Peningkatan Kompetensi TPACK Guru Kimia melalui Pelatihan *Virtual Reality* Terintegrasi *Artificial Intelligence*: Analisis Kuantitatif dan Kualitatif

Ucu Cahyana[1]*, Ariyatun Ariyatun[1], Devita Marlina Venessa[1], Ahmad Dwi Susilo[1]
[1]Universitas Negeri Jakarta, Jl Rawamangun Muka, Jakarta 13220, Indonesia

Corresponding Author Email: *ucahyana@unj.ac.id

Abstract

The rapid advancement of Virtual Reality (VR) and Artificial Intelligence (AI) has opened new opportunities for chemistry education, yet teachers' competence in integrating these two technologies remains limited. This study aimed to evaluate the effectiveness of VR-AI training in enhancing chemistry teachers' Technological Pedagogical Content Knowledge (TPACK) competence. A one-group pretest–posttest design was employed, involving 24 senior high school (SMA/MA) chemistry teachers. Quantitative data were collected using a 15-item TPACK instrument and analyzed through paired sample t-tests, Wilcoxon signed-rank tests, normalized gain (N-Gain), and Cohen's d, while qualitative data were analyzed thematically. The results revealed a statistically significant increase in mean scores from 64.00 to 89.79 ($p < 0.001$), with an N-Gain of 0.74 (high category) and Cohen's $d = 3.75$ (very large effect size). Aspect-wise analysis indicated that Technological Knowledge, Pedagogical Knowledge, and TPACK fell within the high-gain category, whereas Content Knowledge and Implementation and Sustainability were in the moderate category. Qualitative findings confirmed that the training improved teachers' ability to operate VR-AI tools, visualize abstract chemical concepts, and integrate technology into instruction, although implementation continued to face constraints related to school infrastructure. Overall, these findings demonstrate that VR-AI training effectively strengthens chemistry teachers' TPACK competence and supports the transformation of chemistry education through immersive technology-based learning.

Keywords: *Artificial Intelligence; chemistry education; TPACK; training; Virtual Reality.*

1. PENDAHULUAN

Transformasi digital telah mengubah lanskap pendidikan secara mendasar, menuntut guru untuk terus memperbarui kompetensinya agar mampu mengintegrasikan teknologi ke dalam praktik pembelajaran secara bermakna, bukan sekadar sebagai pelengkap administratif (Tan et al., 2025). Tuntutan ini menjadi semakin mendesak dalam pembelajaran kimia, mengingat karakteristik keilmuan kimia yang inheren bersifat abstrak dan multirepresentasi mencakup level makroskopik, submikroskopik, dan simbolik yang seringkali sukar divisualisasikan hanya melalui penjelasan verbal atau gambar dua dimensi di papan tulis (Cahyana et al., 2024). Kesulitan inilah yang mendorong berkembangnya berbagai teknologi visualisasi imersif, seperti *Virtual Reality* (VR) dan *Augmented Reality* (AR), yang terbukti mampu menjembatani kesenjangan pemahaman peserta didik terhadap konsep-konsep kimia yang tidak kasatmata, misalnya struktur molekul, geometri ikatan, dan mekanisme reaksi pada tingkat atomik (Nisa & Dwiningsih, 2021). Di sisi lain, kehadiran *Artificial Intelligence* (AI) generatif turut memperluas peluang personalisasi dan adaptivitas pembelajaran kimia, sehingga integrasi

VR dan AI secara simultan berpotensi menghadirkan pengalaman belajar yang lebih kaya sekaligus responsif terhadap kebutuhan individual peserta didik (Yildirim & Akcan, 2024).

Namun demikian, keberhasilan pemanfaatan teknologi tersebut di ruang kelas tidak semata-mata ditentukan oleh ketersediaan perangkat, melainkan sangat bergantung pada kesiapan kompetensi guru dalam mengintegrasikan aspek teknologi, pedagogi, dan konten secara utuh. Kerangka *Technological Pedagogical Content Knowledge* (TPACK) yang dikembangkan oleh Mishra dan Koehler hingga kini tetap menjadi rujukan teoretis dominan untuk memahami dan mengukur kesiapan guru dalam mengintegrasikan teknologi ke dalam pembelajaran, sebagaimana ditegaskan oleh kajian bibliometrik terkini yang menunjukkan tren peningkatan adopsi kerangka ini secara konsisten dalam riset pendidikan guru selama satu dekade terakhir (Su, 2023). Kerangka TPACK dipandang unggul karena tidak memandang kompetensi teknologi sebagai domain yang berdiri sendiri, melainkan sebagai hasil interseksi yang dinamis antara pengetahuan teknologi, pedagogi, dan materi ajar, sehingga penguasaan teknologi semata tanpa kemampuan pedagogis dan penguasaan konten yang memadai tidak akan menghasilkan pembelajaran yang efektif (Duc & Quang, 2024).

Beberapa penelitian terdahulu telah mendokumentasikan penerapan kerangka TPACK dalam konteks integrasi teknologi imersif pada pembelajaran kimia. Duc dan Quang (2024) misalnya, mengembangkan kelas berbasis AR yang dirancang mengikuti prinsip TPACK bagi guru kimia sekolah menengah di Vietnam dan menemukan bahwa pendekatan tersebut secara signifikan meningkatkan kemampuan guru dalam memvisualisasikan konsep kimia umum yang abstrak. Sejalan dengan itu, Yildirim dan Akcan (2024) mengembangkan model pengembangan profesional berbasis AI khusus bagi guru kimia dan mendapati bahwa pelatihan semacam ini efektif membekali guru dengan strategi integrasi AI yang kontekstual dengan karakteristik materi kimia. Temuan-temuan ini memperkuat argumen bahwa pelatihan berbasis teknologi imersif dan kecerdasan buatan bagi guru kimia bukan sekadar wacana, melainkan kebutuhan nyata yang telah teruji dampaknya di berbagai konteks.

