

How Project-Based Learning Enhances Pre-Service Science Teachers' Integrative Lesson Planning Competence: A Structural Equation Modeling Approach

Novi Ratna Dewi^{a,*}, Rizki Nor Amelia^a, Septiko Aji^a, Ismail Okta Kurniawan^b

^aFaculty of Mathematics and Natural Sciences, Universitas Negeri Semarang, Central Java, Indonesia

^bDirectorate of Information System and Public Relation, Universitas Negeri Semarang, Central Java, Indonesia

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 besar: TPACK ($\beta = 0,727$; $p < 0,001$; $f^2 = 1,123$), STEM ($\beta = 0,683$; $p < 0,001$; $f^2 = 0,872$), dan ESD ($\beta = 0,617$; $p < 0,001$; $f^2 = 0,614$). Ketiga dimensi berkontribusi signifikan terhadap kualitas RPP integratif dengan ukuran efek besar. Pola full mediation teramat: PjBL memengaruhi kualitas RPP melalui peningkatan kompetensi integrasi, dengan efek tidak langsung signifikan melalui STEM ($\beta = 0,330$), TPACK ($\beta = 0,309$), dan ESD ($\beta = 0,213$); total indirect effect substansial ($\beta = 0,852$; $p < 0,001$) 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.

Keywords: 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 and Knowles, 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* (Brown, 2009). Kapasitas ini bukan sekadar kumpulan keterampilan yang berdiri sendiri, melainkan kompetensi yang muncul (emergen) yang menuntut guru mengintegrasikan berbagai jenis pengetahuan secara simultan citempckenney2015teacherdesign. 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 citempishra2006technologicalpedagogical. Kajian selanjutnya memperluas logika integratif tersebut ke pendidikan STEM, di mana perancangan pembelajaran yang efektif menuntut penggabungan yang disengaja antara inkuiри ilmiah, pemanfaatan teknologi,

*Corresponding author

Email address: noviratnadewi@mail.unnes.ac.id (Novi Ratna Dewi)

desain rekayasa, dan penalaran matematis
citepkelley2016aconceptual,pitot2024establishinga,portilloblanco2025buildingan. 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

citeppurwianingsih2022programfor,unesco2017item,vidal2025preservice.

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

citeptucker2024examiningstem,mansour2024scienceand dan, meski lebih terbatas, kemampuan pedagogis ESD
citeppurwianingsih2022programfor,vidal2025preservice. 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

citepkrajcik2014item. Sejumlah studi menunjukkan bahwa PjBL efektif meningkatkan kompetensi tersebut secara terpisah, misalnya peningkatan TPACK melalui scaffolding PjBL

citepdewi2022projectbased dan peningkatan kualitas desain unit STEM interdisipliner pada calon guru

citeppitot2024establishinga,portilloblanco2025buildingan. 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*

citepbrown2009item 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.

2. Literature review

2.1. 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
citepkrajcik2014item. Elemen kunci PjBL mencakup pertanyaan pendorong berbasis masalah dunia nyata, inkuiri melalui penelitian, kolaborasi, produksi artefak yang dibagikan secara publik, dan refleksi terstruktur

citepbell2010projectbased,krajcik2014item. Sejumlah studi mendukung efektivitasnya dalam meningkatkan kompetensi calon guru, termasuk TPACK dan kemampuan desain pembelajaran melalui scaffolding citepdewi2022projectbased, kompetensi pedagogis melalui pembelajaran proyek citepnovallyan2025optimizationof, serta kompetensi terkait teknologi citepakbulut2021developingpre. Temuan lain menunjukkan PjBL/PBL cenderung memperkuat kolaborasi, produksi artefak, dan praktik inkuiiri, meski elemen seperti pertanyaan pendorong yang sepenuhnya dihasilkan siswa masih menantang citepmarkula2022thekey, dan penelitian terbaru juga melaporkan peningkatan pada kualitas desain unit STEM interdisipliner serta design thinking calon guru citeppitot2024establishinga,portilloblanco2025buildingan,yuksel2025designbased. 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.

