JIPFRI
https://journal.unuha.ac.id/index.php/JIPFRI

JIPFRI (Jurnal Inovasi Pendidikan Fisika dan Riset Ilmiah)
Vol. 10 No. 2, November 2026, hlm. 215–232
p-ISSN 2549-905X | e-ISSN 2549-9076
https://doi.org/10.30599/jipfri.v10i2.5583

Pengembangan E-Modul TPACK sebagai Pendukung Intervensi Perkuliahan bagi Mahasiswa Calon Guru Fisika

Gaguk Resbiantoro* **dan Moh. Zaha Faizul Muttaqi**
Tadris Fisika, Universitas Islam Negeri Sayyid Ali Rahmatullah Tulungagung, Tulungagung, Indonesia
***Penulis korespondensi:** gaguk@uinsatu.ac.id

INFO ARTIKEL

Riwayat artikel:
Diterima: 02/08/2026
Direvisi: 16/11/2026
Disetujui: 16/11/2026
Terbit: 29/11/2026

Kata kunci:
calon guru fisika
e-modul TPACK
kerangka kerja TPACK
pembelajaran jarak jauh fisika

Keywords:
physics distance learning
pre-service physics teachers
TPACK e-module
TPACK framework

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan mengembangkan e-modul *Technological Pedagogical and Content Knowledge* (TPACK) yang valid, praktis, dan mendukung peningkatan persepsi diri TPACK mahasiswa calon guru fisika dalam merancang pembelajaran fisika jarak jauh. Penelitian pengembangan model 4D (*Define, Design, Develop, Disseminate*) ini melibatkan 3 validator ahli, 12 mahasiswa pada uji coba terbatas, dan 46 mahasiswa pada uji coba diperluas dengan desain *one-group pretest–posttest* di dua kelas replikasi (Kelas A = 25; Kelas B = 21). Validitas dianalisis dengan rata-rata skor ahli, indeks *Aiken's V*, dan *Intraclass Correlation Coefficient* (ICC); perubahan skor *self-reported* TPACK dianalisis dengan uji *Wilcoxon Signed-Rank*, *N-Gain*, *effect size* (r), dan uji *Mann–Whitney U*. Skor validitas materi dan media berkisar 3,78–3,94 (tinggi); kepraktisan 3,38–3,60 pada uji terbatas (sangat praktis) dan 3,01–3,60 pada uji diperluas (praktis hingga sangat praktis); respons mahasiswa baik (3,01–3,21). Skor TPACK meningkat signifikan pada kedua kelas ($p < 0{,}001$; $r = 0{,}88$) dengan *N-Gain* kategori sedang, yaitu 0,44 (SD = 0,15) pada Kelas A dan 0,46 (SD = 0,10) pada Kelas B, tanpa perbedaan signifikan antarkelas ($p = 0{,}234$). Temuan awal ini menunjukkan e-modul memenuhi kriteria validitas dan kepraktisan serta mendukung peningkatan persepsi TPACK, meskipun desain satu kelompok tanpa kelompok pembanding belum mengisolasi efek kausal e-modul.

ABSTRACT

This study aimed to develop a valid and practical *Technological Pedagogical and Content Knowledge* (TPACK) e-module that supports pre-service physics teachers' perceived TPACK in designing distance physics instruction. The 4D model (*Define, Design, Develop, Disseminate*) involved 3 expert validators, 12 students in a limited trial, and 46 students in an extended *one-group pretest–posttest* trial in two classes (Class A = 25; Class B = 21). Validity was analyzed using mean expert scores, *Aiken's V*, and *Intraclass Correlation Coefficient* (ICC); *self-reported* TPACK changes were analyzed using the *Wilcoxon Signed-Rank* test, *N-Gain*, *effect size* (r), and *Mann–Whitney U test*. Expert validity scores ranged from 3.78 to 3.94 (high); practicality was 3.38–3.60 in the limited trial (very practical) and 3.01–3.60 in the extended trial (practical to very practical); student responses were good (3.01–3.21). Self-reported TPACK increased significantly in both classes ($p < 0.001$; $r = 0.88$), with moderate *N-Gain* of 0.44 (SD = 0.15) in Class A and 0.46 (SD = 0.10) in Class B, without significant difference between classes ($p = 0.234$). These initial findings indicate that the e-module meets validity and practicality criteria and supports perceived TPACK gains, although the single-group design without a comparison group cannot isolate causal effects.

Cara mengutip: Resbiantoro, G., & Muttaqi, M. Z. F. (2026). Pengembangan e-modul TPACK sebagai pendukung intervensi perkuliahan bagi mahasiswa calon guru fisika. *JIPFRI (Jurnal Inovasi Pendidikan Fisika dan Riset Ilmiah), 10*(2), 215–232. https://doi.org/10.30599/jipfri.v10i2.5583
Copyright © 2026 Penulis. Artikel akses terbuka di bawah lisensi Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International (CC BY-SA 4.0).

PENDAHULUAN

Kebutuhan manusia atas keterampilan hidup (*life skills*) sudah berkembang sangat dinamis. Salah satu kebutuhan keterampilan abad 21 menurut P21 *Framework* adalah *information, media, and technology skills* (Battelle for Kids, 2019; Rodríguez-Loinaz et al., 2024). Proses pembelajaran harus bertransformasi dengan melakukan integrasi ICT agar sesuai dengan kebutuhan abad ke-21 (Claro et al., 2024). Mahasiswa calon guru sebagai representasi kualitas guru mendatang perlu dipersiapkan agar mendekati standar kompetensi guru profesional (Brown et al., 2021; Susantini et al., 2022; Van Katwijk et al., 2023). Dalam konteks calon guru fisika, struktur program pendidikan telah diarahkan pada pembentukan kompetensi digital yang mampu memfasilitasi penerapan teknologi sebagai media untuk

menjelaskan konsep fisika dan mendukung aktivitas belajar yang interaktif (Große-Heilmann et al., 2022; Rahim et al., 2023; Rizki et al., 2024). Kompetensi digital tidak hanya terkait *hardware* atau *software*, tetapi juga kemampuan pedagogis untuk membuat pembelajaran fisika menjadi interaktif dan bermakna (Schubatzky et al., 2023; Thohir et al., 2022; Thoms et al., 2021, 2023). Bentuk kompetensi ini sejalan dengan kerangka kerja *Technological Pedagogical and Content Knowledge* (TPACK) yang telah dirumuskan oleh Mishra & Koehler (2006) dan telah diperbarui oleh Petko et al. (2025).

Beberapa fakta menunjukkan rendahnya TPACK calon guru (mahasiswa), yang artinya mereka belum cukup mampu mengintegrasikan teknologi dalam pembelajaran. Banyak calon guru yang tidak mampu menggunakan perangkat lunak berbasis ICT dalam pembelajaran, dengan ada 19 perangkat lunak yang berpotensi untuk melakukan integrasi ICT dalam pembelajaran (Ait Ali et al., 2026; Al-Abdullatif, 2019; Zikra et al., 2024). Calon guru juga memiliki tingkat kepercayaan diri (*TPACK-Confidence*) yang rendah dalam mengintegrasikan ICT dalam pembelajaran (Al-Abdullatif, 2019). Persepsi calon guru yang diamati selama tiga tahun juga menunjukkan rendahnya pemanfaatan ICT secara pedagogi dalam pembelajaran sains (Valtonen et al., 2019). Mahasiswa merasa bahwa ketersediaan teknologi khusus untuk konten (materi) masih sangat terbatas jika dibandingkan dengan perangkat lunak dan teknologi universal (Kuo & Kuo, 2024; Valtonen et al., 2019). Secara khusus pada calon guru fisika, kesulitan utama yang dihadapi adalah menghubungkan fitur teknologi simulasi interaktif (seperti PhET) dengan strategi pedagogis inkuiri untuk memvisualisasikan konsep fisika yang abstrak/mikroskopis dan mengatasi miskonsepsi siswa (Große-Heilmann et al., 2022; Thoms et al., 2023). Hasil survei analisis kebutuhan awal pada mahasiswa calon guru fisika di lokasi penelitian juga menunjukkan bahwa penggunaan teknologi masih didominasi media presentasi satu arah serta belum tersedia bahan ajar mandiri yang memandu produksi video penjelasan konsep fisika, LKPD berbasis simulasi, dan asesmen formatif digital untuk pembelajaran jarak jauh.

Sebuah e-modul yang dirancang khusus dengan memberikan pelatihan yang terstruktur, mudah diakses, dan berfokus pada prinsip-prinsip TPACK, dapat menjadi solusi untuk program studi pendidikan guru fisika dalam meningkatkan kompetensi mahasiswanya. Integrasi e-modul dalam lingkungan pendidikan telah menunjukkan potensi signifikan untuk meningkatkan proses pembelajaran dan pengajaran. Keberhasilan implementasinya di berbagai disiplin ilmu menunjukkan potensi untuk diadaptasi dalam konteks TPACK pada program pendidikan guru fisika. Hasil pengembangan e-modul berbasis pendekatan *Realistic Mathematics Education* (RME) terbukti dapat meningkatkan pemahaman materi matematika (S. Fahmi et al., 2022). Konteks lain penggunaan e-modul dalam pendidikan vokasi, terbukti dapat meningkatkan literasi ilmiah dan pencapaian akademik siswa (A. N. Fahmi et al., 2021). Bukti integrasi e-modul dalam *blended learning* juga telah terbukti meningkatkan kesiapan dan inovasi siswa (Sumarmi et al., 2021). E-modul juga terbukti mampu mendukung pembelajaran mandiri dan keterlibatan aktif siswa (Jorge et al., 2021). Dibandingkan dengan program pelatihan TPACK calon guru sains/fisika terdahulu yang umumnya berbentuk perkuliahan tatap muka berbasis microteaching (Aktaş & Özmen, 2020), seminar media digital (Große-Heilmann et al., 2022), atau e-modul geospasial (Wijayanto et al., 2023), kebaruan e-modul TPACK dalam penelitian ini terletak pada pengintegrasian utuh konsep TPACK dan pengetahuan kontekstual (XK) khusus untuk pembelajaran fisika jarak jauh (*Physics Distance Learning*) yang membimbing mahasiswa menghasilkan perangkat ajar digital secara mandiri.

Penyesuaian karakteristik e-modul dengan kebutuhan kompetensi spesifik calon guru fisika menjadi tantangan pengembangan e-modul. Perlu dilakukan analisis kebutuhan untuk mengembangkan e-modul terutama tentang karakteristik TPACK untuk calon guru fisika. Pendekatan ini menekankan pentingnya menyelaraskan e-modul dengan kebutuhan konten dan pedagogis yang unik dari setiap bidang studi, termasuk fisika (Wijayanto et al., 2023). Pengembangan sebuah e-modul TPACK tidak dapat dilepaskan dari fondasi teoretis yang kuat, yaitu evolusi kerangka kerja TPACK itu sendiri. Konsep ini terus berkembang seiring dengan kemajuan teknologi dan kebutuhan pendidikan. Dengan memahami perjalanan evolusi kerangka kerja ini, kita dapat memastikan bahwa e-modul yang dikembangkan tidak hanya relevan, tetapi juga mampu mengintegrasikan pengetahuan dan keterampilan yang paling mutakhir.

Kerangka kerja TPACK dikembangkan dari deskripsi Shulman (1986, 1987) tentang PCK. TPACK mampu menjelaskan pemahaman guru untuk melakukan integrasi teknologi ke dalam PCK untuk menghasilkan pembelajaran yang efektif berbasis teknologi. Irisan dari ketiga basis pengetahuan konten, pedagogi, dan teknologi menghasilkan sebuah kerangka kerja *Technological Pedagogical and Content Knowledge* (TPACK) (Koehler & Mishra, 2008). Konsepsi TPACK telah berkembang dari waktu ke waktu dan melalui serangkaian publikasi, dengan deskripsi kerangka kerja yang paling mutakhir. Dimensi konseptual Pengetahuan Kontekstual (XK) yang menghubungkan teori dengan lingkungan belajar nyata menjadi salah satu pengembangan kerangka kerja TPACK (Mishra, 2019). Model pembaruan TPACK 2019 ini telah ditambahkan Pengetahuan Kontekstual (XK). Ini menunjukkan bahwa penerapan TPACK harus disesuaikan dengan lingkungan belajar spesifik, seperti sekolah, kelas, atau budaya siswa. Pemanfaatan teknologi baru (*emerging technologies*) dalam konteks pembelajaran di era digital menjadi bagian pengembangan pada kerangka kerja TPACK 2025 (Petko et al., 2025).