Meskipun demikian, kajian sistematis terbaru mengungkapkan adanya ketimpangan fokus riset yang mencolok: mayoritas studi mengenai integrasi AI dalam pendidikan lebih banyak menyoroti penerapannya di ruang kelas untuk peserta didik, sementara porsi penelitian yang secara khusus membahas pengembangan profesional guru termasuk bagaimana pelatihan tersebut berdampak pada masing-masing komponen kompetensi guru masih jauh lebih terbatas (Tan et al., 2025). Ketimpangan ini turut tercermin dalam praktik pengabdian kepada masyarakat di Indonesia, di mana kesenjangan keterampilan digital guru khususnya kenyamanan dan familiaritas terhadap teknologi AI dan VR yang relatif baru masih menjadi tantangan utama yang harus diatasi melalui program pelatihan terstruktur (Kholifah et al., 2024). Kesenjangan tersebut memperkuat urgensi dilakukannya evaluasi dampak pelatihan secara lebih granular, yakni tidak hanya pada level skor kompetensi secara agregat, tetapi juga pada level masing-

masing aspek TPACK, agar dapat diidentifikasi secara spesifik aspek kompetensi mana yang paling terdampak oleh intervensi pelatihan dan aspek mana yang masih memerlukan penguatan lanjutan.

Berdasarkan uraian tersebut, kegiatan pelatihan *Virtual Reality* terintegrasi *Artificial Intelligence* (VR-AI) untuk pembelajaran kimia yang menjadi objek kajian ini dirancang dengan tujuan meningkatkan kompetensi TPACK guru kimia peserta pelatihan. Evaluasi dampak pelatihan dilakukan melalui instrumen kuesioner pretest–posttest yang mengukur lima aspek TPACK: *Technological Knowledge*, *Pedagogical Knowledge*, *Content Knowledge*, TPACK sebagai integrasi ketiga domain, serta Implementasi dan Keberlanjutan dilengkapi data kualitatif dari pertanyaan terbuka untuk memperkaya interpretasi temuan kuantitatif. Sebagai tindak lanjut atas masukan reviewer, artikel ini secara khusus menyajikan perhitungan dan uji statistik yang diuraikan per aspek TPACK, disertai visualisasi data dari berbagai sudut pandang, sehingga diharapkan dapat memberikan gambaran yang lebih presisi mengenai profil peningkatan kompetensi guru kimia pascapelatihan dan menjadi rujukan bagi perancangan program pengembangan profesional guru berbasis teknologi imersif dan kecerdasan buatan di masa mendatang.

2. TINJAUAN LITERATUR

2.1. TPACK dalam Kompetensi Profesional Guru Kimia

Konsep pengetahuan profesional guru berawal dari *Pedagogical Content Knowledge* (PCK) yang dikembangkan Shulman (1986), kemudian diperluas Mishra (2019) menjadi *Technological Pedagogical Content Knowledge* (TPACK) melalui integrasi pengetahuan teknologi, pedagogi, dan konten. TPACK menjadi kerangka konseptual untuk memahami integrasi teknologi secara bermakna dalam pembelajaran abad ke-21 (Latip et al., 2023). Dalam pembelajaran kimia, TPACK penting karena karakteristik materi yang melibatkan representasi makroskopik, submikroskopik, dan simbolik, sehingga banyak konsep abstrak memerlukan dukungan visualisasi (Hu-Au, 2024). Guru perlu mengintegrasikan penguasaan konten, strategi pedagogis, dan teknologi untuk memfasilitasi pemahaman konsep tersebut (Paristiowati et al., 2020). Namun, penelitian menunjukkan kompetensi TPACK guru kimia masih beragam, dengan aspek teknologi cenderung lebih rendah (Paristiowati et al., 2020). Kajian mengenai pelatihan TPACK berbasis teknologi imersif, khususnya integrasi *Virtual Reality* (VR) dan *Artificial Intelligence* (AI) bagi guru kimia *in-service*, masih terbatas (Latip et al., 2023; Paristiowati et al., 2020).

2.2. *Virtual Reality* terintegrasi *Artificial Intelligence*

Virtual Reality (VR) menciptakan lingkungan tiga dimensi yang imersif dan memungkinkan pengguna berinteraksi dengan fenomena digital, sehingga berpotensi meningkatkan keterlibatan dan pemahaman pembelajaran (Hu-Au, 2024; Siahaya, 2024). Dalam pendidikan kimia, VR efektif membantu memvisualisasikan konsep submikroskopik, seperti struktur molekul, hibridisasi orbital, dan mekanisme reaksi yang

sulit diamati melalui pembelajaran konvensional (Hu-Au, 2024). Sementara itu, *Artificial Intelligence* (AI) mendukung personalisasi pembelajaran, interaksi, dan pengembangan kompetensi guru, tetapi penguasaannya memerlukan pelatihan yang sistematis (Han, 2025). Integrasi VR dan AI berpotensi menghasilkan lingkungan belajar imersif yang adaptif melalui personalisasi konten dan umpan balik berbasis kebutuhan pengguna (Balushi et al., 2024). Namun, implementasinya masih menghadapi kendala infrastruktur dan kesiapan pendidik (Siahaya, 2024). Literatur sebelumnya umumnya mengkaji VR dan AI secara terpisah atau konseptual, sehingga penelitian empiris mengenai pelatihan VR-AI berbasis TPACK bagi guru kimia *in-service* dengan pendekatan kuantitatif dan kualitatif masih terbatas.

3. METODE PELAKSANAAN

3.1. Peserta Pelatihan

Peserta pelatihan berjumlah 24 guru kimia di DKI Jakarta, terdiri atas 19 perempuan (79,2%) dan 5 laki-laki (20,8%), dengan rentang usia 25–56 tahun (rata-rata 39,5 tahun; SD = 10,1). Peserta mengikuti pelatihan secara sukarela berdasarkan kesediaan mereka untuk mengikuti seluruh rangkaian kegiatan pelatihan. Sebaran usia yang cukup lebar menunjukkan peserta berasal dari guru dengan latar belakang pengalaman mengajar yang beragam, dari yang relatif baru hingga senior. Selain itu, lama mereka mengajar kimia di sekolah berkisar antara 3 hingga 20 tahun.