2.2. Technological pedagogical content knowledge (tpack)

Kerangka TPACK yang diperkenalkan oleh Mishra and 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 citepoffermann2025technologicalpedagogical; Sejumlah studi SEM terbaru menunjukkan keterkaitan TPACK dengan konstruk lain: citetmansour2024scienceand menemukan hubungan signifikan antara komponen TPACK dan efikasi pengajaran STEM, citetsalleh2025howpre menegaskan peran pengetahuan konten dan efikasi diri teknologi sebagai prediktor, dan citetstinkenrosner2023technologyimplementation 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.

2.3. 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 citepkelley2016aconceptual. Perbedaan antara STEM yang diajarkan terpisah per disiplin dan STEM integrative berdampak langsung pada desain rencana pembelajaran. citetkelley2016aconceptual menawarkan kerangka STEM terintegrasi yang menekankan pembelajaran situated, desain teknik sebagai strategi pedagogis, inkuiiri 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 (citeptucker2024examiningstem) yang dapat diperkuat melalui perencanaan kolaboratif lintas mata kuliah dan integrasi eksplisit engineering design dalam kerangka PBL-STEM citeppitot2024establishinga,portilloblanco2025buildingan, serta latihan desain berkelanjutan berbasis umpan balik citepwu2021howto. 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.

2.4. 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 citepunesco2017item. Dalam pendidikan guru IPA, ESD menuntut kompetensi yang melampaui pedagogi IPA tradisional, yaitu kemampuan mengaitkan konsep ilmiah dengan isu keberlanjutan (ESD-PCK), menerapkan pendekatan inkuiiri untuk mengkaji persoalan lingkungan dan sosial (ESD-INQ), serta menumbuhkan pemikiran evaluatif terhadap dilema sosio-ilmiah dan berbagai trade-off (ESD-EVA) citepunece2012item.

Sejumlah studi menunjukkan upaya integrasi ESD pada pendidikan calon guru, misalnya program citetpurwianingsih2022programfor yang mengintegrasikan ESD ke dalam TPACK calon guru biologi.

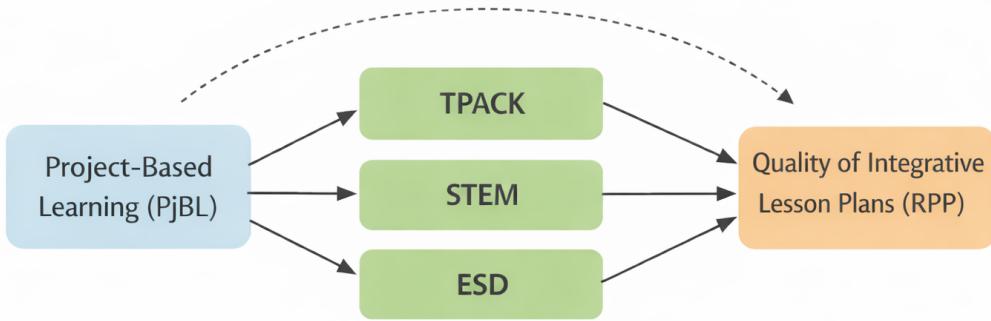


Figure 1: Model struktural yang dihipotesiskan

citetshumba2013mainstreamingsd 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

citepvidal2025preservice,singhpillary2023preservice. Temuan lain menunjukkan pengetahuan SDG calon guru pada pelatihan awal juga sering terbatas, sehingga dukungan kurikuler ESD yang eksplisit tetap diperlukan

citepcalero2024astudy; implikasinya, kompetensi ESD kemungkinan memerlukan scaffolding yang lebih intensif atau lebih panjang, dan responsnya terhadap intervensi PjBL jangka pendek dapat berbeda.

2.5. 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.

citetbrown2009item 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.

citetmckenney2015teacherdesign 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 dipersepsi.

2.6. 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 inkuiри secara alami memerlukan mobilisasi teknologi untuk pedagogi spesifik konten citepdewi2022projectbased.
2. PjBL -> STEM: Pertanyaan pendorong autentik PjBL biasanya mencakup berbagai disiplin STEM, memerlukan pemikiran desain interdisipliner citepkrajcik2014item.

