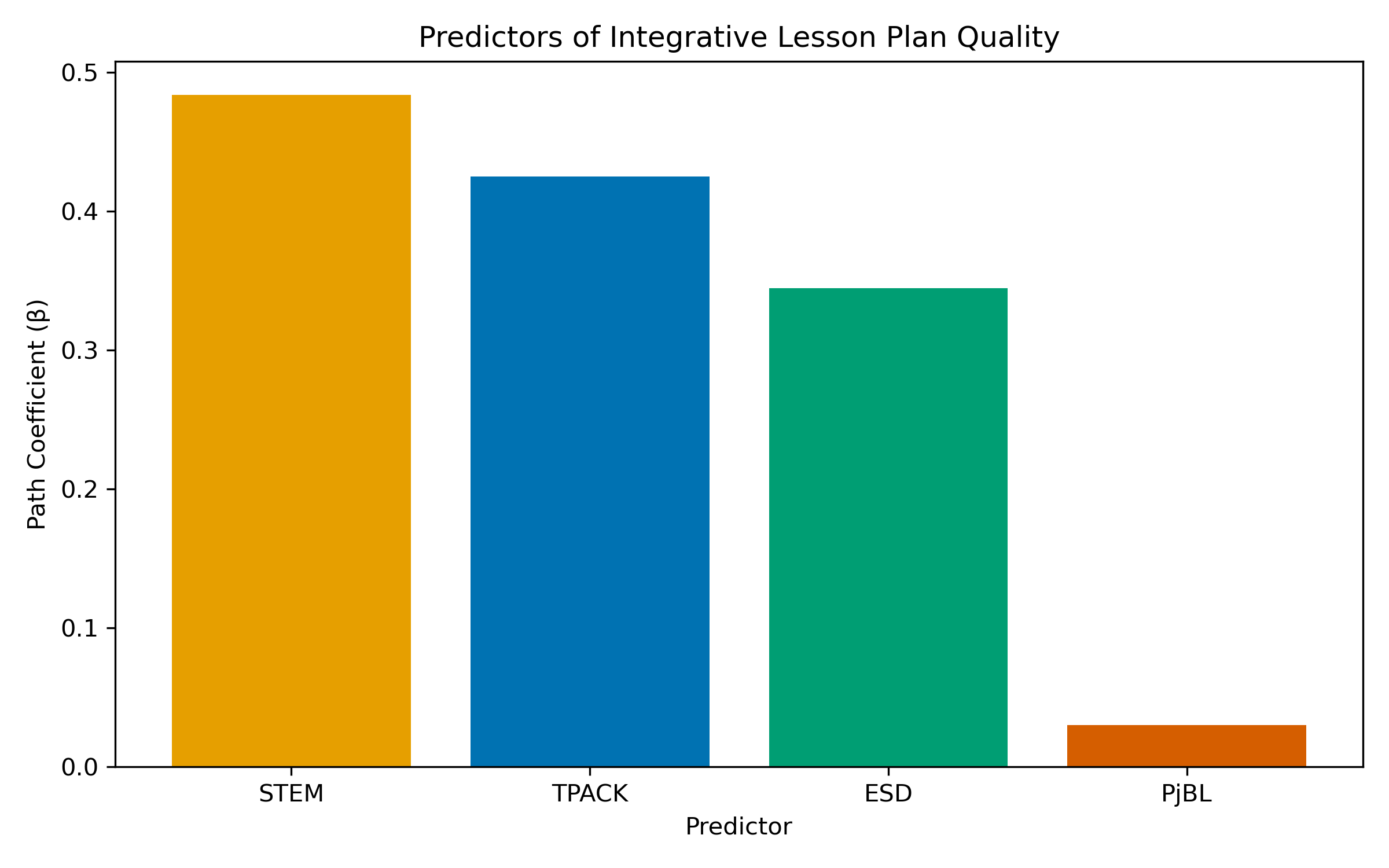
**Tabel 8.** RM3 — Perbandingan Koefisien Jalur PjBL ke dimensi

| Rank | Dimensi |  |  |  |  | Signifikan |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 1 | TPACK | 0,727 | 13,295 |  | 1,123 | Ya |
| 2 | STEM | 0,683 | 12,616 |  | 0,872 | Ya |
| 3 | ESD | 0,617 | 9,496 |  | 0,614 | Ya |

Sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 8, TPACK muncul sebagai dimensi paling responsif (, ), diikuti STEM (, ) dan ESD (, ). Seluruh jalur signifikan dengan ukuran efek besar, menghasilkan urutan: TPACK > STEM > ESD.

* + 1. *Higher-Order Construct: Dimensi yang Berkontribusi terhadap Kualitas RPP (RM4)*

RM4 fokus pada bagaimana dimensi-dimensi ini berkontribusi terhadap kualitas RPP integratif. Gambar 3. mengilustrasikan model struktural lengkap dengan jalur dari PjBL melalui konstruk mediator ke RPP.



Gambar 3. Prediktor kualitas RPP integratif

Gambar 3. Menunjukkan ketiga dimensi berkontribusi signifikan: STEM (), TPACK (), dan ESD (). Jalur langsung dari PjBL ke RPP tidak signifikan (, garis putus-putus).

Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2 dan Tabel 7, ketiga dimensi integrasi berkontribusi signifikan dan substansial terhadap kualitas RPP integratif. STEM adalah kontributor terkuat (), diikuti TPACK () dan ESD (). Nilai yang konsisten besar (seluruh ) menunjukkan bahwa setiap dimensi memberikan kontribusi bermakna dan non-redundan terhadap kualitas RPP keseluruhan.

* + 1. *Analisis mediasi (RM5)*

RM5 menguji apakah TPACK, STEM, dan ESD memediasi hubungan antara PjBL dan kualitas RPP. Tabel 9 menyajikan hasil analisis mediasi.