3.2. Instrumen

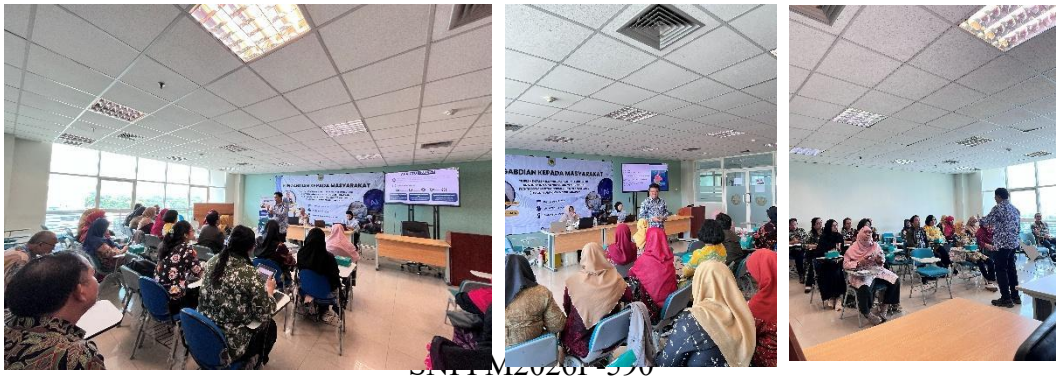
Instrumen utama penelitian berupa kuesioner *Technological Pedagogical Content Knowledge* (TPACK) yang digunakan untuk mengukur kompetensi guru kimia sebelum dan sesudah pelatihan berbasis *Virtual Reality* (VR) dan *Artificial Intelligence* (AI). Kuesioner terdiri atas 15 butir yang mencakup lima aspek, yaitu *Technological Knowledge* (TK), *Pedagogical Knowledge* (PK), *Content Knowledge* (CK), TPACK, serta Implementasi dan Keberlanjutan, dengan masing-masing aspek diwakili tiga butir. Setiap pernyataan menggunakan skala Likert 1–5, kemudian skor aspek dan total dikonversi ke skala 0–100 untuk memudahkan perbandingan antaraspek. Untuk data kuantitatifnya juga diberikan tes TPACK kepada peserta pelatihan dengan 5 aspek diatas dengan total skor 0-100. Instrumen kuesioner dan tes diberikan dua kali, yaitu *pretest* sebelum pelatihan dan *posttest* setelah pelatihan, menggunakan butir identik untuk memastikan keterbandingan hasil. Selain instrumen kuantitatif, penelitian menggunakan pertanyaan terbuka (*open-ended questions*) sebelum dan sesudah pelatihan untuk menggali persepsi, pengalaman, kendala, dan kesiapan guru dalam mengintegrasikan VR-AI ke pembelajaran kimia. Data kualitatif tersebut digunakan untuk melengkapi dan memperdalam interpretasi hasil kuantitatif.

3.3. Prosedur Pelatihan

Pelatihan dilaksanakan dengan mengikuti desain *one-group pretest–posttest*, yaitu seluruh peserta (24 guru kimia SMA/MA) menerima perlakuan yang sama tanpa kelompok kontrol pembanding. Secara umum, prosedur pelatihan dilaksanakan melalui empat tahap pada Tabel 1 berikut:

Tabel 1. Prosedur Pelatihan

Tahapan	**Uraian Kegiatan**
Persiapan	Tahap ini diawali dengan sosialisasi tujuan dan gambaran umum pelatihan kepada peserta, dilanjutkan dengan pengisian instrumen TPACK (*pretest*) dan pertanyaan terbuka untuk memetakan kondisi awal kompetensi serta persepsi guru terhadap VR-AI sebelum menerima materi apa pun.
Pelaksanaan Pelatihan	Materi pelatihan disusun secara berjenjang mengikuti struktur lima aspek TPACK agar peningkatan kompetensi dapat diarahkan secara terfokus pada tiap aspek: 1. Penguatan *Technological Knowledge* melalui pengenalan dan praktik langsung pengoperasian perangkat/aplikasi VR serta *tools* AI yang relevan untuk pembelajaran kimia; 2. Penguatan *Pedagogical Knowledge* melalui diskusi strategi pembelajaran yang sesuai untuk mengintegrasikan teknologi imersif ke dalam skenario pembelajaran di kelas; 3. Penguatan *Content Knowledge* melalui visualisasi konsep-konsep kimia abstrak (struktur molekul, mekanisme reaksi, dan fenomena submikroskopik) menggunakan VR-AI; 4. Sintesis *TPACK* melalui perancangan perangkat pembelajaran (RPP/skenario) yang memadukan ketiga pengetahuan sekaligus, disertai simulasi mengajar menggunakan VR-AI; 5. Penguatan aspek Implementasi dan Keberlanjutan melalui pendampingan (*mentoring*) serta diskusi reflektif mengenai rencana penerapan dan keberlanjutan penggunaan VR-AI di sekolah masing-masing peserta pascapelatihan.
Evaluasi Akhir	Setelah seluruh sesi pelatihan selesai, peserta kembali mengisi instrumen TPACK yang identik dengan *posttest* serta pertanyaan terbuka pascapelatihan untuk menangkap perubahan pemahaman dan kesiapan implementasi.
Refleksi dan Tindak Lanjut	Sesi penutup diisi dengan diskusi reflektif bersama peserta mengenai kendala yang dihadapi selama pelatihan, terutama terkait infrastruktur sekolah, sebagai bahan masukan bagi keberlanjutan program.





Gambar 1. Aktivitas Peserta Selama Pelatihan

3.4. Evaluasi Pelatihan

Data dikumpulkan menggunakan angket yang disebarkan secara daring melalui Google Form. Evaluasi pelatihan menggunakan dua jenis angket, yaitu angket TPACK tertutup berskala Likert 1–5 dan tes yang masing-masing terdiri atas 15 butir dan diberikan dua kali (*pretest* dan *posttest*) kepada 24 peserta, serta angket terbuka berupa pertanyaan reflektif yang diberikan pada waktu yang sama untuk memperoleh data kualitatif pendukung sebelum dan sesudah pelatihan.