Integrasi *emerging technologies*, yang mencakup video, simulasi, dan evaluasi daring menjadi beberapa konsekuensi kerangka kerja terbaru. Konsep ini menyatukan semua pengetahuan TPACK dengan fokus pada praktik nyata menggunakan teknologi baru. Atas dasar perkembangan kerangka kerja TPACK tersebut, peneliti mengambil beberapa indikator kunci TPACK untuk mengembangkan e-modul. Indikator TPACK yang digunakan diantaranya membuat video penjelasan materi fisika, melakukan demonstrasi menggunakan aplikasi simulasi/animasi, membuat forum diskusi *online*, dan memberikan evaluasi formatif digital. Pemilihan keempat indikator tersebut didasarkan pada keterpaduannya dengan komponen TPACK dan Pengetahuan Kontekstual (XK) dalam fisika: (1) video penjelasan materi fisika menggunakan teknik pengait (*hook*) dan *scaffolding* melatihkan representasi multimodal konsep fisis abstrak (irisan TCK dan TPACK); (2) demonstrasi menggunakan aplikasi simulasi/animasi memfasilitasi penyelidikan eksperimen virtual untuk mengatasi keterbatasan alat laboratorium fisik (irisan TPK dan TPACK); (3) forum diskusi daring memfasilitasi konstruksi pengetahuan kolaboratif secara asinkron (TPK); dan (4) evaluasi formatif digital pada platform Web 2.0 memungkinkan penggunaan berbagai representasi masalah untuk siswa secara cepat sesuai konteks pembelajaran jarak jauh (TPACK dan XK).

Berdasarkan fakta empiris dan kajian teorik yang telah dilakukan, peneliti akan mengembangkan "e-modul TPACK" sebagai bentuk intervensi perkuliahan untuk melatihkan *Technological Pedagogical and Content Knowledge* (TPACK). Adapun pertanyaan penelitian yang digunakan diantaranya adalah: (a) bagaimana kelayakan/validitas E-Modul TPACK untuk meningkatkan *Technological Pedagogical and Content Knowledge* (TPACK) bagi mahasiswa Tadris Fisika?, (b) Bagaimana kepraktisan penggunaan E-Modul TPACK bagi mahasiswa Tadris Fisika?, (c) Bagaimana dampak penerapan E-Modul TPACK terhadap *Technological Pedagogical and Content Knowledge* (TPACK) mahasiswa Tadris Fisika?, dan (d) Bagaimana respons mahasiswa terhadap penggunaan E-Modul TPACK yang dikembangkan?

METODE

Penelitian ini menggunakan metodologi Penelitian dan Pengembangan Pendidikan (*Educational Research and Development*) atau disebut R&D. Penelitian ini berupa pengembangan E-Modul *Technological Pedagogical and Content Knowledge* (TPACK) untuk mahasiswa calon guru fisika. Hasil penelitian ini berupa e-modul yang termasuk dalam salah satu produk pendidikan. Penelitian dan pengembangan pendidikan (*educational research and development*) atau yang disebut R&D telah menjadi dasar operasional untuk mengembangkan dan memvalidasi produk-produk pendidikan dalam penelitian ini (Thiagarajan et al., 1974).

Desain penelitian mengikuti tahap-tahap R&D yang telah dikemukakan Thiagarajan, yaitu model 4D yang meliputi: (1) Pendefinisian (*Define*); (2) Perancangan (*Design*); (3) Pengembangan (*Develop*); dan (4) Penyebaran (*Disseminate*). Tahap-tahap R&D ini merupakan kesatuan yang saling berkaitan dan berkesinambungan. Dalam tahap *define* dilakukan beberapa kegiatan observasi dan analisis berupa studi kepustakaan dan survei lapangan. Tahap *design* dalam penelitian ini merupakan rangkaian proses pengembangan draft e-modul TPACK, yaitu pemilihan format dan desain awal berdasarkan kriteria komponen e-modul. Pada

https://doi.org/10.30599/jipfri.v10i2.5583

tahap *develop* dilakukan beberapa prosedur diantaranya validasi produk oleh ahli, uji coba terbatas, dan uji coba diperluas. Proses validasi melibatkan 3 orang ahli yang menguasai unsur materi dan media. Hasil penilaian ahli tersebut digunakan untuk penyempurnaan draft e-modul dan menentukan validitasnya. *Draft II*, hasil penyempurnaan, diuji cobakan secara terbatas pada mahasiswa semester 7 sebanyak 12 orang untuk menilai kepraktisan e-modul TPACK ini. Hasil evaluasinya digunakan untuk penyempurnaan kembali sebelum dilakukan uji coba diperluas. Secara spesifik, survei analisis kebutuhan pada tahap define mengidentifikasi perlunya panduan integrasi simulasi fisika dan evaluasi daring.

Tiga ahli yang dilibatkan pada tahap develop dipilih berdasarkan kriteria kualifikasi akademik bergelar doktor di bidang pendidikan fisika dan teknologi pembelajaran dengan pengalaman mengajar lebih dari 5 tahun. Masukan kualitatif dari ketiga validator mencakup penambahan video pembelajaran pada kegiatan belajar yang belum lengkap, penyediaan fitur umpan balik otomatis (*instant feedback*) pada akhir kuis evaluasi diri, serta penyeragaman tata letak navigasi layar. Masukan tersebut diwujudkan dalam perubahan *Draft I* menjadi *Draft II*, sedangkan hasil evaluasi uji coba terbatas pada 12 mahasiswa magang digunakan untuk memperjelas petunjuk teknis antarmuka sebelum diterapkan pada uji coba diperluas.

Produk diuji coba dengan desain *one group pretest and posttest* menggunakan replikasi kelas, sehingga proses ini melibatkan 2 kelas uji coba. Masing-masing kelas sebanyak 25 dan 21 mahasiswa. Pada tahap uji coba diperluas ini, hasilnya digunakan untuk menentukan dampak penerapan e-modul TPACK yang ditentukan berdasarkan kriteria signifikansi peningkatan *self-reported* TPACK, level capaian *N-Gain* dan *Effect Size*, serta konsistensi *N-Gain* antar kelas uji coba. Selain itu, respons mahasiswa juga menjadi informasi yang diperoleh pada tahap ini. Tahap terakhir desain 4D ini adalah diseminasi, yang dihadiri oleh mahasiswa Tadris Fisika, alumni, dosen, dan narasumber sebagai pembahas e-modul TPACK. Adapun hasil dari tahap diseminasi berupa masukan konstruktif dari dosen dan narasumber untuk memperkaya variasi topik fisika kontekstual pada pengembangan modul selanjutnya.

Seluruh rangkaian penelitian ini dilakukan di UIN Sayyid Ali Rahmatullah Tulungagung pada tahun 2025. Pemilihan peserta dilakukan melalui *intact-group sampling* pada mahasiswa aktif yang menempuh mata kuliah pembelajaran fisika berbantuan komputer. Sebanyak 12 mahasiswa peserta uji terbatas berasal dari kelompok kelas magang terpisah dan tidak diikutsertakan dalam 46 mahasiswa peserta uji coba diperluas (Kelas A = 25; Kelas B = 21) untuk menjamin independensi kedua tahap dan mencegah bias seleksi. Seluruh 46 peserta (100%) menyelesaikan *pretest*, rangkaian intervensi, dan *posttest* tanpa adanya data hilang (*missing data* = 0%).

Intervensi dilaksanakan selama 6 pertemuan perkuliahan (masing-masing 3 × 50 menit sesi *blended* ditambah aktivitas mandiri terbimbing pada e-modul): pertemuan pertama diawali dengan pretest dan Kegiatan Belajar 1, pertemuan kedua hingga kelima memfasilitasi Kegiatan Belajar 2 sampai 5 beserta penugasan wajib (menyusun RPP daring, video penjelasan materi fisika, LKPD berbasis simulasi PhET, dan kuis formatif Web 2.0), serta pertemuan keenam diisi dengan *posttest*, pengisian angket kepraktisan, dan angket respons. Kedua kelas diampu oleh dosen yang sama dengan panduan pelaksanaan terstandar tanpa kegiatan pelatihan TPACK lain yang berjalan bersamaan, serta dipantau keterlaksanaannya melalui presensi dan pengumpulan tugas tiap kegiatan belajar.

Lembar validasi e-modul merupakan instrumen untuk mendapatkan data validitas e-modul TPACK. Data berupa nilai ordinal 1 sampai 4 dari unsur materi (aspek kelayakan isi, bahasa penyajian, dan struktur penyajian) dan unsur media (aspek tampilan desain layar, kemudahan penggunaan, konsistensi, dan kegrafikan).

Angket *self-reported* digunakan untuk mengetahui TPACK mahasiswa sebelum dan sesudah pembelajaran dengan dukungan e-modul TPACK. Angket tersebut diadaptasi dari angket *self-reported* versi Schmid et al. (2021) dan telah dinyatakan valid oleh 3 orang ahli di bidang pendidikan fisika dengan kesepakatan antar validator yang baik ($ICC_{(3,k)}$ = 0,887). Dimensi penilaian diantaranya orientasi pembelajaran, memfasilitasi konstruksi pengetahuan individu, struktur penyajian materi, penggunaan perangkat dan media pembelajaran berbasis ICT, dan evaluasi formatif dalam platform web 2.0. Semua dimensi

tersebut dinilai dengan skala ordinal 1 sampai 4. Angket tersebut selanjutnya disebut TPACK *Self-Reported Questionnaire* (T-SRQ) yang terdiri atas 22 butir pernyataan positif berbahasa Indonesia yang terbagi ke dalam 5 dimensi: orientasi pembelajaran (butir 1–5), memfasilitasi konstruksi pengetahuan individu (butir 6–10), struktur penyajian materi (butir 11–15), penggunaan perangkat dan media berbasis ICT (butir 16–20), serta evaluasi formatif dalam *platform Web 2.0* (butir 21–22), dengan skor total berentang 22–88 (atau rerata skala 1,00–4,00).

Pengujian reliabilitas konsistensi internal T-SRQ pada sampel penelitian (N = 46) menghasilkan nilai *Cronbach's alpha* sebesar 0,92 pada pretest dan 0,96 pada posttest. Nilai ICC(3,k) = 0,887 (95% CI [0,77–0,95]) di atas merupakan reliabilitas konsistensi penilaian 3 ahli secara gabungan lintas seluruh 22 butir, sedangkan nilai ICC pada Tabel 2 (0,64–0,74) dihitung secara terpisah pada masing-masing kriteria validasi (*sufficiency, clarity, coherence,* dan *relevance*).

Tingkat kepraktisan e-modul TPACK dari perspektif mahasiswa calon guru fisika dinilai berdasarkan aspek kemudahan penggunaan, manfaat materi, keterkaitan untuk pembelajaran fisika, serta waktu dan fleksibilitas. Secara rinci, lembar validasi ahli materi mencakup 26 butir (kelayakan isi = 12 butir, bahasa penyajian = 6 butir, dan struktur penyajian = 8 butir) dan ahli media mencakup 20 butir (tampilan desain layar = 6 butir, kemudahan penggunaan = 6 butir, konsistensi = 3 butir, dan kegrafikan = 5 butir).

Selanjutnya, *Practicality Assessment Sheet* (PAS) terdiri atas 18 butir (kemudahan penggunaan = butir 1–6, manfaat materi = butir 7–10, keterkaitan pembelajaran = butir 11–14, serta waktu dan fleksibilitas = butir 15–18). Selain PAS, digunakan pula Angket Respons Mahasiswa sebanyak 20 butir yang diberikan di akhir uji coba diperluas untuk menilai penerimaan pengguna pada 4 dimensi (masing-masing 5 butir): kepuasan terhadap konten TPACK (butir 1–5), kemudahan akses dan interaksi (butir 6–10), relevansi dengan pembelajaran fisika (butir 11–15), serta dampak motivasi dan pengembangan diri (butir 16–20).