**Tabel 9.** Analisis mediasi — efek tidak langsung

| Jalur Tidak Langsung |  | |  | |  | |  | | CI 95% | VAF | Sobel | Sobel | |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| PjBL TPACK RPP | 0,309 | 0,035 | | 8,725 | |  | | [0,239; 0,375] | | 35,0% | 8,686 | |  |
| PjBL STEM RPP | 0,330 | 0,033 | | 10,039 | |  | | [0,271; 0,401] | | 37,4% | 9,052 | |  |
| PjBL ESD RPP | 0,213 | 0,031 | | 6,685 | |  | | [0,151; 0,275] | | 24,1% | 6,335 | |  |
| Total indirect | 0,852 | 0,040 | | 21,016 | |  | | [0,769; 0,928] | | — | — | | — |
| Langsung (PjBL RPP) | 0,030 | 0,045 | | 0,770 | | ,441 | | [-0,055; 0,123] | | — | — | | — |
| Total effect | 0,882 | 0,021 | | 42,952 | |  | | [0,838; 0,917] | | — | — | | — |

Sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 9, ketiga jalur tidak langsung signifikan secara statistik berdasarkan confidence interval bootstrap:

1. PjBL STEM RPP adalah jalur mediasi terkuat (indirect , , CI 95% [0,271; 0,401]). VAF 37,4% menunjukkan mediasi parsial, dan uji Sobel mengonfirmasi signifikansi (, ).
2. PjBL TPACK RPP menghasilkan efek tidak langsung signifikan (indirect , , CI 95% [0,239; 0,375]). VAF 35,0% konsisten dengan mediasi parsial.
3. PjBL ESD RPP juga signifikan (indirect , , CI 95% [0,151; 0,275]). VAF 24,1% menunjukkan mediasi parsial.

Total indirect effect signifikan (, ), sedangkan direct effect PjBL terhadap RPP tidak signifikan (, ). Pola ini konsisten dengan full mediation secara agregat: PjBL mempengaruhi kualitas RPP integratif bukan secara langsung, tetapi melalui peningkatan ketiga dimensi integrasi. Total effect PjBL terhadap RPP signifikan (, ), mengonfirmasi bahwa pengaruh keseluruhan PjBL terhadap kualitas RPP substansial dan bekerja melalui dimensi mediator.

1. **Discussio****n**
   1. *Efektivitas PjBL dalam meningkatkan kompetensi integratif (RQ1)*

Analisis pre–post menunjukkan peningkatan yang signifikan secara statistik pada keempat konstruk, dengan ukuran efek yang konsisten besar (Cohen’s d > 2,3). Temuan ini menjadi bukti kuat bahwa kompetensi perencanaan pembelajaran integratif partisipan meningkat secara substansial setelah intervensi PjBL dibandingkan sebelum intervensi. Hasil ini sejalan dengan Dewi et al. (2022) yang melaporkan bahwa scaffolding PjBL meningkatkan TPACK dan kemampuan desain pembelajaran calon guru, sekaligus memperluas bukti bahwa peningkatan tidak hanya pada integrasi teknologi, tetapi juga mencakup dimensi STEM dan ESD.

Analisis N-Gain memperlihatkan perbedaan tingkat respons antar konstruk. TPACK (*M* = 0,596) dan STEM (*M* = 0,574) mencatat gain tertinggi dan keduanya mendekati batas atas kategori sedang. RPP Integratif (*M* = 0,513) berada pada tingkat sedang bagian tengah. Sebaliknya, ESD memiliki N-Gain terendah (*M* = 0,376), hampir tidak melewati ambang batas sedang; tidak ada partisipan yang mencapai kategori tinggi dan 28,4% masih berada pada kategori rendah.

Pola diferensial ini penting secara pedagogis. Kenaikan yang lebih kuat pada TPACK dan STEM kemungkinan dipengaruhi oleh kesesuaian karakteristik PjBL dengan kedua kompetensi tersebut. PjBL menekankan produk/artefak yang menuntut integrasi teknologi (menguatkan TPACK) dan umumnya menggunakan pertanyaan pendorong lintas disiplin yang memfasilitasi cara berpikir interdisipliner (mendukung STEM). Sebaliknya, ESD (terutama kemampuan mengintegrasikan perspektif keberlanjutan, inkuiri lingkungan, dan penalaran evaluatif atas isu sosio-ilmiah) memerlukan reorientasi pedagogis yang tidak selalu muncul otomatis dari praktik PjBL yang bersifat umum. Purwianingsih et al. (2022) juga menemukan pola serupa, bahwa integrasi ESD dalam TPACK calon guru membutuhkan program yang terstruktur dan terfokus, bukan sekadar paparan insidental. Karena itu, meskipun PjBL dapat menjadi konteks yang mendukung pengembangan ESD, diperlukan scaffolding eksplisit (misalnya pertanyaan pendorong berbasis keberlanjutan, refleksi terstruktur terkait SDGs, atau kriteria desain ESD khusus) agar peningkatan ESD dapat melampaui kategori sedang.

Bukti terbaru memperkuat interpretasi ini. Studi tentang desain pembelajaran PBL-STEM pada calon guru secara konsisten menunjukkan peningkatan lebih cepat pada kualitas desain interdisipliner dan perencanaan berbasis teknologi dibandingkan kompetensi aksi keberlanjutan, kecuali ketika ESD secara sengaja diintegrasikan ke dalam arsitektur tugas desain (Pitot et al., 2024; Portillo-Blanco et al., 2025; Vidal & Kuckuck, 2025). Sejalan dengan itu, riset pendidikan guru berbasis keberlanjutan menunjukkan bahwa penguatan kompetensi ESD lebih efektif ketika refleksi dan tugas keberlanjutan berbasis konteks komunitas dirancang secara eksplisit (Singh-Pillay, 2023; Ozdemir-Yilmazer, 2025).