Data kuantitatif dianalisis secara bertahap menggunakan *software* IBM SPSS Statistics versi 25. Skor mentah setiap butir dihitung menjadi skor rata-rata pada lima aspek, yaitu *Technological Knowledge* (TK), *Pedagogical Knowledge* (PK), *Content Knowledge* (CK), TPACK, serta Implementasi dan Keberlanjutan, kemudian dikonversi ke skala 0–100. Statistik deskriptif berupa *mean*, simpangan baku, minimum, dan maksimum digunakan untuk menggambarkan perubahan skor *pretest* dan *posttest*. Uji normalitas dilakukan menggunakan Shapiro–Wilk pada taraf signifikansi 0,05 sebagai dasar pemilihan analisis parametrik. Perbedaan skor sebelum dan sesudah pelatihan diuji menggunakan *paired-samples t-test*, dengan *Wilcoxon signed-rank test* sebagai analisis verifikasi nonparametrik (Conover W., 1999). Efektivitas peningkatan juga dihitung melalui *Normalized Gain* (N-Gain) berdasarkan Hake (1998), sedangkan besarnya efek pelatihan dihitung menggunakan *Cohen's d* untuk desain berpasangan (Cohen, 2013). Data kualitatif dari pertanyaan terbuka dianalisis menggunakan analisis tematik melalui proses *coding*, pengembangan dan peninjauan tema, serta interpretasi data (Braun & Clarke, 2021).

Selanjutnya, temuan kualitatif diintegrasikan dengan hasil kuantitatif untuk memperoleh pemahaman yang lebih komprehensif mengenai efektivitas pelatihan VR-AI terhadap kompetensi TPACK guru kimia.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

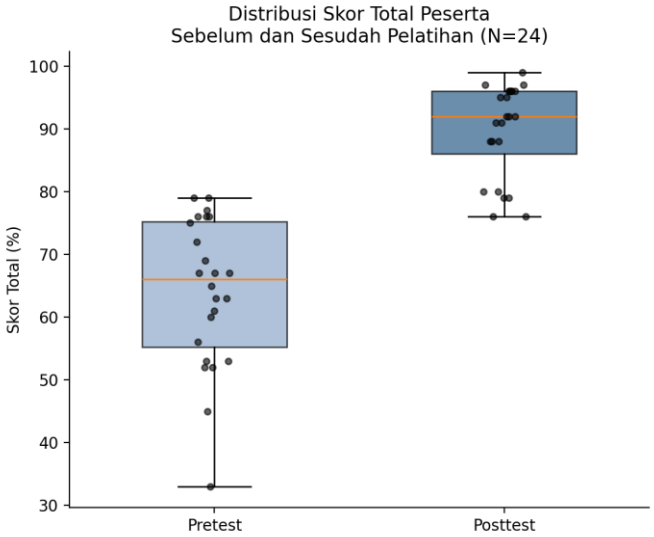
Hasil Analisis Kuantitatif Keseluruhan

Analisis diawali dengan mengevaluasi skor total yang merupakan gabungan dari 15 butir instrumen untuk memperoleh gambaran umum mengenai perubahan kompetensi TPACK guru setelah mengikuti pelatihan. Hasil analisis pada Tabel 2 menunjukkan adanya peningkatan yang substansial pada skor peserta. Rata-rata skor pretest sebesar 64,00 (SD = 11,85) meningkat menjadi 89,79 (SD = 7,42) pada posttest, sehingga diperoleh rata-rata peningkatan (*gain*) sebesar 25,79 poin. Selain meningkatnya nilai rata-rata, simpangan baku juga menurun dari 11,85 menjadi 7,42, yang menunjukkan bahwa variasi skor antar peserta menjadi lebih kecil setelah pelatihan.

Tabel 2. Ringkasan statistik deskriptif dan uji beda skor pretest–posttest (N = 24)

Statistik	Pretest	Posttest	Selisih (*Gain*)
Mean	64,00	89,79	25,79
SD	11,85	7,42	6,87
Skor minimum	33	76	-
Skor maksimum	79	99	-
N-Gain rata-rata	—	0,74 (Tinggi)	
Uji *paired sample t-test*	t(23) = 18,39; (p < 0,001)		
Cohen's d	3,75 (efek sangat besar)		

Hasil uji *paired sample t-test* menunjukkan bahwa perbedaan antara skor pretest dan posttest bersifat sangat signifikan ($t(23) = 18,39$; $p < 0,001$), yang mengonfirmasi bahwa peningkatan kompetensi yang terjadi bukan merupakan variasi acak. Besarnya pengaruh pelatihan juga didukung oleh nilai Cohen's d sebesar 3,75, yang termasuk kategori efek sangat besar, sehingga menunjukkan bahwa intervensi memberikan dampak praktis yang sangat kuat terhadap peningkatan kompetensi TPACK guru. Konsisten dengan hasil tersebut, rata-rata N-Gain individu sebesar 0,74, yang termasuk dalam kategori tinggi, mengindikasikan bahwa sebagian besar peserta mengalami peningkatan kompetensi yang optimal setelah mengikuti pelatihan.



Gambar 2. Distribusi skor total peserta sebelum dan sesudah pelatihan (N=24).

Gambar 2 memperlihatkan distribusi skor total kompetensi TPACK guru sebelum dan sesudah pelatihan menggunakan boxplot. Pada gambar tersebut, kotak (*box*) menunjukkan rentang kuartil (*interquartile range*/IQR), garis horizontal di dalam kotak menunjukkan nilai median, sedangkan titik-titik hitam merepresentasikan skor masing-masing peserta. Sebelum pelatihan, distribusi skor menunjukkan variasi yang relatif besar dengan median sekitar 66% dan rentang kuartil yang cukup lebar, mengindikasikan adanya heterogenitas kompetensi awal antar guru. Beberapa peserta juga memperoleh skor yang relatif rendah (sekitar 33–45%), sehingga distribusi skor cenderung lebih menyebar. Setelah pelatihan, seluruh distribusi skor bergeser ke arah yang lebih tinggi dengan median meningkat menjadi sekitar 92%. Selain itu, rentang kuartil menjadi lebih sempit dibandingkan pada pretest, yang menunjukkan bahwa variasi capaian kompetensi antar peserta berkurang setelah mengikuti pelatihan. Hampir seluruh skor *posttest* terkonsentrasi pada rentang 88–96%, meskipun masih terdapat beberapa peserta dengan skor sekitar 76–80%. Pergeseran posisi median yang disertai penyempitan rentang kuartil menunjukkan bahwa pelatihan tidak hanya meningkatkan kompetensi TPACK guru secara keseluruhan, tetapi juga menghasilkan capaian yang lebih konsisten di antara peserta. Temuan visual ini sejalan dengan hasil analisis statistik yang menunjukkan peningkatan skor yang signifikan, ukuran efek yang sangat besar (Cohen's d = 3,75), serta nilai N-Gain yang berada pada kategori tinggi.