Teknik analisis data yang digunakan adalah berupa deskriptif kuantitatif dan statistik inferensial (uji beda *non-parametrik Wilcoxon* dan *Mann-Whitney*). Pada uji validitas, digunakan deskripsi kuantitatif terhadap capaian nilai kelayakan e-modul dari ahli dan reliabilitas hasil penilaian berdasarkan interrater reliability dengan indeks *intraclass correlation coefficient* (ICC). Uji *Wilcoxon* digunakan untuk menentukan signifikansi peningkatan antara skor TPACK sebelum dan setelah intervensi e-modul TPACK. Uji *Mann-Whitney* digunakan untuk menentukan konsistensi N-Gain antar kelas uji coba. Analisis dilakukan menggunakan perangkat lunak IBM SPSS Statistics pada taraf signifikansi $\alpha = 0,05$ (*two-tailed*).

Indeks validitas isi per butir dihitung menggunakan rumus *Aiken's V* = $\Sigma s / [n(c - 1)]$ dengan n = 3 validator dan c = 4 kategori pilihan (batas minimum penerimaan $V \geq 0,89$). Model ICC yang digunakan adalah *two-way mixed effects*, *consistency*, *average measures* [ICC(3,k)] disertai interval kepercayaan 95% (95% CI). Kategorisasi rata-rata skor skala 1,00–4,00 mengacu pada interval: 3,26–4,00 (sangat tinggi/sangat praktis/sangat baik), 2,51–3,25 (tinggi/praktis/baik), 1,76–2,50 (cukup/kurang praktis), dan 1,00–1,75 (rendah/tidak praktis), sedangkan kategori ICC mengacu pada Koo dan Li (2016): < 0,50 (*poor*), 0,50 –0,75 (*moderate*), 0,75–0,90 (*good*), dan > 0,90 (*excellent*).

Uji non-parametrik *Wilcoxon Signed-Rank* dan *Mann–Whitney U* dipilih karena data berasal dari skala ordinal dan hasil uji normalitas *Shapiro–Wilk* pada data *N-Gain* Kelas A menunjukkan distribusi tidak normal ($W = 0,789$; $df = 25$; $p < 0,001$). Peningkatan skor dihitung melalui rata-rata *N-Gain* individu dengan rumus Hake: g_i = (Skor_post − Skor_pre) / (Skor_maks − Skor_pre) di mana Skor_maks = 88 (atau 4,00 pada rerata skala) sebagai indikator deskriptif proporsi peningkatan persepsi diri relatif terhadap batas maksimum skala, sedangkan koefisien *effect size* dihitung dengan rumus *Rosenthal* $r = |Z| / \sqrt{N}$. Kriteria justifikasi nilai r adalah $r \leq 0,1$ (*very small*), $0,1 \leq r < 0,3$ (small), $0,3 \leq r < 0,5$ (*medium*), dan $r \geq 0,5$ (*large*) (Cohen, 1992).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

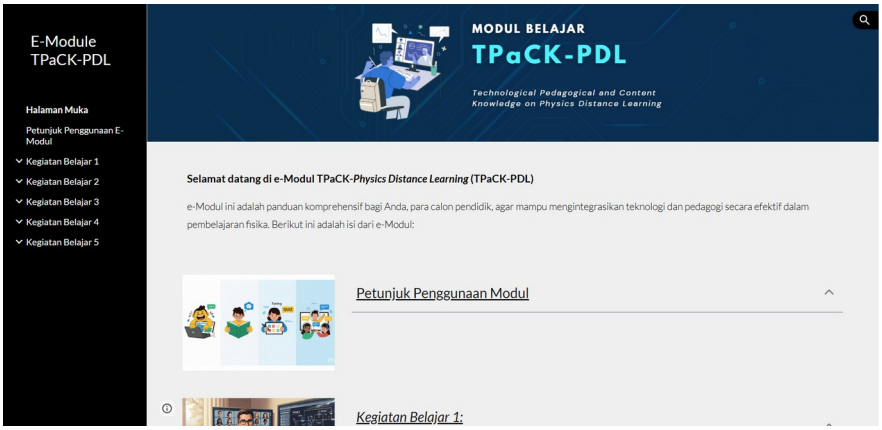
E-modul ini disusun menjadi lima kegiatan belajar yang saling berkesinambungan. Setiap kegiatan belajar memiliki fokus materi yang spesifik untuk memastikan pemahaman yang mendalam. Tampilan halaman awal dan link e-modul disajikan pada Gambar 1.

Kegiatan Belajar 1: TPACK dalam Pembelajaran Fisika. Bagian ini memperkenalkan kerangka konseptual TPACK. Mahasiswa diajak untuk memahami definisi, tahapan, dan pentingnya kerangka ini dalam pembelajaran fisika. Tujuannya adalah membangun landasan teoretis sebelum melangkah ke praktik.

Kegiatan Belajar 2: Kerangka Kerja TPACK. Kegiatan ini menggali lebih dalam tentang komponen-komponen TPACK, termasuk perkembangan dari *Pedagogical Content Knowledge* (PCK) dan konsep integrasi teknologi. Mahasiswa akan memahami bagaimana ketiga elemen ini berinteraksi dan membentuk kompetensi yang utuh.

Kegiatan Belajar 3: TPACK-*Physics Distance Learning* (TPACK-PDL). Fokus kegiatan ini adalah aplikasi TPACK dalam konteks pembelajaran jarak jauh (*distance learning*) fisika. Materi mencakup representasi konten berbasis Web 2.0, pedagogi konstruktif, teknik komunikasi, dan evaluasi pembelajaran yang relevan dengan metode daring. Konsep TPACK-PDL ini dioperasionalkan dari sintesis kerangka TPACK (Mishra & Koehler, 2006; Schmid et al., 2021) dan *Contextual Knowledge* (Petko et al., 2025) yang dikhususkan untuk mengatasi keterbatasan interaksi fisik dalam pembelajaran jarak jauh melalui pemaduan simulasi virtual, multi-representasi konsep fisis, serta asesmen diagnostik daring.

Kegiatan Belajar 4: Teknologi Baru yang Mendukung TPACK-PDL. Pada tahap ini, materi beralih ke praktik dengan memperkenalkan berbagai teknologi yang dapat digunakan untuk mengajar fisika secara daring. Mahasiswa akan belajar mengoperasikan perangkat lunak untuk membuat video, demonstrasi, simulasi, dan menggunakan forum diskusi serta evaluasi formatif.



Gambar 1. Halaman Awal E-Modul TPACK

(Sumber: https://sites.google.com/view/emodule-TPACK-pdl/)

[Versi Implementasi Tahun 2025; salinan arsip statis tersimpan pada dokumentasi penelitian]

Kegiatan Belajar 5: Produk yang Mendukung Pembelajaran Jarak Jauh. Kegiatan terakhir ini merupakan puncak dari pembelajaran, di mana mahasiswa akan dibimbing untuk menghasilkan produk nyata. Luaran yang diharapkan antara lain rencana pembelajaran daring, video pembelajaran, lembar kerja peserta didik (LKPD) yang terintegrasi dengan simulasi, dan instrumen evaluasi formatif.

Sebagai satu contoh serangkaian desain pembelajaran fisika yang disajikan pada e-modul, yaitu materi Rangkaian Listrik Arus Searah (Hukum Ohm dan Hukum Kirchhoff). Mahasiswa dipandu untuk mengidentifikasi miskonsepsi umum siswa (seperti anggapan bahwa arus listrik habis terpakai oleh resistor), memilih fitur simulasi PhET (*Circuit Construction Kit*), menyusun aktivitas inkuiri terbimbing di dalam LKPD (memprediksi, mengubah variabel, mengamati grafik, dan menyimpulkan konsep), serta membuat kuis diagnostik formatif berbasis *Web 2.0*. Selama uji coba diperluas, seluruh 46 mahasiswa telah membuat dan mengumpulkan keempat produk tersebut dengan kriteria penilaian mencakup akurasi konsep fisika (CK), ketepatan *scaffolding* inkuiri (PK/PCK), dan keterpaduan media/simulasi (TK/TPACK) sebagai syarat ketuntasan kegiatan belajar; namun evaluasi efektivitas secara statistik dalam artikel ini difokuskan pada pengukuran perubahan skor *self-reported* TPACK melalui T-SRQ.

Validitas

Hasil penilaian validitas e-modul TPACK menunjukkan bahwa produk ini layak digunakan. Tujuh dimensi digunakan sebagai komponen penilaian, yang dikelompokkan ke dalam dua kategori utama, yaitu aspek materi dan media. Penilaian validitas e-modul TPACK dilakukan oleh 3 orang ahli di bidang pendidikan sains dan fisika. Hasil penilaiannya adalah berupa skor validitas, sekaligus ditentukan reliabilitas penilaian menggunakan ICC dengan tingkat kepercayaan 95%.

Aspek materi meliputi dimensi kelayakan isi materi, bahasa penyajian materi, dan struktur penyajian materi. Hasil penilaian pada Tabel 1 menunjukkan bahwa dimensi kelayakan isi materi mendapatkan skor validitas terbaik dengan 3,94 (kategori *high*) dan reliabilitas ICC 0,75 (kategori *good*). Dimensi ini menunjukkan para ahli bersepakat bahwa e-modul TPACK memiliki konten yang relevan dan sesuai dengan capaian pembelajaran mahasiswa kependidikan fisika. Para ahli juga sepakat memberikan nilai 3,89 pada dimensi bahasa penyajian materi, yang mengindikasikan bahwa penggunaan bahasa dalam e-modul ini sangat sesuai dengan tingkat pemahaman target audiens.

Tabel 1. Hasil Uji Validitas E-Modul TPACK dari Unsur Materi dan Media

Unsur	Dimensi	V	Kategori Validitas	ICC(3,k)	Kategori Reliabilitas
Materi	Kelayakan Isi Materi (n=12)	3,94 ± 0,23	*high*	0,75 [0,35–0,92]	*good*
	Bahasa Penyajian Materi (n=6)	3,89 ± 0,32	*high*	0,75 [0,02–0,96]	*good*
	Struktur Penyajian Materi (n=8)	3,79 ± 0,41	*high*	0,59 [0,14–0,91]	*moderate*
Media	Tampilan Desain Layar (n=6)	3,83 ± 0,38	*high*	0,55 [0,54–0,93]	*moderate*
	Kemudahan Penggunaan (n=6)	3,89 ± 0,32	*high*	0,75 [0,02–0,96]	*good*
	Konsistensi (n=3)	3,78 ± 0,44	*high*	0,75 [0,68–0,99]	*good*
	Kegrafikan (n=5)	3,87 ± 0,35	*high*	0,75 [0,12–0,97]	*good*

Keterangan: V (rerata skor validitas penilaian 3 ahli pada skala 1,00–4,00); ICC(3,k) (*Intraclass Correlation Coefficient - two-way mixed effects, consistency, average measures - with 95% Confidence Interval*); n = jumlah butir per dimensi.

Konsistensi terminologi yang digunakan juga mendukung bahasa komunikasi yang efektif dalam penyajian konten e-modul. Perbedaan pandangan para ahli ditunjukkan pada dimensi struktur penyajian materi, yang menghasilkan skor penilaian 3,79 tetapi dengan nilai ICC sebesar 0,59. Perbedaan secara subyektif dimungkinkan terjadi terkait organisasi dan urutan penyajian materi. Para ahli berpandangan bahwa lebih baik diawali kegiatan belajar yang fokus pada pengetahuan teoritik, kemudian dilanjutkan kegiatan praktis dan kontekstual. Tetapi ada ahli yang menyarankan lebih baik setiap kegiatan belajar langsung berorientasi praktis dan kontekstual.

Pada aspek media, dimensi kemudahan penggunaan mendapatkan skor validitas 3,89 dengan ICC 0,75. Hasil ini menunjukkan bahwa antarmuka e-modul TPACK telah memberikan kemudahan navigasi dan interaksi bagi penggunanya. Dimensi kegrafikan yang merepresentasikan elemen visual e-modul juga memperoleh skor validitas tinggi yaitu 3,87 dengan ICC 0,75. Berdasarkan hasil ini dapat dinyatakan bahwa elemen grafis dan gambar yang disajikan akan mampu mendukung proses pembelajaran secara efektif. Dimensi tampilan desain layar memperoleh skor validitas 3,83, tetapi kesepakatan para ahli lebih rendah, yaitu dengan ICC 0,55 (kategori *moderate*). ICC ini mengindikasikan bahwa terdapat perbedaan persepsi yang cukup besar antar ahli, khususnya tentang layout dan komposisi visual. Dimensi terakhir adalah konsistensi, yang mendapatkan skor validitas 3,78 dan ICC 0,75. Walaupun skor validitasnya terendah jika dibandingkan dengan dimensi lainnya, tetapi tetap masuk kategori validitas tinggi dengan kesepakatan ahli yang baik.