3. PjBL -> ESD: Fokus PjBL pada masalah dunia nyata menciptakan peluang untuk mengatasi isu keberlanjutan, meskipun kekuatan tautan ini mungkin bergantung pada scaffolding eksplisit
citepurwianingsih2022programfor.
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
citebrown2009item,mckenney2015teacherdesign.
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.

3. Methods

3.1. Desain penelitian

Penelitian ini menerapkan desain pra-eksperimental satu kelompok pretest-posttest
citepcreswell2018item. 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.

3.2. 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;
citethair2022item merekomendasikan minimal 10 kali jumlah maksimum jalur struktural yang menuju satu konstruk (pada model ini, empat jalur menuju konstruk RPP, sehingga minimum 40).

3.3. 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
citetkrajcik2014item: (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.

3.4. Instrumen

3.5. 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:

- a. TPACK (7 indikator): TK, PK, CK, TPK, TCK, PCK, TPACK integratif.
- b. STEM (4 indikator): Integrasi konten Sains (S), Aplikasi Teknologi (T), Proses desain Teknik/Engineering (E), dan Penalaran Matematis (M).
- c. 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.

3.6. 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.

3.7. 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.

3.8. Analisis data

Analisis data berlangsung dalam dua fase.

a. 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 $\alpha = 0,05$); Effect sizes (Cohen's d untuk uji parametrik dan korelasi rank-biserial r untuk uji non-parametrik). Effect sizes diinterpretasikan mengikuti citetcohen1988item: kecil ($d = 0,2$), sedang ($d = 0,5$), dan besar ($d = 0,8$). Normalized gain (N-Gain) dihitung menggunakan formula citethake1998interactiveengagement: $N\text{-Gain} = \frac{post-pre}{max-pre}$, di mana max = 4 (skor rubrik maksimum). Nilai N-Gain dikategorikan sebagai Tinggi ($> 0,7$), Sedang ($0,3-0,7$), atau Rendah ($< 0,3$). Seluruh analisis Fase 1 dilakukan di Python 3.11 menggunakan pandas, scipy, dan pingouin.

b. 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 ($N = 95$); dan (d) kapasitas PLS-SEM untuk menangani data non-normal dan pengukuran formatif citephair2022item.

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 citephair2022item:

- a. Reliabilitas indikator: outer loadings $\geq 0,708$ (indikator antara 0,40 dan 0,70 dipertahankan jika penghapusannya tidak meningkatkan AVE atau CR, mengikuti rekomendasi citethair2022item untuk penelitian eksploratori).
- b. Validitas konvergen: Average Variance Extracted (AVE) $\geq 0,50$.
- c. Reliabilitas konsistensi internal: Composite Reliability (CR) $\geq 0,70$ dan Cronbach's $\alpha \geq 0,70$.
- d. Validitas diskriminan: rasio Heterotrait-Monotrait (HTMT) $< 0,90$ citephenseler2015anew, dilengkapi dengan kriteria Fornell-Larcker.

Evaluasi model struktural. Model inner (struktural) dinilai melalui: Koefisien jalur (β); Signifikansi statistic; Koefisien determinasi (R^2); Effect size (f^2); Relevansi prediktif (Q^2)

Analisis komparatif (RQ3). Pengaruh relatif PjBL terhadap setiap dimensi integrasi dinilai dengan membandingkan koefisien jalur dan nilai f^2 terkait.