Uji Prasyarat Normalitas

Hasil uji Shapiro–Wilk pada Tabel 3 menunjukkan bahwa skor pretest berdistribusi normal (W = 0,933; p = 0,114), sedangkan skor posttest tidak berdistribusi normal (W = 0,858; p = 0,003). Sebaliknya, distribusi *gain score* memenuhi asumsi normalitas (W = 0,959; p = 0,411) (Tabel 2). Ketidaknormalan skor posttest mengindikasikan adanya *ceiling effect*, yaitu sebagian besar peserta memperoleh skor mendekati nilai maksimum setelah pelatihan. Karena asumsi normalitas pada desain

berpasangan didasarkan pada distribusi selisih skor, hasil tersebut menunjukkan bahwa *paired sample t-test* tetap layak digunakan sebagai analisis utama, dengan Wilcoxon *signed-rank test* digunakan sebagai analisis konfirmasi untuk memberikan kesimpulan yang konsisten.

Tabel 3. Hasil uji normalitas

Data	Statistik (W)	Sig. (p)	Keterangan
Skor Pretest	0,933	0,114	Normal
Skor Posttest	0,858	0,003	Tidak normal
Gain Score	0,959	0,411	Normal

Kondisi ini juga terlihat pada *boxplot* (Gambar 1), di mana sebagian besar skor posttest berada pada kisaran 88–96% dengan variasi yang lebih kecil dibandingkan skor pretest. Meskipun demikian, distribusi selisih skor memenuhi asumsi normalitas ($p > 0,05$), sehingga penggunaan paired sample t-test sebagai analisis utama tetap memenuhi prasyarat statistik.

Uji Hipotesis dan *Effect Size*

Hasil *paired-samples t-test* pada Tabel 4 menunjukkan perbedaan yang sangat signifikan antara skor *pretest* dan *posttest*, $t(23) = 18,39$, $p < 0,001$. Hasil ini dikonfirmasi oleh uji Wilcoxon *signed-rank* yang juga signifikan ($p < 0,001$), sehingga kesimpulan peningkatan kompetensi tidak bergantung pada asumsi distribusi tertentu. Nilai Cohen's d sebesar 3,75 jauh melampaui ambang batas "besar" ($d \geq 0,8$), menunjukkan bahwa pelatihan VR-AI berbasis TPACK memberikan dampak praktis yang sangat substansial, bukan sekadar signifikan secara statistik. N-*Gain score* keseluruhan sebesar 0,72–0,74 berada pada kategori tinggi ($g \geq 0,70$) menurut kriteria Hake (1998), menegaskan efektivitas pelatihan dalam meningkatkan pemahaman dan kesiapan guru.

Tabel 4. Hasil Uji Hipotesis dan *Effect Size*

Uji Statistik	Nilai Statistik	Sig. (p)	Kesimpulan
Paired-samples t-test	$t(23) = 18,39$	$< 0,001$	Signifikan
Wilcoxon *signed rank*	$Z = 0,00$	$< 0,001$	Signifikan
Cohen's d (*effect size*)	3,75	—	Sangat besar
N-Gain	0,72 – 0,74	—	Kategori Tinggi

Analisis per Aspek TPACK

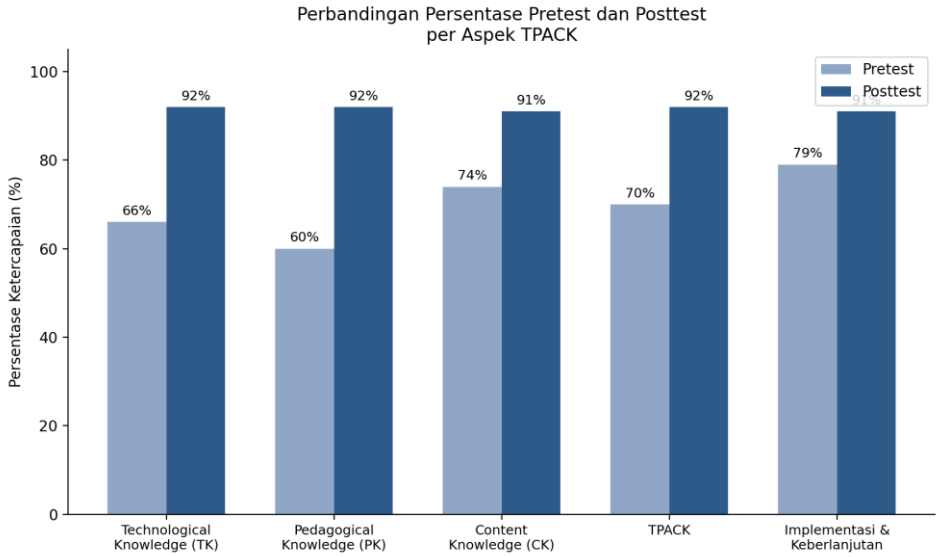
Setiap aspek TPACK dianalisis secara terpisah agar terlihat aspek mana yang paling berkembang dan mana yang memerlukan penguatan lanjutan (Tabel 5). Karena data mentah yang tersedia untuk level aspek berbentuk rata-rata persentase kelompok per aspek (bukan skor individual per aspek), penguatan analisis pada level ini dilakukan melalui perhitungan N-*Gain score* (Hake, 1998) per aspek ukuran standar dalam

penelitian pendidikan untuk menilai efektivitas peningkatan pada data pretest-posttest kelompok dilengkapi persentase kenaikan mutlak.