Secara keseluruhan, hasil penilaian validitas menunjukkan bahwa e-modul TPACK memiliki struktur yang baik dalam aspek materi dan media. Sebagian besar dimensi dalam setiap aspek tersebut mendapatkan skor validitas tinggi dengan reliabilitas yang baik. Terdapat beberapa aspek yang masih berpotensi untuk dilakukan perbaikan, diantaranya adalah pada tingkat konsistensi penyajian dan tampilan desain layar. Produk e-modul TPACK dapat dinyatakan layak untuk digunakan sebagai bahan ajar yang melatihkan

Technological Pedagogical and Content Knowledge (TPACK) pada mahasiswa kependidikan fisika.

Selain penilaian produk e-modul TPACK, ditentukan pula validitas instrumen untuk uji coba produk. Terdapat dua instrumen utama, yaitu TPACK *Self-Reported Questionnaire* dengan 22 item dan *Practicality Assessment Sheet* dengan 18 item. Validitas kedua instrumen ini juga dinilai oleh ahli yang sama dengan penilaian e-modul. Hasil penilaian instrumen ini dianalisis dengan metode *Aiken's Validity* (AV) untuk menentukan validitasnya dan *Intraclass Correlation Coefficient* (ICC) untuk menentukan *interrater reliability*.

Penilaian validitas instrumen mencakup empat aspek, yaitu *Sufficiency*, *Clarity*, *Coherence*, dan *Relevance*. Tabel 2 menunjukkan skor penilaian seluruh aspek pada kedua instrumen. Skor *Aiken's Validity* berada dalam rentang 0,89 hingga 1, yang menunjukkan tingkat validitas yang sangat tinggi di semua aspek yang dinilai. Meskipun didapatkan nilai validitas yang sangat baik, tetapi terdapat perbedaan dalam kesepakatan penilaian ahli (*interrater reliability*) antara aspek-aspek tersebut.

Tabel 2. Hasil Uji Validitas Instrumen Penelitian

Instrumen	Item	Tes	*Suff*	*Clar*	*Coh*	*Rel*	Kategori
TPACK Self-Reported Questionnaire	22	AV	0,89–1,00	0,89–1,00	0,89–1,00	0,89–1,00	*valid*
		ICC(3,k)	0,74 [0,47–0,88]	0,65 [0,29–0,84]	0,64 [0,27–0,84]	0,64 [0,27–0,84]	*moderate*
Practicality Assessment Sheet	18	AV	0,89–1,00	0,89–1,00	0,89–1,00	0,89–1,00	*valid*
		ICC(3,k)	0,74 [0,43–0,89]	0,64 [0,21–0,85]	0,63 [0,19–0,85]	0,53 [0,00–0,81]	*moderate*

Keterangan: AV (*Aiken's Validity*); ICC(3,k) (*Intraclass Correlation Coefficient - two-way mixed effects, consistency, average measures - with 95% Confidence Interval); Suff (Sufficiency); Clar (Clarity); Coh (Coherence); Rel (Relevance)*

Tabel 3. Hasil Nilai Kepraktisan E-Modul TPACK terhadap 12 Mahasiswa Uji Terbatas

Dimension	Rerata Skor Kepraktisan	Kategori Kepraktisan	ICC(3,k)	Kategori Reliabilitas	α	Kategori Reliabilitas
Kemudahan Penggunaan	3,60 ± 0,13	*very practical*	0,92 [0,82–0,97]	*excellent*	0,91	*excellent*
Manfaat Materi	3,42 ± 0,19	*very practical*	0,82 [0,57–0,94]	*good*	0,83	*high*
Keterkaitan dengan Pembelajaran	3,48 ± 0,13	*very practical*	0,98 [0,95–0,99]	*excellent*	0,98	*excellent*
Waktu dan Fleksibilitas	3,38 ± 0,27	*very practical*	0,95 [0,88–0,98]	*excellent*	0,92	*excellent*

Keterangan: *ICC(3,k) (Intraclass Correlation Coefficient - two-way mixed effects, consistency, average measures - with 95% Confidence Interval*)

Pada TPACK *Self-Reported Questionnaire*, nilai ICC untuk aspek *Sufficiency* mencapai 0,74, yang merupakan skor tertinggi. Aspek *Clarity*, *Coherence*, dan *Relevance* mendapatkan nilai ICC masing-masing sebesar 0,65, 0,64, dan 0,64. Hasil penilaian ini juga terlihat serupa dengan *Practicality Assessment Sheet*. Aspek *Sufficiency* mendapatkan nilai ICC 0,74. Sedangkan, aspek *Clarity* dan *Coherence* menunjukkan skor reliabilitas sedikit lebih rendah, masing-masing sebesar 0,64 dan 0,63. Aspek *Relevance* menunjukkan nilai ICC terendah sebesar 0,53. Secara umum kedua instrumen ini sudah dapat dinyatakan valid, walaupun masih terdapat perbedaan interpretasi antar ahli, khususnya aspek *relevance*.

Rincian distribusi nilai *Aiken's V* per butir dari 3 validator menunjukkan bahwa pada T-SRQ (22 butir), mayoritas butir (17–20 butir per aspek) memperoleh V = 1,00, sedangkan butir yang memperoleh V = 0,89 meliputi S3 dan S5 (*Sufficiency*); S5, S8, S14, dan S18 (*Clarity*); S3, S4, S5, dan S18 (*Coherence*); serta S3, S4, S5, S8, dan S16 (*Relevance*). Pada PAS (18 butir), sebanyak 14–15 butir memperoleh V = 1,00, sedangkan butir dengan V = 0,89 meliputi S3, S5, dan S8 (*Sufficiency*); S5, S7, S8, dan S14 (*Clarity*); S3, S4, S5, dan S9 (*Coherence*); serta S3, S4, S5, dan S8 (*Relevance*). Seluruh butir yang memperoleh nilai 0,89 tersebut tetap memenuhi batas kritis validitas isi (≥ 0,89) dan telah diperbaiki redaksi kalimatnya sesuai saran validator.

Kepraktisan

Tahap awal uji kepraktisan e-modul TPACK dilakukan dengan uji coba terbatas pada 12 orang mahasiswa calon guru fisika. Kepraktisan e-modul TPACK dievaluasi berdasarkan empat dimensi, yaitu kemudahan penggunaan, manfaat materi, keterkaitan dengan pembelajaran fisika, serta waktu dan fleksibilitas penggunaan. Selain menentukan nilai kepraktisan e-modul TPACK, tahap uji coba terbatas juga telah memberikan informasi tentang reliabilitas internal dari instrumen *Practicality Assessment Sheet* melalui nilai *Cronbach's Alpha*. Keempat dimensi tersebut mendapatkan skor dalam kategori "*very practical*" dengan *internal consistency* instrumen yang sangat baik seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3. Dimensi kemudahan penggunaan memperoleh skor tertinggi sebesar 3,60, dengan nilai ICC 0,92, dan *Cronbach's Alpha* 0,91. Hasil ini menunjukkan bahwa antarmuka e-modul memiliki kemudahan akses dan navigasi yang dinilai secara konsisten oleh para mahasiswa. Dimensi keterkaitan dengan pembelajaran mendapatkan skor 3,48 dengan ICC 0,98 dan α 0,98. Integrasi konsep TPACK dalam pembelajaran telah disajikan secara sangat efektif di dalam e-modul. Hal ini juga sejalan dengan dimensi manfaat materi yang mendapatkan skor 3,42 dengan ICC 0,82 dan α 0,83. Dimensi Waktu dan Fleksibilitas memperoleh skor terendah yaitu 3,38 namun tetap masuk kategori "*very practical*", dengan ICC 0,95 dan α 0,92. Nilai tersebut menunjukkan bahwa e-modul dapat digunakan secara fleksibel dengan alokasi waktu yang dibutuhkan untuk mempelajarinya.

Tahapan uji coba dilanjutkan untuk skala yang diperluas dengan melibatkan dua kelas A dan B. Hasil nilai kepraktisan kedua kelas ditunjukkan pada Tabel 4. Terdapat beberapa perbedaan hasil penilaian kepraktisan e-modul TPACK dari kedua kelas tersebut. Dimensi keterkaitan dengan pembelajaran mencapai skor tertinggi sebesar 3,60 di kelas B (kategori "*very practical*"). Hasil ini mengindikasikan bahwa mahasiswa di kelas tersebut menyetujui adanya relevansi konten terhadap kebutuhan pembelajaran mereka. Sedangkan di kelas A, dimensi ini hanya mencapai skor 3,01, masuk dalam kategori "*practical*". Kedua data ini menunjukkan adanya perbedaan persepsi terkait konteks pembelajaran antara kelas.

Tabel 4. Hasil Nilai Kepraktisan E-Modul TPACK Uji Coba Diperluas

	Kelas A		**Kelas B**	
Dimension	Rerata Skor Kepraktisan	Kategori	Rerata Skor Kepraktisan	Kategori
Kemudahan Penggunaan	3,03 ± 0,17	*practical*	3,30 ± 0,15	*very practical*
Manfaat Materi	3,15 ± 0,22	*practical*	3,07 ± 0,25	*practical*
Keterkaitan dengan Pembelajaran	3,01 ± 0,15	*practical*	3,60 ± 0,28	*very practical*
Waktu dan Fleksibilitas	3,32 ± 0,17	*very practical*	3,50 ± 0,26	*very practical*
Reliability (Interrater Agreement)	ICC(3,k) 0,91 [0,85–0,95]	Kategori *excellent*	ICC(3,k) 0,89 [0,81–0,95]	Kategori *high*

Keterangan: ICC(3,k) (*Intraclass Correlation Coefficient - two-way mixed effects, consistency, average measures - with 95% Confidence Interval*)

Tabel 5. Hasil Uji Signifikansi Peningkatan TPACK Mahasiswa

Ranks					***Test Statistics***	
		N	*Mean Rank*	*Sum of Ranks*	Z	*Asymp. Sig. (2-tailed)*
post_A - pre_A	*Negative Ranks*	0	0,00	0,00	-4,380	< 0,001
	Positive Ranks	25	13,00	325,00		
	Ties	0				
	Total	25,00				
post_B - pre_B	*Negative Ranks*	0	0,00	0,00	-4,018	< 0,001
	Positive Ranks	21	11,00	231,00		
	Ties	0				
	Total	21,00				

Perbedaan juga terlihat pada dimensi kemudahan penggunaan, di mana kelas A memperoleh skor 3,03 (*practical*) sedangkan kelas B memperoleh skor 3,30 (*very practical*). Adanya perbedaan pengalaman belajar menggunakan e-modul TPACK dan kesiapan teknologi merupakan salah satu sebab terjadinya perbedaan ini. Dimensi manfaat materi cenderung sama di kedua kelas, dengan mendapatkan skor sekitar 3,15 di kelas A dan 3,07 di kelas B. Selanjutnya, dimensi waktu dan fleksibilitas juga menunjukkan adanya kesamaan hasil kategori kepraktisan, yaitu masing-masing

memperoleh skor 3,32 di kelas A dan 3,50 di kelas B. Nilai ICC yang tinggi di kedua kelas (0,91 di kelas A dan 0,89 di kelas B) mengonfirmasi bahwa para penilai memberikan kesepakatan yang tinggi. Berdasarkan hasil uji kepraktisan ini e-modul TPACK dinyatakan praktis untuk digunakan sebagai bahan ajar.