Pola ini juga selaras dengan bukti implementasi PBL pada konteks IPA yang menunjukkan bahwa guru cenderung lebih cepat mengimplementasikan elemen PBL yang tampak (kolaborasi, produksi artefak, presentasi, refleksi) dibandingkan komponen yang menuntut kendali belajar siswa yang lebih mendalam; kondisi ini dapat menjelaskan mengapa penalaran berorientasi ESD berkembang lebih lambat tanpa dukungan desain yang eksplisit (Markula & Aksela, 2022).

* 1. *PjBL sebagai penggerak dimensi integrasi (RQ2)*

Analisis PLS-SEM mengungkapkan bahwa PjBL memberikan efek positif yang signifikan secara statistik dan kuat pada ketiga dimensi integrasi: TPACK (, ), STEM (, ), dan ESD (, ). Seluruh effect sizes besar (), menunjukkan signifikansi praktis substansial. Jalur langsung dari PjBL ke RPP tidak signifikan (, ). Temuan ini sepenuhnya mendukung H1: PjBL secara signifikan mempengaruhi ketiga dimensi integrasi.

Jalur PjBL TPACK yang kuat () selaras dengan kerangka teoretis. Elemen-elemen inti PjBL (pertanyaan pendorong autentik, investigasi kolaboratif, dan penciptaan artefak) secara inheren mendorong calon guru mempertimbangkan peran teknologi dalam mendukung tujuan pedagogis dan penyampaian konten. Temuan ini memperluas hasil SEM Mansour et al. (2024) di Qatar yang menunjukkan hubungan signifikan antara pendekatan pedagogis dan integrasi TPACK. Nilai effect size yang besar () menunjukkan bahwa PjBL efektif dalam mengembangkan kompetensi integrasi teknologi.

Interpretasi ini sejalan dengan temuan studi intervensi terbaru bahwa penerapan teknologi yang terstruktur dalam pendidikan calon guru IPA meningkatkan TPACK sekaligus orientasi perilaku terhadap penggunaan teknologi di kelas, sehingga menunjukkan bahwa tugas desain pedagogis dapat memperkuat pengetahuan dan kesiapan enactment secara simultan (Stinken-Rosner et al., 2023; Gurer & Akkaya, 2021)

Jalur PjBL STEM yang signifikan (, ) menegaskan bahwa karakter interdisipliner PjBL mendorong aktivasi penalaran STEM. Dalam merancang rencana pembelajaran berbasis PjBL, partisipan perlu mengaitkan konten sains dengan tantangan desain teknik, memanfaatkan teknologi untuk pengumpulan dan analisis data, serta menggunakan penalaran matematis dalam pemecahan masalah. Kesesuaian tuntutan struktural PjBL dengan integrasi STEM menjelaskan kuatnya hubungan tersebut.

Jalur PjBL ESD yang signifikan (, ) merupakan temuan penting yang tidak selaras dengan pola N-Gain. Meskipun ESD menunjukkan N-Gain terendah pada analisis pre–post, model struktural menunjukkan bahwa kualitas implementasi PjBL secara signifikan memprediksi kompetensi ESD pada data posttest. Perbedaan ini dapat dijelaskan karena analisis pre–post menilai peningkatan absolut dari baseline yang lebih rendah, sedangkan SEM menilai hubungan struktural pada posttest. Dengan demikian, PjBL berpengaruh terhadap pengembangan ESD secara struktural, tetapi peningkatan absolutnya dapat terbatas oleh titik awal yang rendah dan jarak pedagogis yang lebih besar antara struktur umum PjBL dan kompetensi spesifik ESD.

Secara keseluruhan, PjBL menjelaskan varians substansial dalam ketiga dimensi integrasi: 52,9% dalam TPACK, 46,6% dalam STEM, dan 38,0% dalam ESD. Nilai moderat hingga substansial ini menunjukkan bahwa PjBL sebagai prediktor eksogen tunggal menangkap porsi bermakna faktor yang memengaruhi kompetensi integrasi. Varians yang belum terjelaskan kemungkinan berasal dari faktor lain (misalnya pengetahuan konten awal, literasi digital, efikasi diri mengajar, keyakinan tentang keberlanjutan, dan keterampilan metakognitif) yang belum dimasukkan dalam model.

* 1. *Dimensi integrasi yang paling responsif (RQ3)*

Analisis komparatif menunjukkan bahwa TPACK merupakan dimensi yang paling kuat dipengaruhi (β=0,727; f²=1,123), disusul STEM (β=0,683; f²=0,872) dan ESD (β=0,617; f²=0,614). Urutan pengaruh (TPACK > STEM > ESD) ditetapkan berdasarkan koefisien jalur dan *effect size* pada model struktural. Ketiga jalur signifikan dengan *effect size* besar, sehingga PjBL dapat dinyatakan efektif dalam mengembangkan ketiga dimensi tersebut, dengan hubungan terkuat pada TPACK.

Secara praktis, urutan ini berimplikasi pada pengembangan kurikulum. Dominannya pengaruh PjBL terhadap integrasi TPACK mengindikasikan bahwa orientasi PjBL yang berbasis teknologi dan berfokus pada penciptaan artefak secara natural mengaktivasi TPACK. Karena itu, program pendidikan guru dapat menjadikan PjBL sebagai strategi utama untuk mengembangkan kompetensi TPACK, sambil menambahkan intervensi pendukung bagi dimensi yang memerlukan penguatan.