Tabel 5. Hasil N-*Gain score* per Aspek

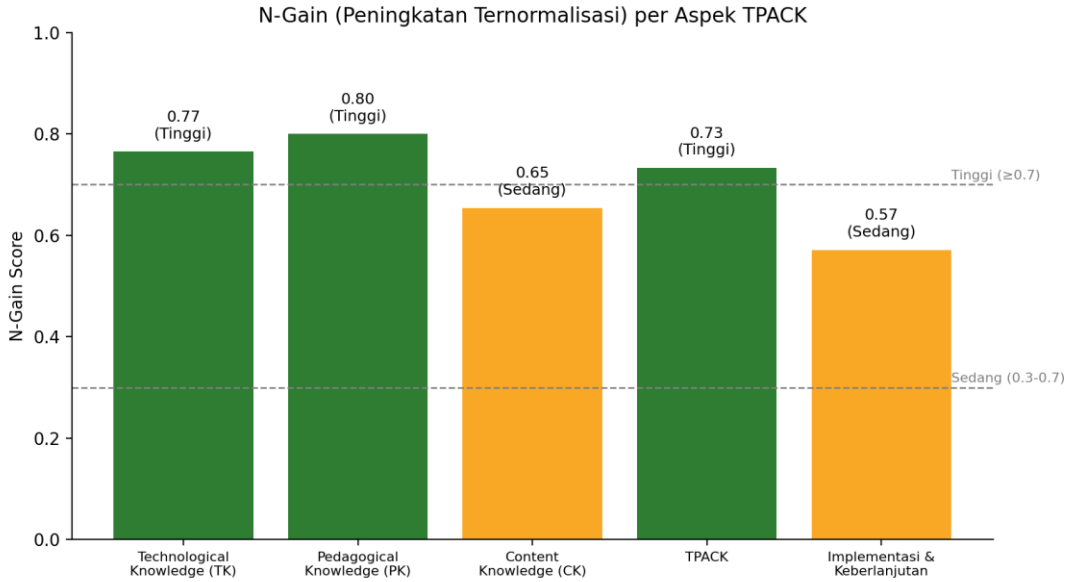
Aspek TPACK	Pretest	Posttest	Δ (Gain)	N-Gain	Kategori
Technological Knowledge (TK)	66%	92%	+26%	0,765	Tinggi
Pedagogical Knowledge (PK)	60%	92%	+32%	0,800	Tinggi
Content Knowledge (CK)	74%	91%	+17%	0,654	Sedang
TPACK (Integrasi)	70%	92%	+22%	0,733	Tinggi
E. Implementasi & Keberlanjutan	79%	91%	+12%	0,571	Sedang

Analisis lebih lanjut dilakukan pada setiap aspek TPACK untuk mengidentifikasi dimensi kompetensi yang mengalami peningkatan setelah pelatihan. Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3, seluruh aspek mengalami peningkatan persentase ketercapaian dari pretest ke posttest. Aspek TK meningkat dari 66% menjadi 92%, sedangkan PK menunjukkan peningkatan paling besar, yaitu dari 60% menjadi 92%. Peningkatan juga terlihat pada aspek CK dari 74% menjadi 91%, TPACK dari 70% menjadi 92%, serta aspek Implementasi dan Keberlanjutan dari 79% menjadi 91%. Setelah pelatihan, seluruh aspek mencapai tingkat ketercapaian di atas 90%, menunjukkan bahwa program pelatihan berhasil meningkatkan kompetensi guru secara komprehensif pada seluruh dimensi TPACK.



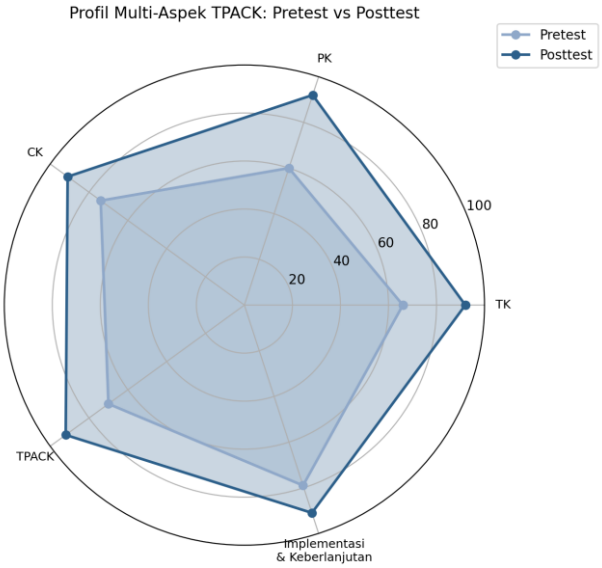
Gambar 3. Perbandingan persentase pretest dan posttest per aspek TPACK

Peningkatan tersebut selanjutnya dianalisis menggunakan normalized gain (N-*Gain*) untuk mengetahui efektivitas pelatihan pada masing-masing aspek (Gambar 4). Hasil analisis menunjukkan bahwa PK memperoleh nilai N-*Gain* tertinggi (g = 0,80; kategori tinggi), diikuti oleh TK (g = 0,77; kategori tinggi) dan TPACK (g = 0,73; kategori tinggi). Sebaliknya, CK memperoleh nilai N-*Gain* sebesar 0,65 dan aspek Implementasi dan Keberlanjutan sebesar 0,57, yang keduanya termasuk dalam kategori sedang. Temuan ini menunjukkan bahwa pelatihan memberikan dampak yang paling kuat terhadap peningkatan kemampuan pedagogis dan penguasaan teknologi guru, sekaligus meningkatkan kemampuan mengintegrasikan teknologi, pedagogi, dan konten dalam pembelajaran.



Gambar 4. N-*Gain* per aspek TPACK

Meskipun aspek CK dan Implementasi dan Keberlanjutan mengalami peningkatan yang lebih rendah dibandingkan aspek lainnya, kedua aspek tersebut tetap menunjukkan kenaikan skor posttest yang substansial hingga mencapai lebih dari 90%. Hal ini mengindikasikan bahwa guru telah memiliki dasar pengetahuan konten yang relatif baik sebelum pelatihan, sehingga ruang peningkatannya lebih terbatas dibandingkan aspek pedagogi dan teknologi. Sementara itu, aspek implementasi memerlukan kemampuan menerapkan pengetahuan dalam praktik pembelajaran yang umumnya berkembang melalui pengalaman mengajar dan pendampingan berkelanjutan.