Tabel 6. Statistik Deskriptif *Pretest* dan *Posttest* per Kelas

Kelompok	Tahap Pengukuran	Skor Total (22–88) (Mean ± SD)	Rerata Skala (1,00–4,00) (Mean ± SD)	Median (IQR)	Selisih Kenaikan (Mean ± SD)
Kelas A	*Pretest*	32,16 ± 8,03	1,46 ± 0,36	32,00 (10,00)	+24,04 ± 6,37 poin
	Posttest	56,20 ± 10,95	2,55 ± 0,50	57,00 (19,00)	
Kelas B	*Pretest*	41,86 ± 9,05	1,90 ± 0,41	38,00 (8,00)	+21,10 ± 5,80 poin
	Posttest	62,95 ± 7,00	2,86 ± 0,32	62,00 (8,00)	

Efektivitas

Efektivitas e-modul TPACK ditentukan berdasarkan hasil uji signifikansi peningkatan skor *pre* dan *post-intervention*, level *N-Gain* dan *effect size*, serta kesamaan nilai *N-Gain* antar kedua kelas uji coba diperluas. Skor TPACK diperoleh berdasarkan isian *Self-Reported Questionnaire* oleh mahasiswa calon guru fisika. Berdasarkan skor *self-reported* TPACK pada masing-masing kelas, ditunjukkan adanya peningkatan yang signifikan antara *pre* dan *post-intervention* (Tabel 5). Hasil uji *Wilcoxon Signed-Rank Test* telah menunjukkan bahwa tidak terdapat mahasiswa yang mengalami penurunan skor TPACK. Seluruh mahasiswa, 25 di kelas A dan 21 di kelas B menunjukkan peningkatan skor dengan nilai Z masing-masing -4,380 dan -4,018 serta signifikansi $p < 0,001$. Nilai mean rank yang tinggi (13,00 untuk kelas A dan 11,00 untuk kelas B) serta *sum of ranks* yang besar menunjukkan kenaikan skor yang konsisten di seluruh mahasiswa. Detail deskripsi data hasil uji coba disajikan pada Tabel 6.

Selanjutnya, analisis *N-Gain* (Tabel 7) menunjukkan rata-rata peningkatan sebesar 0,44 (SD = 0,15) pada Kelas A dan 0,46 (SD = 0,10) pada Kelas B, yang keduanya masuk dalam kategori sedang. Walaupun *N-Gain* hanya dalam kategori sedang, tetapi *effect size* masing-masing kelas adalah sebesar 0,876 dan 0,877 yang tergolong dalam kategori *large effect*. *N-Gain dan effect size* telah menunjukkan konsistensi arah peningkatan skor persepsi diri TPACK mahasiswa di kedua kelas. Bukti statistik berikutnya yang dikumpulkan adalah uji perbandingan *N-Gain* antar kelas menggunakan *Mann-Whitney U Test* (Tabel 8). Hasilnya menunjukkan nilai Z = -1,191 dengan p = 0,234, yang menunjukkan tidak ada perbedaan signifikan antara *N-Gain* kelas A dan kelas B. Hasil ini menunjukkan belum ditemukannya bukti perbedaan distribusi *N-Gain* yang signifikan secara statistik antara Kelas A dan Kelas B pada konteks uji coba ini. Hasil keseluruhan analisis data ini mengindikasikan adanya peningkatan signifikan pada skor laporan diri TPACK mahasiswa setelah implementasi e-modul di kedua kelas.

Tabel 7. Level *N-Gain* dan *Effect Size*

Kelas	N-Gain (rerata ± SD)	Level	Z	N	r	*Effect Size*
A	0,44 ± 0,15	*medium*	-4,38	25	0,876	*large*
B	0,46 ± 0,10	*medium*	-4,02	21	0,877	*large*

Keterangan: Z = nilai hitung dari *Wilcoxon*; N = jumlah sampel; r = *effect size coefficient*

Tabel 8. Hasil Uji Beda N-Gain antar Kelas pada Uji Coba Diperluas

Ranks					***Test Statistics***		
Kelas		N	*Mean Rank*	*Sum of Ranks*	*Mann-Whitney U*	Z	*Asymp. Sig. (2-tailed)*
N-Gain	A	25	21,34	533,50	208,500	-1,191	0,234
	B	21	26,07	547,50			

Keterangan: Z = nilai hitung statistik; N = jumlah sampel; r = *effect size coefficient*

Wujud kesiapan e-modul TPACK dapat digunakan secara lebih luas telah ditunjukkan oleh respons mahasiswa setelah menggunakan untuk belajar. Hasil analisis respons mahasiswa pada uji coba luas menunjukkan penilaian yang baik di semua dimensi evaluasi, seperti yang ditunjukkan dalam Tabel 9. Pada dimensi "kepuasan terhadap konten TPACK", kelas A memberikan skor rata-rata 3,07 dan kelas B 3,04. Dimensi "kemudahan akses dan interaksi" menunjukkan skor yang serupa,

dengan kelas A memperoleh 3,11 dan kelas B 3,01. Nilai ini menunjukkan bahwa kemudahan akses teknis dan interaksi dalam e-modul telah diterima dengan baik oleh sebagian besar mahasiswa. Selanjutnya pada aspek "relevansi dengan pembelajaran fisika", juga tidak terdapat perbedaan yang cukup besar antara kedua kelas. Masing-masing kelas A dan kelas B mendapatkan skor 3,18 dan 3,08. Dimensi "dampak motivasi dan pengembangan diri" juga menunjukkan hasil yang baik, masing-masing mendapatkan skor 3,21 dan 3,11. Hasil ini mengindikasikan bahwa e-modul memberikan dampak positif, tidak hanya secara kognitif tetapi juga afektif dalam meningkatkan motivasi dan pengembangan diri mahasiswa.

Tabel 9. Skor Respons Mahasiswa terhadap E-Modul pada Setiap Kelas Uji Coba Luas

	Kelas A		***Kelas B***	
Dimensi	*Rerata Skor Respons*	*Kategori*	*Rerata Skor Respons*	*Kategori*
Kepuasan terhadap Konten TPACK	3,07	*good*	3,04	*good*
Kemudahan Akses dan Interaksi	3,11	*good*	3,01	*good*
Relevansi dengan Pembelajaran Fisika	3,18	*good*	3,08	*good*
Dampak Motivasi dan Pengembangan Diri	3,21	*good*	3,11	*good*
Reliability (Interrater Agreement)	ICC(3,k) 0,57	Kategori *moderate*	ICC(3,k) 0,62	Kategori *moderate*

Keterangan: ICC(3,k) = *Intraclass Correlation Coefficient (two-way mixed effects, consistency, average measures - with 95% Confidence Interval)*

Nilai ICC untuk reliabilitas antar-penilai pada masing-masing kelas relatif moderat, yakni 0,57 untuk kelas A dan 0,62 untuk kelas B. Variasi persepsi yang masih wajar diantara mahasiswa telah ditunjukkan oleh hasil ICC ini. Secara keseluruhan, pola respons ini menegaskan bahwa e-modul TPACK telah berhasil menjembatani kesenjangan antara teori dan praktik pembelajaran, serta mampu memenuhi berbagai aspek kebutuhan pembelajaran dari segi konten, teknis, dan dampak motivasional.

Pembahasan

Pengembangan e-modul TPACK (*Technological, Pedagogical, and Content Knowledge*) dalam konteks pendidikan fisika menjadi sebuah terobosan untuk meningkatkan pengetahuan mahasiswa calon guru fisika. Salah satu pengetahuan tersebut adalah penggunaan teknologi dalam era digital ini. Integrasi tiga komponen dasar pengetahuan, yaitu teknologi, pedagogi, dan konten materi, merupakan syarat mendasar untuk melaksanakan pembelajaran yang efektif (Hanik et al., 2022; Puspitasari et al., 2022). Konten e-modul ini tidak hanya melakukan integrasi ketiga pengetahuan tersebut, tetapi juga memperhatikan pengetahuan kontekstual yang memperkuat relevansi pengajaran fisika dalam lingkungan belajar berbasis teknologi.

Berdasarkan hasil penelitian, khususnya penilaian validitas, e-modul TPACK menunjukkan kelayakan untuk diterapkan sebagai pendukung proses perkuliahan. Lima dari tujuh dimensi penilaian validitas menunjukkan keselarasan antara validitas tinggi dan interrater reliability yang baik. Fakta ini merupakan indikator kuat bahwa sebagian besar aspek materi dan media sudah mendapat pengakuan konsensus dari para ahli. Hasil ini sangat diperlukan karena menjadi salah satu syarat dalam pengembangan bahan ajar (Elangovan & Sundaravel, 2021; Taber, 2018). Keselarasan antara skor validitas dan interrater reliability menunjukkan bahwa konten dan kegunaan e-modul telah memenuhi kriteria empiris atas kelayakan bahan ajar.

Dimensi kelayakan isi materi dan kemudahan penggunaan telah mendapatkan validitas tertinggi dan reliabilitas yang baik. Hasil ini menjadi salah satu keunggulan e-modul TPACK. Temuan ini mendukung konsep bahwa penyampaian materi yang mudah dipahami dan interaksi pengguna yang efisien merupakan faktor krusial atas efektivitas suatu intervensi pembelajaran berbasis teknologi (Sintawati & Margunayasa, 2021). Bahasa penyajian materi, konsistensi, dan kegrafikan telah menjadi dimensi e-modul TPACK yang disepakati valid oleh para ahli. Keserasian antara penyampaian informasi dan estetika tampilan menjadi salah satu syarat untuk mendukung proses pembelajaran berbasis teknologi (Koehler et al., 2013).

Terdapat dua dimensi yang memiliki interrater reliability level moderate, yaitu struktur penyajian materi dan tampilan desain layar. Para ahli memiliki perbedaan persepsi terkait kedua dimensi tersebut. Meskipun indikator dalam dimensi ini telah diakui memiliki validitas yang tinggi, tetapi adanya

perbedaan ini memberikan peluang untuk evaluasi terhadap e-modul TPACK. Sebagai respons atas perbedaan tersebut, struktur dan urutan konten dalam e-modul telah dievaluasi oleh peneliti untuk memperjelas alur pembelajaran sehingga bisa meminimalisir variabilitas persepsi pengguna, sebagaimana yang ditegaskan dalam alur pengembangan media pembelajaran interaktif yang efektif (Mahendri et al., 2023). Selain itu, standarisasi tampilan desain layar, dengan penekanan pada prinsip-prinsip desain universal, telah dilakukan untuk meminimalkan perbedaan persepsi, sejalan dengan strategi peningkatan validitas tampilan dalam pengembangan materi ajar (Ananda & Usmeldi, 2023).

Implikasi hasil penilaian kelayakan ini memberikan gambaran tentang dimensi e-modul TPACK yang masih berpotensi untuk dilakukan pengembangan secara berkesinambungan (de Souza et al., 2020). Struktur penyajian materi dan desain tampilan layar menjadi dimensi yang dapat terus dioptimalkan agar terjadi peningkatan kualitas dan relevansi e-modul terhadap penggunanya. Secara konkret, contoh perubahan sebelum–sesudah (Draft I ke Draft II) meliputi: (1) pada Draft I beberapa kegiatan belajar hanya menyajikan teks teori tanpa video contoh (catatan validator butir 20) dan kuis belum menampilkan umpan balik (catatan validator butir 26), kemudian pada Draft II setiap kegiatan belajar diseragamkan mengikuti alur 'Konsep Teoretis → Contoh Kasus Fisika → Video Demonstrasi → Aktivitas Praktik & Kuis Berumpan Balik Otomatis' sebagai *scaffolding* pedagogis; dan (2) tampilan layar yang semula memanjang dalam satu halaman penuh diubah menjadi sistem menu lipat (*collapsible accordion*) dengan bilah navigasi samping tetap untuk menurunkan beban kognitif visual mahasiswa.

Proses uji coba menjadi tahapan berikutnya yang sangat penting dilakukan untuk membuktikan bahwa e-modul TPACK praktis digunakan dan efektif melatihkan TPACK pada mahasiswa calon guru fisika. Untuk mendukung langkah tersebut, telah dilakukan penilaian validitas terhadap instrumen penelitian yang dibutuhkan, yaitu TPACK *Self-Reported Questionnaire* (T-SRQ) dan *Practicality Assessment Sheet* (PAS). Hasil penilaian menunjukkan bahwa secara umum kedua instrumen ini sudah valid (berdasarkan *Aiken's Validity*), tetapi ada dimensi penilaian yang masih mendapatkan *interrater reliability* level "*moderate*". Persepsi ahli untuk memberikan penilaian menjadi hal yang wajar terjadi, tetapi mampu menjadi tanda atas aspek kejelasan struktur suatu instrumen penelitian (Bobak et al., 2018; Vishnevetsky et al., 2018). Variasi hasil penilaian terjadi pada aspek "*relevance*" pada PAS, yang mengindikasikan perlunya peningkatan agar hasil penilaian lebih konsisten.