Analisis mediasi (RQ5). Efek tidak langsung dihitung sebagai produk koefisien jalur penyusun. Signifikansi statistik efek tidak langsung ditentukan melalui metode confidence interval bootstrap

citeppreacher2008asymptoticand: 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:

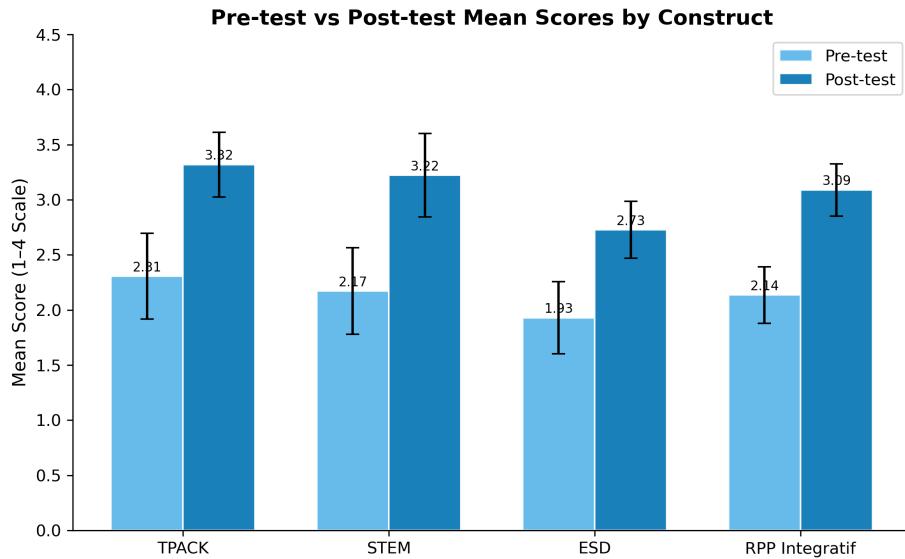


Figure 2: Gambar 2. Perbandingan Skor Rata-rata Pre-test vs Post-test per Konstruk

mediasi penuh ($VAF > 80\%$), mediasi parsial ($20\% < VAF < 80\%$), atau tanpa mediasi ($VAF < 20\%$) citephair2022item.

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

4. Results

4.1. 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	N	Pre M	Pre SD	Post M	Post SD	M _{diff}
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 M_{diff}). Perbedaan rata-rata terbesar diamati pada STEM, diikuti TPACK, RPP Integratif, dan ESD.

4.2. RM1: Perubahan pre-post

4.3. 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	W	p	Normal
TPACK	0,968	,020	Tidak
STEM	0,977	,088	Ya
ESD	0,990	,704	Ya

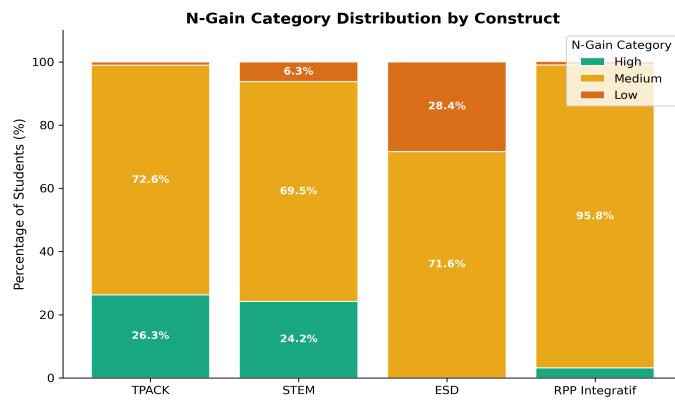


Figure 3: Gambar 3. Distribusi kategori N-Gain setiap konstruk

Konstruk	W	p	Normal
RPP Integratif	0,986	,418	Ya

Sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2, skor selisih untuk STEM, ESD, dan RPP Integratif terdistribusi normal ($p > ,05$). 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	p	Cohen's d	Interpretasi
TPACK	Wilcoxon	$W = 0,0$	<,001	2,705	Besar
STEM	Paired t	$t(94) = 25,90$	<,001	2,657	Besar
ESD	Paired t	$t(94) = 22,79$	<,001	2,338	Besar
RPP Integratif	Paired t	$t(94) = 40,88$	<,001	4,194	Besar

Sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 3, keempat konstruk menunjukkan peningkatan signifikan secara statistik dari pretest ke posttest ($p < ,001$). Ukuran efek seragam besar, dengan nilai Cohen's d melebihi 2,3 untuk seluruh konstruk.