Gambar 5. Profil multi-aspek TPACK dalam Diagram radar

Gambar 5 menyajikan profil kompetensi TPACK guru sebelum dan sesudah pelatihan menggunakan diagram radar. Secara visual, terlihat adanya perluasan area poligon dari pretest ke posttest pada seluruh aspek TPACK, yang menunjukkan peningkatan kompetensi secara menyeluruh setelah pelatihan. Pada kondisi awal (pretest), bentuk poligon masih tidak beraturan dengan variasi yang cukup besar antaraspek. Aspek PK memiliki capaian terendah (60%), diikuti TK (66%) dan TPACK (70%), sedangkan CK (74%) serta Implementasi dan Keberlanjutan (79%) menunjukkan capaian yang relatif lebih tinggi. Setelah pelatihan, bentuk poligon berubah menjadi lebih simetris dan mendekati lingkaran, dengan seluruh aspek berada pada kisaran 91–92%. Pola ini menunjukkan bahwa peningkatan tidak hanya terjadi pada setiap dimensi TPACK, tetapi juga diikuti oleh pemerataan capaian kompetensi antaraspek. Aspek yang pada awalnya memiliki skor relatif rendah, terutama PK dan TK, mengalami peningkatan yang lebih besar sehingga mampu mencapai tingkat kompetensi yang setara dengan aspek lainnya. Sebaliknya, aspek CK dan Implementasi dan Keberlanjutan, yang telah memiliki skor awal lebih tinggi, tetap menunjukkan peningkatan meskipun dengan besaran yang relatif lebih kecil. Secara keseluruhan, diagram radar memperlihatkan bahwa pelatihan tidak hanya meningkatkan tingkat kompetensi guru pada setiap komponen TPACK, tetapi juga menghasilkan profil kompetensi yang lebih seimbang dan terintegrasi. Pola ini mengindikasikan bahwa program pelatihan berhasil memperkuat hubungan antardimensi pengetahuan teknologi, pedagogi, dan konten, sehingga kompetensi peserta berkembang secara lebih harmonis dan tidak lagi didominasi oleh aspek tertentu. Temuan visual ini konsisten dengan hasil analisis statistik sebelumnya yang menunjukkan peningkatan skor total yang signifikan, nilai N-Gain yang berada pada kategori sedang hingga tinggi pada seluruh aspek, serta ukuran efek yang sangat besar.

Aspek *Technological Knowledge* (TK)

Aspek TK meningkat dari 66% pada pretest menjadi 92% pada posttest dengan N-Gain sebesar 0,77 (kategori tinggi). Peningkatan ini terutama terlihat pada kemampuan memanfaatkan AI dalam pembelajaran dan mengoperasikan perangkat VR secara mandiri. Item mengenai penggunaan perangkat VR menunjukkan kenaikan paling besar, dari 52% menjadi 85%, yang mengindikasikan bahwa pengalaman praktik langsung selama pelatihan berhasil meningkatkan kepercayaan diri guru dalam menggunakan teknologi imersif. Temuan ini didukung oleh data kualitatif, di mana sebagian besar guru menyatakan bahwa sebelum pelatihan mereka telah mengenal AI generatif, tetapi belum pernah menggunakan perangkat VR secara langsung. Setelah pelatihan, responden melaporkan telah memahami prinsip dasar penggunaan VR-AI serta mampu mencoba berbagai simulasi laboratorium virtual. Hasil ini sejalan dengan penelitian yang menunjukkan bahwa pengalaman belajar berbasis praktik (*hands-on training*) merupakan faktor penting dalam meningkatkan literasi teknologi dan kesiapan guru mengintegrasikan teknologi digital ke dalam pembelajaran (Wang et al., 2024).

Aspek *Pedagogical Knowledge* (PK)

Aspek PK menunjukkan peningkatan paling tinggi di antara seluruh aspek, yaitu dari 60% menjadi 92% dengan N-Gain sebesar 0,80 (kategori tinggi). Ketiga indikator pada aspek ini pemilihan strategi pembelajaran, peningkatan keterlibatan peserta didik, dan perancangan aktivitas berpusat pada peserta didik seluruhnya mencapai capaian di atas 90% pada posttest. Hasil ini menunjukkan bahwa pelatihan tidak hanya memperkenalkan teknologi, tetapi juga membekali guru dengan strategi pedagogis untuk mengintegrasikan VR-AI secara efektif dalam pembelajaran kimia. Sebelum pelatihan, guru mengungkapkan kesulitan merancang pembelajaran yang menggabungkan teknologi imersif dengan pendekatan berpusat pada peserta didik. Setelah pelatihan, sebagian besar responden menyatakan lebih percaya diri menggunakan VR-AI karena dinilai mampu meningkatkan keterlibatan dan motivasi belajar peserta didik. Temuan ini memperkuat pandangan bahwa keberhasilan integrasi teknologi dalam pembelajaran lebih ditentukan oleh transformasi praktik pedagogis dibandingkan sekadar penguasaan teknologi (Koehler et al., 2013; Scherer et al., 2019).

Aspek *Content Knowledge* (CK)

Aspek CK memperoleh skor pretest tertinggi (74%) dan meningkat menjadi 91% pada posttest dengan N-Gain sebesar 0,65 (kategori sedang). Nilai N-Gain yang lebih rendah tidak menunjukkan bahwa pelatihan kurang efektif, melainkan mencerminkan ceiling effect, karena peserta pada dasarnya telah memiliki penguasaan materi kimia yang baik sebelum mengikuti pelatihan. Hal ini diperkuat oleh jawaban kualitatif yang menunjukkan bahwa guru sejak awal telah mampu mengidentifikasi materi-materi kimia abstrak, seperti struktur atom, ikatan kimia, bentuk molekul, dan laju reaksi, sebagai topik yang membutuhkan bantuan visualisasi. Setelah pelatihan, guru memberikan alasan yang

lebih spesifik mengenai pemanfaatan VR untuk meningkatkan keamanan praktikum, visualisasi tiga dimensi, dan efisiensi pembelajaran. Temuan ini konsisten dengan penelitian yang menyatakan bahwa pelatihan TPACK umumnya memberikan dampak lebih besar pada kompetensi teknologi dan pedagogi dibandingkan kompetensi konten yang telah dimiliki guru sebelumnya (Valtonen et al., 2023).