Hasil penilaian reliabilitas yang berada pada kategori moderat berpotensi disebabkan oleh kompleksitas konsep TPACK yang sendiri merupakan kerangka pengetahuan multidimensi. Integrasi antara aspek teknologi, pedagogi, dan konten tidak jarang diinterpretasikan beragam oleh para peneliti. Kompleksitas TPACK inilah yang menjelaskan adanya perbedaan persepsi antar validator meskipun validitas instrumen telah memenuhi standar kelayakan yang tinggi (Zamanzadeh et al., 2015). Kondisi ini mendukung pemikiran bahwa reliabilitas antarpenilai (*interrater reliability*) merupakan salah satu aspek krusial yang harus mendapatkan perhatian dalam pengembangan instrumen, seperti yang telah disoroti oleh penelitian-penelitian sebelumnya (Bobak et al., 2018; Vishnevetsky et al., 2018). Implikasi praktis dari temuan validitas T-SRQ dan PAS digunakan sebagai dasar untuk menentukan strategi implementasinya. Penggunaan instrumen dalam uji coba penelitian langsung didampingi untuk memfasilitasi jika ada kesalahan persepsi penilai. Instrumen juga sudah dilengkapi panduan pengisian yang detail.

Temuan dari uji terbatas secara konseptual telah memberikan bukti bahwa e-modul TPACK memiliki kepraktisan yang tinggi dalam berbagai dimensi. Mahasiswa semester akhir sebagai penilai dalam uji coba terbatas ini, telah memberikan penilaian yang konsisten terhadap kepraktisan e-modul TPACK. Hal ini menunjukkan bahwa pada kondisi awal, e-modul TPACK telah memenuhi dimensi kegunaan dan fleksibilitas suatu bahan ajar dalam konteks pembelajaran digital (Ananda & Usmeldi, 2023). Hasil penilaian juga relevan dengan penilaian validitas oleh para ahli dan temuan penelitian lain tentang peran penting struktur penyajian materi yang terintegrasi dengan media interaktif dalam meningkatkan efektivitas pembelajaran (Holisoh et al., 2025). Konsistensi penilaian kepraktisan tersebut juga didukung oleh

reliabilitas internal PAS yang tinggi, yang menunjukkan konsistensi internal antar-butir yang baik pada kondisi pengujian ini, melengkapi bukti validitas isi (*Aiken's V*) dan kesepakatan antar-penilai (ICC), meskipun nilai alpha yang tinggi tidak dengan sendirinya membuktikan validitas konstruk instrumen (Taber, 2018).

Berlanjut ke tahap uji coba diperluas, terjadi perbedaan persepsi antar kelas terhadap kepraktisan e-modul TPACK. Hal ini menunjukkan bahwa konteks penerapan e-modul dan karakteristik kelompok pengguna dapat memengaruhi penilaian kepraktisannya. Terdapat perbedaan hasil penilaian antar kelas uji coba, khususnya pada dimensi kemudahan penggunaan dan keterkaitan materi. Perbedaan ini menyoroti perlunya ada update relevansi konten e-modul yang lebih kontekstual agar relevansi pembelajaran antar kelas dapat ditingkatkan. Temuan ini menggarisbawahi peran faktor-faktor kontekstual yang memengaruhi penilaian praktis, seperti latar belakang penggunaan media digital dan kesiapan infrastruktur pendukung pembelajaran (Hikmawati et al., 2024). Karena variabel latar belakang literasi digital dan kesiapan infrastruktur individu tidak diukur secara langsung dalam penelitian ini, faktor-faktor tersebut diposisikan sebagai penjelasan yang mungkin (*plausible explanation*) yang memerlukan pengujian empiris melalui pengumpulan data profil akses teknologi mahasiswa pada penelitian lanjutan.

Hasil analisis perbandingan sekuensial antara tahap uji coba terbatas dan diperluas menunjukkan bahwa beberapa dimensi mempertahankan kepraktisannya. Tetapi di lain sisi juga muncul penurunan persepsi pada dimensi penggunaan dan relevansi pembelajaran. Fakta ini menunjukkan bahwa dinamika kondisi nyata saat implementasi dengan jumlah partisipan yang lebih heterogen, dapat memengaruhi nilai kepraktisan e-modul TPACK. Penyesuaian struktur penyajian materi menjadi aspek krusial untuk diperbaiki dalam pengembangan selanjutnya (Taber, 2018).

Pengujian kepraktisan e-modul TPACK ini memberikan beberapa implikasi penting. Pertama, meskipun e-modul mampu menghasilkan materi yang relevan dan mudah diakses pada tahap uji coba terbatas, tetapi perbedaan persepsi antar kelas muncul saat uji coba diperluas. Hal ini mengindikasikan perlunya penyesuaian yang lebih mendalam, terutama pada aspek relevansi materi. Kedua, konsistensi tingkat reliabilitas yang tinggi di kedua tahap pengujian menunjukkan bahwa instrumen PAS memiliki fondasi yang kuat untuk menilai kepraktisan, tetapi tetap perlu dilakukan evaluasi berkelanjutan dan penyempurnaan item-item yang cenderung dipengaruhi oleh konteks implementasi (Taber, 2018). Dengan demikian, pengembangan e-modul ke depan harus memprioritaskan mekanisme umpan balik dari pengguna. Hal ini ditujukan agar e-modul lebih sensitif terhadap perbedaan konteks pengguna serta meningkatkan aspek interaktivitas dan relevansi materi guna mendukung pembelajaran yang lebih efektif.

Analisis hasil uji coba diperluas pada penelitian ini diilustrasikan sebagai tiga tahapan analisis statistik komplementer atas dataset *pretest–posttest* yang sama. Hasilnya memberikan implikasi beberapa aspek yang saling melengkapi untuk mendukung klaim efektivitas e-modul TPACK. Struktur bukti empiris untuk klaim tersebut telah disusun menjadi tiga lapisan, yaitu uji signifikansi peningkatan skor TPACK, analisis *N-Gain* dan *effect size*, serta uji perbandingan antar kelompok. Ketiga lapisan menjadi landasan empiris yang kokoh untuk menunjukkan adanya perubahan yang nyata terhadap skor TPACK mahasiswa. Lapisan pertama memberikan konfirmasi adanya peningkatan skor TPACK secara signifikan. Lapisan kedua, melalui analisis besar perubahan skor, mengungkap bahwa walaupun peningkatan rata-rata (N-Gain) hanya dalam level moderat, tetapi nilai *effect size* yang sangat besar menunjukkan potensi dampak e-modul terhadap TPACK di seluruh mahasiswa pada kedua kelas, meskipun belum mengukur kinerja praktik mengajar secara langsung (Bahtiar et al., 2023). Lapisan ketiga membandingkan distribusi *N-Gain* antarkelas dan menunjukkan belum ditemukannya perbedaan yang signifikan secara statistik antara Kelas A dan Kelas B, walaupun ketiadaan perbedaan tersebut belum membuktikan kesetaraan mutlak maupun generalisasi universal lintas konteks (Mahendri et al., 2023).

Uji *Wilcoxon* yang telah dilakukan menunjukkan adanya peningkatan skor TPACK yang signifikan pada mahasiswa calon guru setelah penerapan e-modul. Temuan ini menunjukkan adanya peningkatan positif pada skor persepsi diri (*self-reported*) TPACK mahasiswa setelah mengikuti perkuliahan berbantuan e-modul. Karakteristik

TPACK yang merupakan integrasi pengetahuan teknologi, pedagogi, dan konten, memang dapat dilatihkan dengan memberikan pengalaman langsung kepada mahasiswa melalui *scaffolding*, salah satunya adalah e-modul (Tondeur et al., 2020). E-modul mampu memberikan pengalaman bagi mahasiswa sesuai konteks pembelajaran berbasis teknologi informasi yang berdampak pada pengetahuan tentang *educational environments* (*Contextual Knowledge*) (Petko et al., 2025). Uji *Wilcoxon* merupakan salah satu metode statistika non-parametrik yang sensitif terhadap perubahan peringkat dalam data berpasangan. Hasil uji ini menunjukkan adanya perubahan skor yang signifikan setelah perkuliahan berbantuan e-modul, tetapi belum memastikan bahwa perubahan tersebut disebabkan oleh e-modul (Aktaş & Özmen, 2020). Meskipun demikian, karena kedua kelas sama-sama menerima intervensi tanpa kelompok kontrol dan luaran berupa laporan diri, perubahan skor tersebut perlu ditafsirkan dengan mempertimbangkan kemungkinan pengaruh tes ulang (*testing effect*), kegiatan penugasan perkuliahan penyerta, ekspektasi peserta, serta perubahan acuan penilaian diri mahasiswa setelah mempelajari materi TPACK.

Perbedaan karakteristik antara *N-Gain* dan *effect size* memberikan gambaran multidimensi mengenai dampak yang dihasilkan oleh e-modul. *N-Gain* mampu menentukan level ketercapaian pembelajaran secara individual. *N-Gain* merepresentasikan proporsi peningkatan nilai yang relatif terhadap potensi nilai maksimum, sehingga dapat mengeliminasi perbedaan pengetahuan awal antar peserta dan memberikan gambaran terhadap efisiensi intervensi pembelajaran (Aktaş & Özmen, 2020). Sementara itu, nilai *effect size* yang besar mengindikasikan bahwa peningkatan tersebut bermakna secara praktis dalam konteks implementasi e-modul. *Effect size yang mencapai kriteria besar menunjukkan besarnya perubahan skor dalam sampel penelitian ini.* Kedua ukuran tersebut menunjukkan peningkatan skor persepsi diri TPACK pada sampel penelitian ini setelah perkuliahan berbantuan e-modul, serta memberikan arah pengembangan selanjutnya dalam program pelatihan calon guru (Aktaş & Özmen, 2020). Penerapan e-modul berpotensi mendukung persiapan calon guru untuk menghadapi tuntutan pendidikan abad ke-21.

Hasil uji *Mann–Whitney* menunjukkan tidak terdapat perbedaan signifikan dalam peningkatan N-Gain antara dua kelas uji coba yang menggunakan e-modul TPACK. Temuan ini menunjukkan belum ditemukannya bukti perbedaan distribusi N-Gain antara kedua kelas pada sampel penelitian ini. Hasil tersebut belum memastikan bahwa peningkatan skor berlaku seragam pada peserta dengan karakteristik yang berbeda (Mahendri et al., 2023). Hal ini sejalan dengan rekomendasi dari penelitian terdahulu tentang pentingnya bahan ajar yang mampu menyesuaikan karakteristik pembelajar untuk meningkatkan pengetahuan yang merata (Tondeur et al., 2016, 2020). Meskipun hasil uji menunjukkan belum ada bukti perbedaan capaian *N-Gain* antara kedua kelas dalam penelitian ini, temuan tersebut belum membuktikan kesetaraan efek maupun hubungan sebab akibat, sehingga replikasi dengan kelompok kontrol tetap diperlukan pada skala yang lebih luas (Tondeur et al., 2016).

Hasil analisis skor respons mahasiswa terhadap e-modul TPACK mengungkapkan keterkaitan antar setiap dimensinya (Tabel 9). Dimensi kemudahan akses dan interaksi menjadi fondasi teknis yang memainkan peran krusial sebagai pintu awal penggunaan e-modul. Jika mahasiswa merasa bahwa e-modul mudah diakses dan interaktif, maka mereka cenderung mudah melakukan eksplorasi konten dan lebih termotivasi dalam proses pembelajaran. Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian lain yang menunjukkan bahwa aspek *usability* dalam bahan ajar mempunyai korelasi positif dengan penerimaan dan motivasi belajar (Chuenyindee et al., 2022). Dimensi kepuasan terhadap konten TPACK dan relevansinya dengan pembelajaran fisika membentuk persepsi nilai praktis dari e-modul. Kedua dimensi ini berperan dalam terbentuknya pemahaman yang utuh tentang TPACK karena memfasilitasi konteks nyata dari integrasi teknologi, pedagogi, dan konten dalam pembelajaran fisika. Hal ini merupakan bentuk kepraktisan yang mampu menjembatani kesenjangan antara pengetahuan teoretis dan penerapannya, sesuai dengan perspektif integratif dalam kerangka TPACK (Handayani et al., 2023; Herring et al., 2016). Konsep ini juga didukung oleh penelitian yang menekankan pentingnya relevansi dan kepuasan terhadap konten sebagai faktor penentu efektivitas bahan ajar digital (Mahendri et al., 2023; Sintawati & Margunayasa, 2021).