Selaras dengan literatur perencanaan pembelajaran, calon guru umumnya berkembang lebih awal pada struktur perencanaan, integrasi alat, dan koherensi disipliner, sedangkan pertimbangan desain yang lebih kompleks (misalnya keadilan atau keberlanjutan) cenderung muncul setelah adanya *scaffolding* tambahan dan siklus umpan balik iteratif (Karlstrom & Hamza, 2021; Beckmann & Ehmke, 2023; Davis & Bautista, 2024).

* 1. *Dimensi sebagai konstituen kualitas rencana pembelajaran integratif (RQ4)*

Ketiga dimensi integrasi berkontribusi signifikan terhadap kualitas rencana pembelajaran integratif, dengan effect size yang secara konsisten besar: STEM (β=0,484, f^2=5,444), TPACK (β=0,425, f^2=2,783), dan ESD (β=0,345, f^2=2,399). Temuan ini mendukung H2 dan menegaskan perencanaan pembelajaran integratif sebagai kompetensi tingkat tinggi yang dibentuk oleh tiga dimensi yang berbeda namun saling melengkapi.

Nilai yang tinggi (seluruhnya >2,5) menunjukkan bahwa setiap dimensi memberikan kontribusi yang substansial dan non-redundan terhadap kualitas rencana pembelajaran. Secara teoretis, hal ini relevan bagi kerangka Teacher Design Capacity (Brown, 2009; McKenney et al., 2015), karena mengindikasikan bahwa kompetensi perencanaan pembelajaran integratif tidak dapat direduksi menjadi satu dimensi saja, melainkan membutuhkan pengembangan terkoordinasi integrasi teknologi, penalaran interdisipliner, dan perspektif keberlanjutan. Dengan demikian, program pendidikan guru yang hanya menekankan satu dimensi—misalnya berfokus eksklusif pada TPACK—tidak memadai untuk membangun kompetensi desain integratif secara utuh.

Argumen tersebut selaras dengan bukti riset perencanaan pembelajaran kontemporer yang memandang kualitas perencanaan calon guru sebagai luaran komposit dari berbagai sumber pengetahuan dan keputusan desain, bukan keterampilan domain tunggal, terutama dalam konteks pendidikan sains (Krepf & Konig, 2022; Tellez-Acosta et al., 2023; Pleasants & Parrish, 2024).

Namun, terdapat catatan metodologis penting. Nilai untuk RPP sebesar 0,977 tergolong sangat tinggi dan kemungkinan mencerminkan sifat komposisional konstruk, karena RPPInt\_total\_post dihitung sebagai rerata skor indikator TPACK, STEM, dan ESD, sehingga ketiga dimensi menjadi prediktor yang hampir sempurna secara konstruksi. Akibatnya, nilai yang besar dan yang tinggi tidak sepenuhnya merepresentasikan hubungan empiris, tetapi juga menangkap keniscayaan matematis. Hal ini tidak meniadakan implikasi konseptual bahwa perencanaan pembelajaran integratif bersifat multidimensi, tetapi koefisien jalur perlu ditafsirkan terutama sebagai konsekuensi operasionalisasi konstruk, bukan semata-mata besaran efek empiris.

* 1. *Peran mediasi dimensi integrasi (RQ5)*

Analisis mediasi mengungkapkan pola mediasi penuh secara agregat: efek tidak langsung total signifikan (, ), sementara efek langsung PjBL terhadap RPP tidak signifikan (, ). Temuan ini mendukung H3 dan menegaskan implikasi teoretis bahwa PjBL tidak meningkatkan kualitas rencana pembelajaran integratif secara langsung, tetapi bekerja melalui peningkatan tiga kompetensi integrasi.

Ketiga jalur mediasi juga signifikan secara statistik:

1. STEM adalah mediator terkuat ( tidak langsung , VAF ), menunjukkan bahwa pengaruh PjBL terhadap kualitas rencana pembelajaran terutama berlangsung melalui pengembangan kompetensi integrasi STEM.
2. TPACK adalah mediator terkuat kedua ( tidak langsung , VAF ), mengindikasikan bahwa integrasi teknologi merupakan saluran penting yang memperkuat perencanaan pembelajaran melalui PjBL.
3. ESD juga merupakan mediator signifikan ( tidak langsung , VAF ), sehingga meskipun peningkatan absolutnya paling rendah pada analisis pre–post, ESD tetap menjadi jalur mediasi yang bermakna dalam model struktural.

Tiga jalur mediasi yang signifikan ini memperluas temuan penelitian sebelumnya yang masih menunjukkan pola mediasi campuran atau parsial. Mediasi penuh mengindikasikan bahwa PjBL memengaruhi kualitas rencana pembelajaran terutama melalui penguatan keterampilan yang spesifik, bukan melalui mekanisme yang bersifat umum dan tidak terarah (Hair et al., 2022). Jalur mediasi ESD juga penting: meskipun ESD membutuhkan scaffolding tambahan untuk memaksimalkan peningkatan absolut (sebagaimana terlihat pada analisis N-Gain), model struktural menegaskan bahwa pengembangan kompetensi ESD merupakan bagian inti dari mekanisme bagaimana PjBL meningkatkan kualitas rencana pembelajaran.

Dalam konteks pembelajaran guru, penjelasan berbasis mekanisme ini sejalan dengan studi tentang perkembangan perencanaan calon guru, yang menunjukkan bahwa dampak intervensi biasanya muncul terlebih dahulu sebagai pergeseran kompetensi antara (misalnya pengetahuan perencanaan, penalaran pedagogis, dan langkah reflektif dalam desain) sebelum tampak pada indikator kualitas perencanaan secara holistik (Karlstrom & Hamza, 2021; Beckmann & Ehmke, 2023).