4.4. Normalized gain

Proporsi peningkatan maksimum yang dapat dicapai diukur menggunakan normalized gain (N-Gain). Tabel 4 menyajikan ringkasan N-Gain, sementara Gambar 3. memvisualisasikan distribusi kategori gain.

Tabel 4. Ringkasan N-Gain

Konstruk	N-Gain M	SD	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 (0,3–0,7). TPACK memperoleh rata-rata N-Gain tertinggi, diikuti STEM, RPP Integratif, dan ESD.

Gambar 3. 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.

4.5. RM2–RM5: Analisis PLS-SEM

4.6. 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	$\geq 0,708$
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 citethair2022item 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 $\geq 0,50$, CR $\geq 0,70$, alpha $\geq 0,70$. 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 $< 0,90$, mendukung validitas diskriminan.

4.7. 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		β	SE	t	p	CI 95%	Sig.	f^2
PjBL → TPACK	0,727	0,055	13,295	<,001		[0,610; 0,823]	Ya	1,123 (Big)
PjBL → STEM	0,683	0,054	12,616	<,001		[0,573; 0,782]	Ya	0,872 (Big)
PjBL → ESD	0,617	0,065	9,496	<,001		[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	<,001		[0,345; 0,491]	Ya	2,783 (Big)
STEM → RPP	0,484	0,037	13,116	<,001		[0,412; 0,556]	Ya	5,444 (Big)
ESD → RPP	0,345	0,040	8,355	<,001		[0,264; 0,423]	Ya	2,399 (Big)

Sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 7, PjBL memberikan efek positif signifikan terhadap ketiga dimensi integrasi: TPACK ($\beta = 0,727$, $p <,001$, $f^2 = 1,123$), STEM ($\beta = 0,683$, $p <,001$, $f^2 = 0,872$), dan ESD ($\beta = 0,617$, $p <,001$, $f^2 = 0,614$). Seluruh ukuran efek besar. Penting dicatat, jalur langsung dari PjBL ke RPP tidak signifikan ($\beta = 0,030$, $p = ,441$), menunjukkan bahwa PjBL tidak langsung mempengaruhi kualitas RPP tetapi bekerja melalui konstruk mediator.

Model menjelaskan 97,7% varians RPP ($R^2 = 0,977$), 52,9% TPACK ($R^2 = 0,529$), 46,6% STEM ($R^2 = 0,466$), dan 38,0% ESD ($R^2 = 0,380$). Relevansi prediktif (Q^2) 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.

4.8. 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	β	t	p	f^2	Signifikan
1	TPACK	0,727	13,295	<,001	1,123	Ya
2	STEM	0,683	12,616	<,001	0,872	Ya
3	ESD	0,617	9,496	<,001	0,614	Ya

Sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 8, TPACK muncul sebagai dimensi paling responsif ($\beta = 0,727$, $f^2 = 1,123$), diikuti STEM ($\beta = 0,683$, $f^2 = 0,872$) dan ESD ($\beta = 0,617$, $f^2 = 0,614$). Seluruh jalur signifikan dengan ukuran efek besar, menghasilkan urutan: TPACK > STEM > ESD.

4. Higher-Order Construct: Dimensi yang Berkontribusi terhadap Kualitas RPP (RM4)

RM4 fokus pada bagaimana dimensi-dimensi ini berkontribusi terhadap kualitas RPP integratif. Gambar 5. mengilustrasikan model struktural lengkap dengan jalur dari PjBL melalui konstruk mediator ke RPP.

Gambar 5. Prediktor kualitas RPP integratif

Gambar 5. Menunjukkan ketiga dimensi berkontribusi signifikan: STEM ($\beta = 0,484$), TPACK ($\beta = 0,425$), dan ESD ($\beta = 0,345$). Jalur langsung dari PjBL ke RPP tidak signifikan ($\beta = 0,030$, garis putus-putus).