Respons mahasiswa terhadap e-modul TPACK dalam uji coba diperluas menggambarkan penerimaan yang sangat positif di seluruh dimensi. Terdapat perbedaan respons mahasiswa antar kelas, tetapi hal ini mencerminkan adanya faktor kontekstual tertentu, sebagai contoh keberagaman karakteristik mahasiswa. Keragaman individu di dalam persepsi pengguna merupakan realitas yang wajar ketika menilai produk pembelajaran digital. Variasi tersebut tidak selalu menandakan kelemahan bahan ajar, tetapi dapat menandakan adaptabilitas terhadap preferensi dan gaya belajar yang berbeda (Ananda & Usmeldi, 2023; Hammad et al., 2020). Pengembangan e-modul TPACK secara berkelanjutan perlu dilakukan dengan strategi integrasi kontekstual yang adaptif terhadap karakteristik pengguna untuk meningkatkan penerimaan responsnya (Arzak & Prahani, 2023).

Implikasi pengembangan selanjutnya dari analisis hubungan antar dimensi ini membuka peluang untuk penyempurnaan aspek konten dan kontekstual. Misalnya, meskipun keseluruhan respons sangat positif, area dengan skor relatif lebih rendah, seperti Kepuasan terhadap Konten TPACK di salah satu kelas, menunjukkan perlunya pengayaan materi atau personalisasi konten agar lebih sesuai dengan konteks pembelajaran fisika tertentu. Pendekatan ini sejalan dengan rekomendasi untuk integrasi metode pembelajaran kontekstual dan adaptif yang menekankan perlunya modul pendukung atau pelatihan instruktur guna meningkatkan penerimaan respons mahasiswa (Arzak & Prahani, 2023). Lebih lanjut, perbedaan skor antar kelas menunjukkan bahwa strategi implementasi harus mempertimbangkan karakteristik kelompok pengguna agar instrumen dapat diterapkan dengan efektif secara luas. Secara keseluruhan temuan awal ini mendukung potensi e-modul TPACK sebagai bahan ajar yang valid dan praktis untuk mendukung peningkatan persepsi diri TPACK mahasiswa calon guru fisika. Dibandingkan dengan studi pengembangan TPACK calon guru sains/fisika terdahulu (Aktaş & Özmen, 2020; Große-Heilmann et al., 2022; Schmid et al., 2021), kontribusi desain spesifik dari E-Modul TPACK ini terletak pada penyediaan alur pelatihan mandiri yang mengintegrasikan identifikasi konseptual fisika dengan eksperimen virtual berbasis simulasi dan evaluasi formatif Web 2.0 dalam konteks pembelajaran jarak jauh.

SIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa e-modul TPACK yang dikembangkan untuk mahasiswa Tadris Fisika telah memenuhi kriteria validitas dan kepraktisan yang tinggi. Baik dari unsur materi dan media, e-modul memperoleh skor validitas yang sangat tinggi dengan *interrater reliability* yang memadai. Kepraktisan penggunaan e-modul juga mendapat penilaian positif, baik pada uji terbatas maupun uji coba diperluas, sehingga dapat diakses secara efektif dalam perkuliahan. Selain itu, penerapan e-modul menghasilkan peningkatan signifikan pada skor persepsi diri (*self-reported*) TPACK mahasiswa di kedua kelas dan tidak ditemukan perbedaan signifikan antarkelas. Respons mahasiswa terhadap penggunaan e-modul pun menunjukkan tingkat penerimaan yang tinggi, dengan penilaian yang konsisten dalam hal kepuasan konten, kemudahan akses, relevansi pembelajaran, serta dampak motivasi dan pengembangan diri. Implikasi langsung temuan ini bagi pendidikan fisika adalah bahwa e-modul TPACK dapat digunakan sebagai perangkat *scaffolding* perkuliahan untuk membekali calon guru fisika dalam merancang pembelajaran jarak jauh berbantuan simulasi interaktif dan asesmen formatif digital.

Berdasarkan hasil temuan, disarankan agar implementasi e-modul TPACK dilakukan secara lebih luas untuk memenuhi kebutuhan pembelajaran yang bervariasi dalam konteks pendidikan modern. Pengembangan lanjutan perlu difokuskan pada penyesuaian konten agar lebih kontekstual dan relevan dengan berbagai disiplin ilmu, khususnya dalam pembelajaran fisika. Pendampingan dan pelatihan bagi mahasiswa juga perlu ditingkatkan untuk memastikan pemahaman yang mendalam mengenai konsep TPACK sehingga setiap individu mampu mengoptimalkan potensi pembelajaran digital. Selain itu, tinjauan berkala terhadap instrumen pengukuran dan metode evaluasi harus tetap dilakukan untuk menjaga konsistensi dan akurasi pengukuran, serta untuk merespons dinamika perubahan dalam teknologi dan metodologi pembelajaran. Implementasi yang komprehensif dan disertai monitoring jangka panjang diharapkan dapat meningkatkan keberlanjutan dan efektivitas penggunaan e-modul untuk melatihkan TPACK. Keterbatasan penelitian ini terletak pada penggunaan desain *one-group*

pretest–posttest tanpa kelompok pembanding, ukuran sampel dari satu institusi (N = 46), serta pengukuran efektivitas yang masih berbasis laporan diri (*self-reported* TPACK) dan belum menganalisis skor rubrik kinerja atas produk video, LKPD simulasi, dan praktik mengajar mahasiswa. Oleh karena itu, penelitian lanjutan disarankan menggunakan desain kuasi-eksperimen dengan kelompok pembanding serta mengintegrasikan asesmen kinerja autentik (*performance assessment*) terhadap produk perangkat pembelajaran dan praktik mengajar calon guru fisika.

UCAPAN TERIMA KASIH

Peneliti menyampaikan terima kasih kepada Kementerian Agama Republik Indonesia, khususnya satuan kerja UIN Sayyid Ali Rahmatullah Tulungagung. Penelitian ini merupakan bagian dari program Bantuan Operasional Perguruan Tinggi Negeri (BOPTN) sesuai hasil surat penetapan penerima bantuan Nomor 352 Tahun 2025, Universitas Islam Negeri Sayyid Ali Rahmatullah Tulungagung.

PERNYATAAN

Kontribusi Penulis: Gaguk Resbiantoro: konseptualisasi, metodologi, kurasi data, analisis data, dan penulisan draf artikel. Moh. Zaha Faizul Muttaqi: penyusunan instrumen, pengumpulan data lapangan, dan visualisasi e-modul.

Pendanaan: Penelitian ini didanai oleh Universitas Islam Negeri Sayyid Ali Rahmatullah Tulungagung dengan nomor SK: 352 Tahun 2025 tentang Penetapan Penerima Bantuan Operasional Perguruan Tinggi Negeri (BOPTN).

Konflik Kepentingan: Para penulis menyatakan tidak ada konflik kepentingan.

Pernyataan Penggunaan Kecerdasan Artifisial (AI): Dalam penyusunan naskah ini, penulis menggunakan Gemini AI untuk menemukan kesalahan ketik, memperbaiki bahasa dan keterbacaan, serta *cross check* referensi. Setelah menggunakan aplikasi tersebut, penulis telah menelaah dan menyunting isi seperlunya serta bertanggung jawab penuh atas isi publikasi.

Persetujuan Etik: Penelitian ini dilaksanakan sesuai dengan prinsip etika Deklarasi Helsinki. Persetujuan setelah penjelasan (*informed consent*) telah diperoleh dari seluruh partisipan sebelum pengumpulan data, dan seluruh data pribadi dianonimkan untuk menjaga kerahasiaan.

Ketersediaan Data: Data yang mendukung temuan penelitian ini tersedia dari penulis korespondensi atas permintaan yang wajar.

REFERENSI

Ait Ali, D., Khabbache, H., Senhaji, F., Ouazizi, K., El Alami, L., Luigi Bragazzi, N., & Chirico, F. (2026). A multi-centric investigation of technology integration in health professions education: The importance of educators' technological pedagogical and content knowledge. *E-Learning and Digital Media, 23(2), 155–173.* https://doi.org/10.1177/20427530241239405

Aktaş, İ., & Özmen, H. (2020). Investigating the impact of TPACK development course on pre-service science teachers' performances. *Asia Pacific Education Review*, *21*(4), 667–682. https://doi.org/10.1007/s12564-020-09653-x

Al-Abdullatif, A. M. (2019). Auditing the TPACK confidence of pre-service teachers: The case of Saudi Arabia. *Education and Information Technologies*, *24*(6), 3393–3413. https://doi.org/10.1007/s10639-019-09924-0

Ananda, P. N., & Usmeldi, U. (2023). Validity and practicality of e-module model inquiry based online learning to improve student competence. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, *9*(4), 2010–2017. https://doi.org/10.29303/jppipa.v9i4.3563

Arzak, K. A., & Prahani, B. K. (2023). Practicality of augmented reality books in physics learning: A literature review. *JPPS (Jurnal Penelitian Pendidikan Sains)*, *12*(2), 138–154. https://doi.org/10.26740/jpps.v12n2.p138-154

Bahtiar, B., Yusuf, Y., Doyan, A., & Ibrahim, I. (2023). Trend of technology pedagogical content knowledge (TPACK) research in 2012-2022: Contribution to science learning of 21st century. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, *9*(5), 39–47. https://doi.org/10.29303/jppipa.v9i5.3685

Battelle for Kids. (2019). Framework for 21st century learning definitions. In *Partnership for 21st Century Learning*. http://static.battelleforkids.org/documents/p21/P21_Framework_DefinitionsBFK.pdf

Bobak, C. A., Barr, P. J., & O'Malley, A. J. (2018). Estimation of an inter-rater intra-class correlation coefficient that overcomes common assumption violations in the assessment of health measurement scales. *BMC Medical Research Methodology*, *18, Article 93.* https://doi.org/10.1186/s12874-018-0550-6

Brown, A. L., Myers, J., & Collins, D. (2021). How pre-service teachers' sense of teaching efficacy and preparedness to teach impact performance during student teaching. *Educational Studies*, *47*(1), 38–58. https://doi.org/10.1080/03055698.2019.1651696

Chuenyindee, T., Montenegro, L. D., Ong, A. K. S., Prasetyo, Y. T., Nadlifatin, R., Ayuwati, I. D., Sittiwatethanasiri, T., & Robas, K. P. E. (2022). The perceived usability of the learning management system during the COVID-19 pandemic: Integrating system usability scale, technology acceptance model, and task-technology fit. *Work*, *73*(1), 41–58. https://doi.org/10.3233/WOR-220015

Claro, M., Castro-Grau, C., Ochoa, J. M., Hinostroza, J. E., & Cabello, P. (2024). Systematic review of quantitative

research on digital competences of in-service school teachers. *Computers & Education, 215*(July 2023), 105030. https://doi.org/10.1016/j.compedu.2024.105030

Cohen, J. (1992). A power primer. *Psychological Bulletin*, *112*(1), 155–159. https://doi.org/10.1037/0033-2909.112.1.155

de Souza, A. C. C., Moreira, T. M. M., & Borges, J. W. P. (2020). Development of an appearance validity instrument for educational technology in health. *Revista Brasileira de Enfermagem*, *73(Suppl. 6), Article e20190559.* https://doi.org/10.1590/0034-7167-2019-0559

Elangovan, N., & Sundaravel, E. (2021). Method of preparing a document for survey instrument validation by experts. *MethodsX*, *8, Article 101326.* https://doi.org/10.1016/j.mex.2021.101326

Fahmi, A. N., Yusuf, M., & Muchtarom, M. (2021). Integration of technology in learning activities: E-module on islamic religious education learning for vocational high school students. *Journal of Education Technology, 5(2), 282–290.* https://doi.org/10.23887/jet.v5i2.35313