* 1. *Implikasi teoretis*

Temuan sebelumnya berimplikasi pada pengembangan teori. Pertama, penelitian ini memberikan uji empiris pertama terhadap model struktural yang menempatkan TPACK, STEM, dan ESD sebagai mediator simultan antara PjBL dan kualitas rencana pembelajaran integratif. Mediasi penuh (dengan ketiga jalur yang signifikan) menunjukkan bahwa model kapasitas desain guru perlu merinci jalur komposisional bagaimana intervensi memengaruhi kompetensi desain, bukan memandang kapasitas desain sebagai luaran tunggal dari pengalaman pedagogis (Brown, 2009).

Kedua, penelitian ini menunjukkan bahwa ketiga dimensi integrasi dipengaruhi secara signifikan oleh PjBL, sehingga menantang asumsi bahwa sebagian dimensi (misalnya ESD) kurang dapat dikembangkan melalui PjBL. Koefisien jalur yang kuat (seluruh β>0,6) dan effect size yang besar () menegaskan bahwa PjBL dapat menjadi intervensi komprehensif untuk mengembangkan berbagai kompetensi integrasi secara bersamaan.

Ketiga, penelitian ini memvalidasi perencanaan pembelajaran integratif sebagai konstruk yang dibentuk oleh (bukan sekadar berkorelasi dengan) kompetensi TPACK, STEM, dan ESD. Signifikansi konsisten dan effect sizes besar pada ketiga jalur dimensional memperkuat dasar empiris bagi konseptualisasi konstruk tingkat tinggi.

Temuan ini selaras dengan studi terbaru tentang keberlanjutan lintas-kurikuler dalam pendidikan guru, yang menegaskan bahwa kualitas perencanaan holistik muncul ketika logika teknologi, disiplin, dan keberlanjutan dirancang secara simultan, bukan secara berurutan (Ozdemir-Yilmazer, 2025; Vidal & Kuckuck, 2025).

* 1. *Implikasi praktis*

Selain kontribusi teoretis, temuan penelitian ini memberikan rekomendasi praktis bagi program pendidikan guru (Lembaga Pendidikan Tenaga Kependidikan, LPTK). Pertama, PjBL perlu diadopsi sebagai strategi pedagogis inti pada mata kuliah persiapan guru IPA karena terbukti meningkatkan tiga kompetensi integrasi dengan effect size yang besar. Hubungan struktural yang kuat (β>0,6 pada seluruh dimensi) menegaskan bahwa PjBL efektif untuk mengembangkan kompetensi TPACK, STEM, dan ESD.

Kedua, meskipun PjBL efektif pada semua dimensi, analisis N-Gain menunjukkan peningkatan absolut ESD paling rendah. Karena itu, PjBL perlu dilengkapi scaffolding ESD yang eksplisit untuk mengoptimalkan pengembangan ESD, misalnya melalui pertanyaan pendorong berfokus keberlanjutan, refleksi terstruktur terkait koneksi SDG, atau kriteria desain ESD khusus dalam proses PjBL.

Ketiga, asesmen berbasis rubrik dalam penelitian ini menyediakan instrumen praktis untuk menilai kualitas rencana pembelajaran integratif calon guru. Rubrik 14 indikator (TPACK (7 item), STEM (4 item), dan ESD (3 item)) dapat diadopsi atau disesuaikan untuk menilai kompetensi desain multidimensi melalui tugas kinerja autentik, bukan ukuran laporan diri.

Keempat, hasil mediasi menunjukkan bahwa ketiga dimensi integrasi merupakan jalur yang diperlukan bagi PjBL dalam meningkatkan kualitas rencana pembelajaran. Oleh karena itu, pendidik guru perlu memastikan aktivitas PjBL mencakup ketiga dimensi tersebut, bukan hanya satu atau dua dimensi.

Secara praktis dalam desain kurikulum, hal ini berarti brief proyek, template perencanaan, dan rubrik umpan balik harus secara eksplisit menuntut bukti keselarasan teknologi–pedagogi, koherensi STEM interdisipliner, serta penalaran keberlanjutan pada setiap prototipe pembelajaran (Pitot et al., 2024; Tellez-Acosta et al., 2023; Portillo-Blanco et al., 2025).

* 1. *Kontribusi*

Kontribusi utama penelitian ini adalah menyajikan uji empiris pertama atas model struktural yang secara simultan menempatkan TPACK, STEM, dan ESD sebagai mediator antara PjBL dan kualitas rencana pembelajaran integratif. Temuan bahwa ketiga jalur tersebut berperan sebagai mediator signifikan memperkuat kerangka *Teacher Design Capacity* dengan memperjelas jalur komposisional yang menjelaskan bagaimana intervensi pedagogis diterjemahkan menjadi kompetensi desain. Berbeda dari studi sebelumnya yang menyatakan bahwa beberapa dimensi (misalnya, ESD) kurang responsif terhadap pengembangan berbasis PjBL, penelitian ini menunjukkan bahwa PjBL berpengaruh signifikan terhadap ketiga dimensi dengan *effect size* besar; namun, analisis N-Gain mengindikasikan bahwa ESD masih memerlukan *scaffolding* tambahan untuk mengoptimalkan peningkatan absolut.

* 1. *Keterbatasan*

Beberapa keterbatasan membatasi interpretasi dan generalisasi temuan.

Konstruk RPP Integratif diukur dengan indikator tunggal (RPPInt\_total\_post), yaitu rata-rata aritmatika skor TPACK, STEM, dan ESD. Pendekatan komposit ini berpotensi menghasilkan nilai R² yang tinggi secara mekanistis (0,977) pada konstruk RPP. Alternatif yang lebih ketat adalah penilaian holistik independen terhadap kualitas RPP oleh evaluator eksternal.

Partisipan berasal dari satu institusi pendidikan guru sehingga temuan sulit digeneralisasi ke konteks institusional dan budaya lain. Ukuran sampel (N = 95) memang melampaui syarat minimum PLS-SEM, tetapi masih moderat untuk kompleksitas model. Replikasi pada berbagai institusi dan sampel yang lebih besar diperlukan untuk memperkuat bukti.