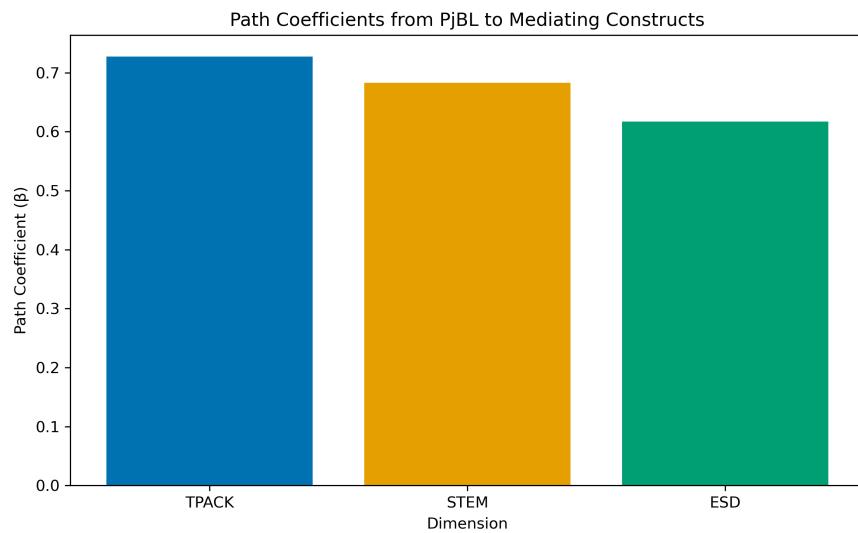


Figure 4: Gambar 4. Koefisien Jalur dari PjBL ke Konstruk Mediator

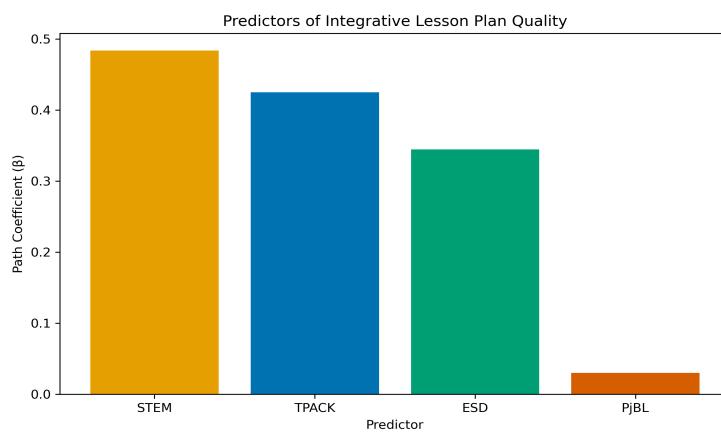


Figure 5: Gambar 5. Prediktor Kualitas RPP Integratif

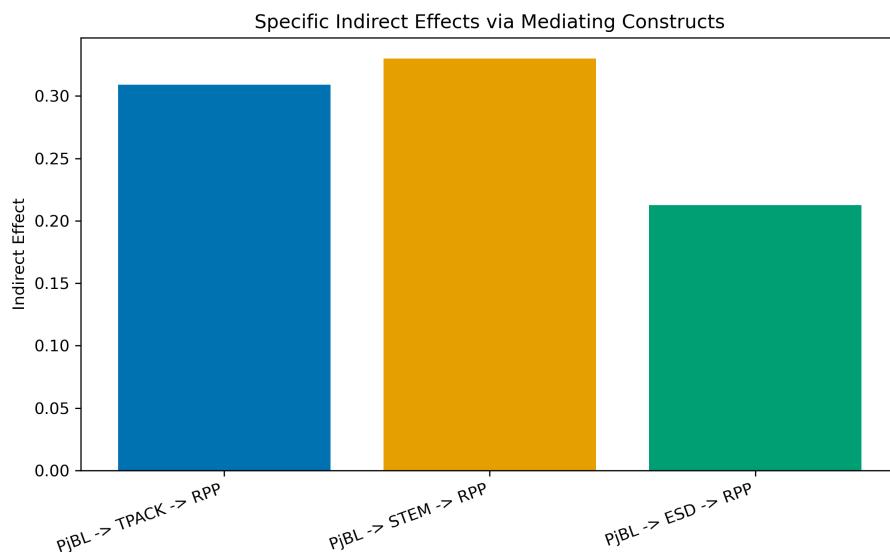


Figure 6: Gambar 6. Efek Tidak Langsung Spesifik melalui Konstruk Mediator

Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5 dan Tabel 7, ketiga dimensi integrasi berkontribusi signifikan dan substansial terhadap kualitas RPP integratif. STEM adalah kontributor terkuat ($\beta = 0,484$), diikuti TPACK ($\beta = 0,425$) dan ESD ($\beta = 0,345$). Nilai f^2 yang konsisten besar (seluruh $> 2,3$) menunjukkan bahwa setiap dimensi memberikan kontribusi bermakna dan non-redundan terhadap kualitas RPP keseluruhan.

4.9. 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	$\beta_{indirect}$	SE	t	p	CI 95%	VAF	Sobel z	Sobel p
PjBL → TPACK → RPP	0,309	0,035	8,725	<,001	[0,239; 0,375]	35,0%	8,686	<,001
PjBL → STEM → RPP	0,330	0,033	10,039	<,001	[0,271; 0,401]	37,4%	9,052	<,001
PjBL → ESD → RPP	0,213	0,031	6,685	<,001	[0,151; 0,275]	24,1%	6,335	<,001
Total indirect	0,852	0,040	21,016	<,001	[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	<,001	[0,838; 0,917]	—	—	—

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

- a. PjBL → STEM → RPP adalah jalur mediasi terkuat (indirect $\beta = 0,330$, $p <,001$, CI 95% [0,271; 0,401]). VAF 37,4% menunjukkan mediasi parsial, dan uji Sobel mengonfirmasi signifikansi ($z = 9,052$, $p <,001$).

- b. PjBL → TPACK → RPP menghasilkan efek tidak langsung signifikan (indirect $\beta = 0,309, p < .001$, CI 95% [0,239; 0,375]). VAF 35,0% konsisten dengan mediasi parsial.
- c. PjBL → ESD → RPP juga signifikan (indirect $\beta = 0,213, p < .001$, CI 95% [0,151; 0,275]). VAF 24,1% menunjukkan mediasi parsial.