Fahmi, S., Rahmawati, R. Y., & Priwantoro, S. W. (2022). Two-variables linear system: A smartphone-based-e-module with a realistic mathematic education approach. *Kreano Jurnal Matematika Kreatif-Inovatif*, *13*(1), 55–66. https://doi.org/10.15294/kreano.v13i1.31661

Große-Heilmann, R., Riese, J., Burde, J.-P., Schubatzky, T., & Weiler, D. (2022). Fostering pre-service physics teachers' pedagogical content knowledge regarding digital media. *Education Sciences*, *12*(7), 440. https://doi.org/10.3390/educsci12070440

Hammad, R., Khan, Z., Safieddine, F., & Ahmed, A. (2020). A review of learning theories and models underpinning technology-enhanced learning artefacts. *World Journal of Science Technology and Sustainable Development*, *17*(4), 341–354. https://doi.org/10.1108/wjstsd-06-2020-0062

Handayani, S., Hussin, M., & Norman, H. (2023). Technological pedagogical content knowledge (TPACK) model in teaching: A review and bibliometric analysis. *Pegem Journal of Education and Instruction, 13(3), 176–190.* https://doi.org/10.47750/pegegog.13.03.19

Hanik, E. U., Puspitasari, D., Safitri, E., Firdaus, H. R., Pratiwi, M., & Inayah, R. N. (2022). Integrasi pendekatan TPACK (technological, pedagogical, content knowledge) guru sekolah dasar SIKL dalam melaksanakan pembelajaran era digital. *Jeid Journal of Educational Integration and Development*, *2*(1), 15–27. https://doi.org/10.55868/jeid.v2i1.97

Herring, M. C., Meacham, S., & Mourlam, D. (2016). TPACK development in higher education. In M. C. Herring, P. Mishra, & M. J. Koehler (Eds.), *Handbook of Technological Pedagogical Content Knowledge (TPACK) for Educators* (2nd ed., pp. 207–224). Routledge. https://doi.org/10.4324/9781315771328

Hikmawati, H., Suastra, I. W., Suma, K., Sudiatmika, A. A. I. A. R., & Susanti, D. (2024). Analysis of the practicality of google sites-based teaching materials to improve student learning outcomes. *Jurnal Ilmiah Profesi Pendidikan*, *9*(2), 1160–1167. https://doi.org/10.29303/jipp.v9i2.2194

Holisoh, A., Pahamzah, J., & Hidayat, S. (2025). Literature review on the use of electronic modules in independent learning in higher education. *Journal of General Education and Humanities*, *4*(1), 153–164. https://doi.org/10.58421/gehu.v4i1.368

Jorge, A. E. S., Bennell, K. L., Kimp, A. J., Campbell, P. K., & Hinman, R. S. (2021). An e-learning program for physiotherapists to manage knee osteoarthritis via telehealth during the COVID-19 pandemic: real-world evaluation study using registration and survey data. *JMIR Medical Education*, *7*(4), e30378. https://doi.org/10.2196/30378

Koehler, M. J., & Mishra, P. (2008). Introducing TPCK. In AACTE Committee on Innovation and Technology (Ed.), Handbook of technological pedagogical content knowledge (TPCK) for educators (pp. 3–29). AACTE and Routledge.

Koehler, M. J., Mishra, P., & Cain, W. (2013). What is technological pedagogical content knowledge (TPACK)? *Journal of Education*, *193*(3), 13–19. https://doi.org/10.1177/002205741319300303

Koo, T. K., & Li, M. Y. (2016). A guideline of selecting and reporting intraclass correlation coefficients for reliability research. *Journal of Chiropractic Medicine*, *15*(2), 155–163. https://doi.org/10.1016/j.jcm.2016.02.012

Kuo, Y. C., & Kuo, Y. T. (2024). An exploratory study of pre-service teachers' perceptions of technological pedagogical content knowledge of digital games. *Research and Practice in Technology Enhanced Learning*, *19, Article 8.* https://doi.org/10.58459/rptel.2024.19008

Mahendri, R. P., Amanda, M., Latifah, U., & Rawas, S. (2023). Development of interactive flipbook-based e-module for teaching algorithms and basic programming in higher education. *Journal of Hypermedia & Technology-Enhanced Learning*, *1*(1), 1–17. https://doi.org/10.58536/j-hytel.v1i1.18

Mishra, P. (2019). Considering contextual knowledge: The TPACK diagram gets an upgrade. *Journal of Digital Learning in Teacher Education*, *35*(2), 76–78. https://doi.org/10.1080/21532974.2019.1588611

Mishra, P., & Koehler, M. J. (2006). Technological pedagogical content knowledge: A framework for teacher knowledge. *Teachers College Record*, *108*(6), 1017–1054. http://one2oneheights.pbworks.com/f/MISHRA_PUNYA.pdf

Petko, D., Mishra, P., & Koehler, M. J. (2025). TPACK in context: An updated model. *Computers and Education Open*, *8*, 100244. https://doi.org/10.1016/j.caeo.2025.100244

Puspitasari, D., Hanik, E. U., Innayah, R. N., Firdaus, H. R., Safitri, E., & Pratiwi, M. (2022). Integrasi pendekatan dalam melaksanakan pembelajaran era digital di sekolah Indonesia Kuala Lumpur (SKIL). *Basica Journal of Arts and Science in Primary Education*, *2*(1), 54–66. https://doi.org/10.37680/basica.v2i1.963

Rahim, F. R., Widodo, A., Suhandi, A., & Ha, M. (2023). Digital competencies of pre-service teachers in Indonesia: Are they qualified for digital education? *Indonesian Journal of Educational Research and Review*, *6*(3), 540–552. https://doi.org/10.23887/ijerr.v6i3.61882

Rizki, I. A., Sunarti, T., & Salsabila, N. F. (2024). A case study of how digital competencies affect pre-service physics teachers' professional growth: Realizing SDG 4. *E3S Web of Conferences*, *513, Article 04007.* https://doi.org/10.1051/e3sconf/202451304007

Rodríguez-Loinaz, G., Ametzaga-Arregi, I., & Palacios-Agundez, I. (2024). ICT tools and citizen science: A pathway to promote science learning and education for sustainable development in schools. *Journal of Biological Education*, *58*(3), 609–625. https://doi.org/10.1080/00219266.2022.2092192

Schmid, M., Brianza, E., & Petko, D. (2021). Self-reported technological pedagogical content knowledge (TPACK) of pre-service teachers in relation to digital technology use in lesson plans. *Computers in Human Behavior*, *115, Article 106586.* https://doi.org/10.1016/j.chb.2020.106586

Schubatzky, T., Burde, J.-P., Große-Heilmann, R., Haagen-Schützenhöfer, C., Riese, J., & Weiler, D. (2023). Predicting the development of digital media PCK/TPACK:

The role of PCK, motivation to use digital media, interest in and previous experience with digital media. *Computers & Education*, *206*, 104900. https://doi.org/10.1016/j.compedu.2023.104900

Shulman, L. S. (1986). Those who understand: Knowledge growth in teaching. *Educational Researcher*, *15*(2), 4–14.

Shulman, L. S. (1987). Knowledge and teaching: Foundations of the new reform. *Harvard Educational Review*, *57*(1), 1–21.

Sintawati, N. P., & Margunayasa, I. G. (2021). Interactive e-module for science learning content: Validity and feasibility. *International Journal of Elementary Education*, *5*(1), 19. https://doi.org/10.23887/ijee.v5i1.34281

Sumarmi, S., Bachri, S., Irawan, L. Y., & Aliman, M. (2021). E-module in blended learning: its impact on students' disaster preparedness and innovation in developing learning media. *International Journal of Instruction*, *14*(4), 187–208. https://doi.org/10.29333/iji.2021.14412a

Susantini, E., Kartowagiran, B., Hamdi, S., Hadi, S., Jaedun, A., Wesnawa, I. G. A., Sunendar, D., & Laliyo, L. A. R. (2022). Developing competency evaluation of pre-service science teachers in industrial revolution 4.0: Revealing pedagogic and professional competencies. *International Journal of Educational Methodology*, *8*(2), 347–362. https://doi.org/10.12973/ijem.8.2.347

Taber, K. S. (2018). The use of cronbach's alpha when developing and reporting research instruments in science education. *Research in Science Education*, *48*(6), 1273–1296. https://doi.org/10.1007/s11165-016-9602-2

Thiagarajan, S., Semmel, D. S., & Semmel, M. I. (1974). *Instructional development for training teachers of exceptional children: A sourcebook*. Leadership Training Institute/Special Education, University of Minnesota. https://books.google.co.id/books?id=CaxOAQAAMAAJ

Thohir, M. A., Jumadi, J., & Warsono, W. (2022). Technological pedagogical content knowledge (TPACK) of pre-service science teachers: A Delphi study. *Journal of Research on Technology in Education*, *54*(1), 127–142. https://doi.org/10.1080/15391523.2020.1814908

Thoms, L.-J., Becker, S., & Kremser, E. (2023). Teaching and learning physics with digital technologies—what digitalization-related competencies are needed? In M. Streit-Bianchi, M. Michelini, W. Bonivento, & M. Tuveri (Eds.), *New Challenges and Opportunities in Physics Education* (pp. 313–326). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-37387-9_21

Thoms, L.-J., Meier, M., Huwer, J., Thyssen, C., von Kotzebue, L., Becker, S., Kremser, E., Finger, A., & Bruckermann, T. (2021). DiKoLAN – A framework to identify and classify digital competencies for teaching in science education and to restructure pre-service teacher training. In E. Langran & L. Archambault (Eds.), *Proceedings of Society for Information Technology & Teacher Education International Conference 2021* (pp. 1652–1657). Association for the Advancement of Computing in Education (AACE). https://www.learntechlib.org/p/219329

Tondeur, J., Scherer, R., Siddiq, F., & Baran, E. (2020). Enhancing pre-service teachers' technological pedagogical content knowledge (TPACK): A mixed-method study. *Educational Technology Research and Development*, *68*(1), 319–343. https://doi.org/10.1007/s11423-019-09692-1

Tondeur, J., Van Braak, J., Siddiq, F., & Scherer, R. (2016). Time for a new approach to prepare future teachers for educational technology use: Its meaning and measurement. *Computers & Education, 94*, 134–150. https://doi.org/10.1016/j.compedu.2015.11.009

Valtonen, T., Sointu, E., Kukkonen, J., Mäkitalo, K., Hoang, N., Häkkinen, P., Järvelä, S., Näykki, P., Virtanen, A., Pöntinen, S., Kostiainen, E., & Tondeur, J. (2019). Examining pre-service teachers' technological pedagogical content knowledge as evolving knowledge domains: A longitudinal approach. *Journal of Computer Assisted Learning*, *35*(4), 491–502. https://doi.org/10.1111/jcal.12353

Van Katwijk, L., Jansen, E., & Van Veen, K. (2023). Pre-service teacher research: A way to future-proof teachers? *European Journal of Teacher Education*, *46*(3), 435–455. https://doi.org/10.1080/02619768.2021.1928070

Vishnevetsky, J., Walters, C. B., & Tan, K. S. (2018). Interrater reliability of the patient education materials assessment tool (PEMAT). *Patient Education and Counseling*, *101*(3), 490–496. https://doi.org/10.1016/j.pec.2017.09.003

Wijayanto, B., Sumarmi, S., Utomo, D. H., Handoyo, B., & Aliman, M. (2023). Development of e-module based on geospatial technology to improve TPACK competencies of geography pre-service teacher: A needs analysis review. *TEM Journal, 12(2), 1190–1200.* https://doi.org/10.18421/tem122-65

Zamanzadeh, V., Ghahramanian, A., Rassouli, M., Abbaszadeh, A., Alavi-Majd, H., & Nikanfar, A.-R. (2015). Design and implementation content validity study: Development of an instrument for measuring patient-centered communication. *Journal of Caring Sciences*, *4*(2), 165–178. https://doi.org/10.15171/jcs.2015.017

Zikra, Fikri, M., Afdal, Sukmawati, I., Sin, T. H., Nurhastuti, & Suryanef. (2024). Technology pedagogy content knowledge framework to prepare Indonesian career counselors. *International Journal of Evaluation and Research in Education*, *13*(2), 820–830. https://doi.org/10.11591/ijere.v13i2.25860