Walaupun PjBL berpengaruh signifikan pada ketiga dimensi, analisis N-Gain menunjukkan peningkatan ESD relatif lebih kecil secara absolut. Intervensi yang lebih panjang dengan scaffolding ESD yang eksplisit berpotensi meningkatkan kompetensi ESD secara lebih kuat.

Keterbatasan tersebut sejalan dengan literatur ESD pada pendidikan guru: intervensi jangka pendek umumnya meningkatkan awareness dan niat perencanaan, sedangkan action competence ESD yang lebih mendalam biasanya memerlukan persiapan yang lebih panjang, iteratif, dan tertanam dalam konteks (Singh-Pillay, 2023; Vidal & Kuckuck, 2025).

Meski demikian, penelitian ini tetap memberikan uji model integratif yang koheren dan berbasis empiris. Konsistensi temuan pre–post (RQ1) dan SEM (RQ2–RQ5) memperkuat keyakinan terhadap pola hasil, terutama bahwa PjBL mempengaruhi ketiga dimensi integrasi secara signifikan melalui mekanisme mediasi penuh.

* 1. *Arah masa depan*

Penelitian selanjutnya perlu mengatasi keterbatasan studi ini melalui penyempurnaan metodologis. Pertama, replikasi multi-situs pada beragam konteks institusional dan budaya diperlukan untuk meningkatkan generalisabilitas. Kedua, intervensi yang lebih panjang disertai scaffolding ESD terarah (misalnya pertanyaan pendorong berfokus keberlanjutan dan refleksi SDG yang terstruktur) berpotensi menghasilkan peningkatan absolut kompetensi ESD yang lebih besar.

Selain itu, studi metode campuran yang memadukan data kualitatif (seperti wawancara dan observasi kelas) dapat memberi pemahaman yang lebih mendalam mengenai mekanisme PjBL dalam membentuk pemikiran desain integratif. Studi longitudinal yang menelusuri retensi kompetensi integratif setelah periode intervensi juga akan memperkuat bukti tentang kontribusi PjBL dalam mempersiapkan calon guru IPA.

1. **Conclusion**

Penelitian ini menyelidiki pengaruh *Project-Based Learning* terhadap kompetensi calon guru IPA dalam merencanakan pembelajaran integratif. Pembelajaran integratif yang dimaksud, didefinisikan sebagai integrasi simultan dimensi TPACK, STEM, dan ESD dalam desain rencana pembelajaran. Analisis dilakukan menggunakan uji berpasangan, N-Gain, dan PLS-SEM untuk menjawab lima pertanyaan penelitian (RQ1–RQ5) serta menguji tiga hipotesis (H1–H3). Ringkasan temuan utama adalah sebagai berikut.

RQ1: Keempat konstruk (TPACK, STEM, ESD, dan kualitas rencana pembelajaran integratif) meningkat secara signifikan setelah intervensi PjBL, dengan *effect sizes* yang konsisten besar dan nilai N-Gain pada kategori Sedang. TPACK dan STEM menunjukkan respons peningkatan paling tinggi. Sebaliknya, ESD memiliki N-Gain paling rendah, tidak ada partisipan yang mencapai kategori N-Gain Tinggi, dan 28,4% partisipan tetap berada pada kategori Rendah.

RQ2: Analisis PLS-SEM menunjukkan bahwa PjBL secara signifikan memprediksi ketiga dimensi integrasi (TPACK, STEM, dan ESD), semuanya dengan *effect sizes* besar. Dengan demikian, H1 didukung sepenuhnya.

RQ3: Dari ketiga dimensi, TPACK adalah yang paling kuat dipengaruhi oleh PjBL, disusul STEM dan kemudian ESD. Urutan pengaruh (TPACK > STEM > ESD) ditetapkan berdasarkan koefisien jalur dan *effect sizes*. Temuan ini menunjukkan bahwa karakter PjBL yang berorientasi teknologi dan menekankan penciptaan artefak lebih efektif dalam menguatkan *technological pedagogical content knowledge*.

RQ4: Ketiga dimensi integrasi berkontribusi signifikan terhadap kualitas rencana pembelajaran integratif dengan *effect sizes* besar, yaitu STEM, TPACK, dan ESD. Oleh karena itu, H2 didukung, sekaligus memperkuat konseptualisasi perencanaan pembelajaran integratif sebagai konstruk tingkat tinggi.

RQ5: PjBL tidak berpengaruh langsung terhadap kualitas rencana pembelajaran, tetapi berpengaruh melalui peningkatan tiga kompetensi integrasi. Tiga jalur mediasi yang signifikan adalah melalui STEM, TPACK, dan ESD. Secara keseluruhan, efek tidak langsung tergolong kuat, sedangkan efek langsung tidak signifikan; sehingga H3 didukung sepenuhnya.

Sebagai penutup, penelitian ini memberikan bukti yang robust bahwa PjBL efektif dalam meningkatkan kompetensi calon guru IPA dalam merancang pembelajaran integratif. Temuan mediasi penuh melalui jalur TPACK, STEM, dan ESD tidak hanya memperdalam pemahaman teoretis tentang bagaimana intervensi pedagogis berubah menjadi kompetensi desain, tetapi juga memberikan arahan praktis bagi program pendidikan guru dalam membangun keterampilan integrasi multidimensional pada calon guru IPA.

**Acknowledgements**

The author(s) express gratitude to the students who were involved in this study.

**Funding Statement**

This research was funded by Universitas Negeri Semarang Budget Implementation List (DIPA), Number: T/237/UN37/HK.02/2024.