Total indirect effect signifikan ($\beta = 0,852, p < .001$), sedangkan direct effect PjBL terhadap RPP tidak signifikan ($\beta = 0,030, p = .441$). 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 ($\beta = 0,882, p < .001$), mengonfirmasi bahwa pengaruh keseluruhan PjBL terhadap kualitas RPP substansial dan bekerja melalui dimensi mediator.

5. Discussion

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 citetdewi2022projectbased 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. citetpurwianingsih2022programfor 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 citeppitot2024establishinga, portilloblanco2025buildingan, vidal2025preservice. 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 citepsinghpillary2023preservice, ozdemiryilmazer2025towardsa.

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 citepmarkula2022thekey.

5.1. 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 ($\beta = 0,727, p < 0,001$), STEM ($\beta = 0,683, p < 0,001$), dan ESD ($\beta = 0,617, p < 0,001$). Seluruh effect sizes besar ($f^2 > 0,35$), menunjukkan signifikansi praktis substansial. Jalur langsung dari PjBL ke RPP tidak signifikan ($\beta = 0,030, p = 0,441$). Temuan ini sepenuhnya mendukung H1: PjBL secara signifikan mempengaruhi ketiga dimensi integrasi.

Jalur PjBL → TPACK yang kuat ($\beta = 0,727$) 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 citetmansour2024scienceand di Qatar yang menunjukkan hubungan signifikan antara pendekatan pedagogis dan integrasi TPACK. Nilai effect size yang besar ($f^2 = 1,123$) 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 citepstinkenrosner2023technologyimplementation,gurer2021theinfluence

Jalur PjBL → STEM yang signifikan ($\beta = 0,683$, $f^2 = 0,872$) 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 ($\beta = 0,617$, $f^2 = 0,614$) 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 R^2 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.