**CRediT authorship contribution** **statement**

**Novi Ratna Dewi**: Conceptualization, Writing – original draft, Methodology, Investigation, Formal analysis, Writing – review & editing, Supervision. **Rizki Nor Amelia**: Investigation, Data curation, Writing – review & editing, Project administration. **Septiko Aji**: Data curation, Visualization. **Ismail Okta Kurniawan**: Data curation, Software.

**Declaration of generative AI and AI-assisted technologies in the writing process**

During the preparation of this work, the author used ChatGPT (OpenAI) to expand the search for relevant references from their existing collection, DeepL to translate text from Indonesian to English, and Grammarly to improve language and readability. After using this tool, the author reviewed and edited the content as needed and takes full responsibility for the content of the publication.

References

Akbulut, M. Ş., & Öner, D. (2021). Developing pre-service teachers’ technology competencies: A project-based learning experience. *Çukurova Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi, 50*(1), 240–260. https://dergipark.org.tr/en/pub/cuefd/issue/59484/753044

Bell, S. (2010). Project-based learning for the 21st century: Skills for the future. *The Clearing House: A Journal of Educational Strategies, Issues and Ideas, 83*(2), 39–43. https://doi.org/10.1080/00098650903505415

Brown, M. W. (2009). The teacher-tool relationship: Theorizing the design and use of curriculum materials. In J. T. Remillard, B. A. Herbel-Eisenmann, & G. M. Lloyd (Eds.), *Mathematics teachers at work: Connecting curriculum materials and classroom instruction* (pp. 17–36). Routledge. https://doi.org/10.4324/9780203884645-11

Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2nd ed.). Lawrence Erlbaum Associates.

Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2018). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (5th ed.). SAGE Publications.

Dewi, N. R., Rusilowati, A., Saptono, S., & Haryani, S. (2022). Project-based scaffolding TPACK model to improve learning design ability and TPACK of pre-service science teachers. *Jurnal Pendidikan IPA Indonesia, 11*(3), 439–451. https://doi.org/10.15294/jpii.v11i3.38566

Gumbi, N. M., Sibaya, D., & Chibisa, A. (2024). Exploring pre-service teachers’ perspectives on the integration of digital game-based learning for sustainable STEM education. *Sustainability, 16*(3), Article 1314. https://doi.org/10.3390/su16031314

Hair, J. F., Hult, G. T. M., Ringle, C. M., & Sarstedt, M. (2022). *A primer on partial least squares structural equation modeling (PLS-SEM)* (3rd ed.). SAGE Publications.

Hake, R. R. (1998). Interactive-engagement versus traditional methods: A six-thousand-student survey of mechanics test data for introductory physics courses. *American Journal of Physics, 66*(1), 64–74. https://doi.org/10.1119/1.18809

Henseler, J., Ringle, C. M., & Sarstedt, M. (2015). A new criterion for assessing discriminant validity in variance-based structural equation modeling. *Journal of the Academy of Marketing Science, 43*(1), 115–135. https://doi.org/10.1007/s11747-014-0403-8

Kelley, T. R., & Knowles, J. G. (2016). A conceptual framework for integrated STEM education. *International Journal of STEM Education, 3*, Article 11. https://doi.org/10.1186/s40594-016-0046-z

Krajcik, J. S., & Shin, N. (2014). Project-based learning. In R. K. Sawyer (Ed.), *The Cambridge handbook of the learning sciences* (2nd ed., pp. 275–297). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9781139519526.018

Mansour, N., Said, Z., Çevik, M., & Abu-Tineh, A. (2024). Science and mathematics teachers’ integration of TPACK in STEM subjects in Qatar: A structural equation modeling study. *Education Sciences, 14*(10), Article 1138. https://doi.org/10.3390/educsci14101138

McKenney, S., Kali, Y., Markauskaite, L., & Voogt, J. (2015). Teacher design knowledge for technology enhanced learning: An ecological framework for investigating assets and needs. *Instructional Science, 43*(2), 181–202. https://doi.org/10.1007/s11251-014-9337-2

Mishra, P., & Koehler, M. J. (2006). Technological pedagogical content knowledge: A framework for teacher knowledge. *Teachers College Record, 108*(6), 1017–1054. https://doi.org/10.1177/016146810610800610

Novallyan, D., & Nehru. (2025). Optimization of teaching profession courses through project methods: Impact on biology education students. *International Journal of Education, Technology, and Science, 4*(2), 431. https://doi.org/10.57092/ijetz.v4i2.431

Offermann, L. R., Pham, H. T., Baskerville, K. A., & Langkamer, K. L. (2025). Technological pedagogical content knowledge (TPACK) among educators: A meta-analytic review. *Frontiers in Psychology, 16*, Article 1656795. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2025.1656795

Preacher, K. J., & Hayes, A. F. (2008). Asymptotic and resampling strategies for assessing and comparing indirect effects in multiple mediator models. *Behavior Research Methods, 40*(3), 879–891. https://doi.org/10.3758/BRM.40.3.879

Purwianingsih, W., Novidsa, I., & Riandi, R. (2022). Program for integrating education for sustainable development (ESD) into prospective biology teachers’ technological pedagogical content knowledge (TPACK). *Jurnal Pendidikan IPA Indonesia, 11*(2), 298–312. https://doi.org/10.15294/jpii.v11i2.34772

Salleh, M. F. M., Awang, M. I., & Aziz, N. A. A. (2025). How pre-service science teachers develop TPACK competence: A systematic literature review. *Jurnal Pendidikan IPA Indonesia, 14*(1), 168–179. https://doi.org/10.15294/jpii.v14i1.16819

Shulman, L. S. (1986). Those who understand: Knowledge growth in teaching. *Educational Researcher, 15*(2), 4–14. https://doi.org/10.3102/0013189X015002004

Shumba, O., & Kampamba, R. (2013). Mainstreaming ESD into science teacher education courses: A case for ESD pedagogical content knowledge and learning as connection. *Southern African Journal of Environmental Education, 29*, 151–166. https://www.ajol.info/index.php/sajee/article/view/122267