5.2. Dimensi integrasi yang paling responsif (RQ3)

Analisis komparatif menunjukkan bahwa TPACK merupakan dimensi yang paling kuat dipengaruhi ($\beta=0,727$; $f^2=1,123$), disusul STEM ($\beta=0,683$; $f^2=0,872$) dan ESD ($\beta=0,617$; $f^2=0,614$). 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 mengaktifkan 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 citepkarlstrom2021howdo,beckmann2023informaland,davis2024preserviceteachers.

4. 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 ($\beta=0,484$, $f^2=5,444$), TPACK ($\beta=0,425$, $f^2=2,783$), dan ESD ($\beta=0,345$, $f^2=2,399$). Temuan ini mendukung H2 dan menegaskan perencanaan pembelajaran integratif sebagai kompetensi tingkat tinggi yang dibentuk oleh tiga dimensi yang berbeda namun saling melengkapi.

Nilai f^2 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 citepkrepf2022structuringthe,tellezcosta2023preservice,pleasants2024whatmakes.

Namun, terdapat catatan metodologis penting. Nilai R^2 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 f^2 yang besar dan R^2 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.

5.3. Peran mediasi dimensi integrasi (RQ5)

Analisis mediasi mengungkapkan pola mediasi penuh secara agregat: efek tidak langsung total signifikan ($\beta = 0,852, p < 0,001$), sementara efek langsung PjBL terhadap RPP tidak signifikan ($\beta = 0,030, p = 0,441$). 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:

- a. STEM adalah mediator terkuat (β tidak langsung = 0,330, VAF = 37,4%), menunjukkan bahwa pengaruh PjBL terhadap kualitas rencana pembelajaran terutama berlangsung melalui pengembangan kompetensi integrasi STEM.
- b. TPACK adalah mediator terkuat kedua (β tidak langsung = 0,309, VAF = 35,0%), mengindikasikan bahwa integrasi teknologi merupakan saluran penting yang memperkuat perencanaan pembelajaran melalui PjBL.
- c. ESD juga merupakan mediator signifikan (β tidak langsung = 0,213, VAF = 24,1%), 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 citephair2022item. 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 citepkarlstrom2021howdo,beckmann2023informaland.

5.4. 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 citepbrown2009item.

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 $\beta > 0,6$) dan effect size yang besar ($f^2 > 0,5$) 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 citepozdemiryilmazer2025towardsa,vidal2025preservice.

5.5. 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 ($\beta > 0,6$ 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
citeppitot2024establishinga,tellezacosta2023preservice,portilloblanco2025buildingan.

5.6. 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.

5.7. 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 R^2 yang tinggi secara mekanistik (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
citepsinghpillay2023preservice,vidal2025preservice.

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.

5.8. 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.

6. 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 ($\text{TPACK} > \text{STEM} > \text{ESD}$) 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

- Brown, M. W. (2009). The teacher-tool relationship: Theorizing the design and use of curriculum materials. In *Mathematics teachers at work: Connecting curriculum materials and classroom instruction*. Routledge.
- Kelley, T. R. and Knowles, J. G. (2016). A conceptual framework for integrated stem education. *International Journal of STEM Education*, 3.
- McKenney, S., Kali, Y., Markauskaite, L., and Voogt, J. (2015). Teacher design knowledge for technology enhanced learning: An ecological framework for investigating assets and needs. *Instructional Science*, 43.
- Mishra, P. and Koehler, M. J. (2006). Technological pedagogical content knowledge: A framework for teacher knowledge. *Teachers College Record*, 108.
- Offermann, L. R., Pham, H. T., Baskerville, K. A., and Langkamer, K. L. (2025). Technological pedagogical content knowledge (tpack) among educators: A meta-analytic review. *Frontiers in Psychology*, 16.

- Salleh, M. F. M., Awang, M. I., and Aziz, N. A. A. (2025). How pre-service science teachers develop tpack competence: A systematic literature review. *Jurnal Pendidikan IPA Indonesia*, 14.
- Shulman, L. S. (1986). Those who understand: Knowledge growth in teaching. *Educational Researcher*, 15.
- Stinken-Rosner, L., Hofer, E., Rodenhauser, A., and 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.
- UNESCO (2017). *Education for Sustainable Development Goals: Learning objectives*. UNESCO Publishing.