Tucker, S. I., Lommatsch, C. W., Burroughs, E. A., & Yopp, D. (2024). Examining STEM integration in elementary mathematics methods courses. *Journal of Research in STEM Education, 10*(SI), Article 313. https://doi.org/10.31756/jrsmte.313si

Beckmann, T., & Ehmke, T. (2023). Informal and formal lesson planning in school internships: Practices among pre-service teachers. *Teaching and Teacher Education, 132*, 104249. https://doi.org/10.1016/j.tate.2023.104249

Benedict-Chambers, A., & Sherwood, C.-A. (2024). Planning for equitable student sensemaking: An examination of preservice teachers’ noticing of elementary science lesson plans. *Journal of Science Teacher Education, 35*(8), 862-882. https://doi.org/10.1080/1046560X.2024.2356944

Davis, E. A., & Bautista, J. (2024). Preservice teachers’ early lesson planning for justice-oriented elementary science. *Journal of Science Teacher Education, 36*(4), 485-510. https://doi.org/10.1080/1046560X.2024.2428489

Calero, M., Pina, T., Mayoral, O., Canto, J., Ull, M. A., & Vilches, A. (2024). A study about pre-service teachers’ knowledge of the Sustainable Development Goals. *International Journal of Sustainability in Higher Education, 26*(2), 352-371. https://doi.org/10.1108/IJSHE-07-2023-0284

Gurer, M. D., & Akkaya, R. (2021). The influence of pedagogical beliefs on technology acceptance: A structural equation modeling study of pre-service mathematics teachers. *Journal of Mathematics Teacher Education, 25*(4), 479-495. https://doi.org/10.1007/s10857-021-09504-5

Karlstrom, M., & Hamza, K. M. (2021). How do we teach planning to pre-service teachers - A tentative model. *Journal of Science Teacher Education, 32*(6), 664-685. https://doi.org/10.1080/1046560X.2021.1875163

Krepf, M., & Konig, J. (2022). Structuring the lesson: An empirical investigation of pre-service teacher decision-making during the planning of a demonstration lesson. *Journal of Education for Teaching, 49*(5), 911-926. https://doi.org/10.1080/02607476.2022.2151877

Mansfield, J. (2022). Supporting the development of pre-service teachers’ pedagogical knowledge about planning for practical work. *Journal of Science Teacher Education, 34*(3), 225-247. https://doi.org/10.1080/1046560X.2022.2042979

Markula, A., & Aksela, M. (2022). The key characteristics of project-based learning: How teachers implement projects in K-12 science education. *Disciplinary and Interdisciplinary Science Education Research, 4*(1). https://doi.org/10.1186/s43031-021-00042-x

Ozdemir-Yilmazer, M. (2025). Towards a holistic understanding of sustainable development in teacher education: Insights from pre-service teachers’ cross-curricular lesson planning. *European Journal of Education, 60*(4). https://doi.org/10.1111/ejed.70229

Pitot, L. N., McHugh, M. L., & Kosiak, J. (2024). Establishing a PBL STEM framework for pre-service teachers. *Education Sciences, 14*(6), 571. https://doi.org/10.3390/educsci14060571

Pleasants, J., & Parrish, J. (2024). What makes this lesson engineering? What makes it science? Examining the thought processes of pre-service elementary teachers. *Journal of Science Teacher Education, 36*(2), 159-179. https://doi.org/10.1080/1046560X.2024.2380188

Portillo-Blanco, A., Zuza, K., Gutierrez-Jimenez, E., Guisasola, J., & Gutierrez-Berraondo, J. (2025). Building an autonomous car: Designing, implementing, and evaluating an integrated STEM teaching-learning sequence for pre-service secondary teachers. *Education Sciences, 15*(4), 406. https://doi.org/10.3390/educsci15040406

Singh-Pillay, A. (2023). Pre-service teachers’ experience of learning about sustainability in technology education in South Africa. *Sustainability, 15*(3), 2149. https://doi.org/10.3390/su15032149

Stinken-Rosner, L., Hofer, E., Rodenhauser, A., & Abels, S. (2023). Technology implementation in pre-service science teacher education based on the transformative view of TPACK: Effects on pre-service teachers’ TPACK, behavioral orientations and actions in practice. *Education Sciences, 13*(7), 732. https://doi.org/10.3390/educsci13070732

Tellez-Acosta, M. E., Acher, A., & McDonald, S. P. (2023). Pre-service elementary teachers learning to plan modeling-based investigations. *Journal of Science Teacher Education, 35*(3), 276-301. https://doi.org/10.1080/1046560X.2023.2256563

Vidal, S., & Kuckuck, M. (2025). Pre-service teacher action competence in education for sustainable development: A scoping review. *Sustainability, 17*(9), 3856. https://doi.org/10.3390/su17093856

Yuksel, A. O. (2025). Design-based STEM activities in teacher education and its effect on pre-service science teachers’ design thinking skills. *Journal of Science Education and Technology*. https://doi.org/10.1007/s10956-025-10215-2

Wu, B., Peng, X., & Hu, Y. (2021). How to foster pre-service teachers’ STEM learning design expertise through virtual internship: A design-based research. *Educational Technology Research and Development, 69*(6), 3307-3329. https://doi.org/10.1007/s11423-021-10063-y

UNECE. (2012). *Learning for the future: Competences in education for sustainable development* (ECE/CEP/AC.13/2012/6). United Nations Economic Commission for Europe. https://unece.org/fileadmin/DAM/env/esd/ESD\_Publications/Competences\_Publication.pdf

UNESCO. (2017). *Education for Sustainable Development Goals: Learning objectives*. UNESCO Publishing. https://doi.org/10.54675/CGBA9153