Aspek TPACK

Peningkatan yang sangat penting juga terlihat pada aspek TPACK, yang merepresentasikan kemampuan mengintegrasikan pengetahuan teknologi, pedagogi, dan konten secara simultan. Skor aspek ini meningkat dari 70% menjadi 92% dengan N-Gain sebesar 0,73 (kategori tinggi). Peningkatan terbesar terjadi pada indikator kemampuan mengintegrasikan ketiga komponen tersebut dalam pembelajaran serta meningkatnya kepercayaan diri guru untuk menerapkan pembelajaran berbasis VR-AI di sekolah. Temuan ini menunjukkan bahwa pelatihan berhasil mengembangkan kompetensi integratif, bukan sekadar meningkatkan pengetahuan teknologi atau pedagogi secara terpisah. Hasil tersebut sejalan dengan tujuan utama kerangka TPACK yang menekankan pentingnya sintesis antara ketiga domain pengetahuan dalam menghasilkan pembelajaran yang efektif (Mishra, 2019). Penelitian terkini juga menunjukkan bahwa pelatihan yang dirancang berdasarkan kerangka TPACK mampu meningkatkan kemampuan guru dalam memilih teknologi yang sesuai dengan tujuan pembelajaran dan karakteristik materi ajar (Su, 2023).

Aspek Implementasi dan Keberlanjutan

Aspek Implementasi dan Keberlanjutan memperoleh skor pretest tertinggi (79%) dan meningkat menjadi 91% pada posttest dengan N-Gain sebesar 0,57 (kategori sedang). Tingginya skor awal menunjukkan bahwa guru telah memiliki motivasi dan kesiapan untuk mengadopsi inovasi pembelajaran sebelum pelatihan berlangsung. Oleh karena itu, ruang peningkatan pada aspek ini relatif lebih sempit dibandingkan aspek lainnya. Meskipun demikian, data kualitatif menunjukkan adanya perubahan perspektif yang menarik. Sebelum pelatihan, guru lebih banyak menyampaikan harapan untuk memanfaatkan VR-AI dalam pembelajaran, sedangkan setelah pelatihan perhatian mereka bergeser pada tantangan implementasi nyata, terutama keterbatasan perangkat VR, biaya pengadaan, serta kesiapan infrastruktur sekolah. Temuan ini menunjukkan bahwa keberhasilan pelatihan tidak hanya ditentukan oleh peningkatan kompetensi individu, tetapi juga dipengaruhi oleh dukungan organisasi dan ketersediaan sumber daya. Hasil tersebut sejalan dengan berbagai penelitian yang menyatakan bahwa faktor institusional merupakan penentu utama keberlanjutan implementasi teknologi digital di sekolah (Tondeur et al., 2020; UNESCO, 2023).

Secara keseluruhan, urutan N-Gain pada kelima aspek menunjukkan pola yang konsisten, yaitu PK (0,80) > TK (0,77) > TPACK (0,73) > CK (0,65) > Implementasi (0,57). Aspek yang memiliki kompetensi awal relatif rendah menunjukkan peningkatan

paling tinggi, sedangkan aspek yang telah memiliki capaian awal tinggi mengalami peningkatan yang lebih moderat akibat efek langit-langit. Pola tersebut diperkuat oleh diagram radar pada Gambar 4 yang memperlihatkan perubahan bentuk profil kompetensi dari kondisi awal yang tidak seimbang menjadi lebih simetris pada posttest. Pemerataan skor posttest pada kisaran 91–92% menunjukkan bahwa pelatihan tidak hanya meningkatkan kompetensi pada setiap dimensi TPACK, tetapi juga menghasilkan profil kompetensi yang lebih seimbang dan terintegrasi. Temuan ini didukung oleh hasil statistik yang menunjukkan peningkatan skor total yang signifikan ($p < 0{,}001$), ukuran efek yang sangat besar (Cohen's $d = 3{,}75$), serta N-Gain keseluruhan sebesar 0,74 yang termasuk kategori tinggi. Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa pelatihan berbasis VR-AI efektif dalam meningkatkan kompetensi TPACK guru kimia pada seluruh aspek. Dampak terbesar terlihat pada penguatan kompetensi pedagogis, literasi teknologi, serta kemampuan mengintegrasikan teknologi, pedagogi, dan konten secara seimbang, sehingga menghasilkan profil kompetensi TPACK yang lebih komprehensif dan merata.

Analisis Tematik Data Kualitatif

Analisis tematik terhadap respons terbuka pretest–posttest dilakukan mengikuti tahapan Braun and Clarke (2021), yaitu pengodean (*coding*), pengembangan tema, peninjauan tema, dan interpretasi data secara naratif.

1. Tahap Coding (Pengkodean)

Pengodean dilakukan secara semantik terhadap unit makna (*meaning unit*) pada jawaban terbuka guru, baik sebelum maupun sesudah pelatihan. Berikut pengkodean dari data kualitatif:

Tabel 6. Pengkodean data kualitatif

Kutipan/Indikasi dalam Data	Kode Awal (Pra-pelatihan)	Kode Awal (Pasca-pelatihan)
Pengalaman guru dengan teknologi pembelajaran	Penggunaan media konvensional (PPT, video, kuis daring)	Penggunaan aplikasi VR untuk praktikum virtual
Kesulitan mengajarkan materi abstrak	Kesulitan visualisasi struktur submikroskopik	Kemudahan visualisasi struktur & mekanisme reaksi melalui VR
Pemanfaatan AI	Belum/minim penggunaan	Pemanfaatan AI untuk personalisasi pembelajaran
Fasilitas pendukung	Keterbatasan laboratorium & media inovatif	Ketersediaan alternatif praktikum aman (bahan berbahaya)
Harapan/tujuan belajar	Ingin belajar VR-AI secara praktis	—

Kendala yang dirasakan	Kurangnya pengetahuan & keterampilan teknis	Kendala fisik (*motion sickness*), biaya perangkat, anggaran sekolah, kebutuhan pelatihan lanjutan
Materi kimia yang relevan	Struktur atom, ikatan kimia, asam–basa, laju & kesetimbangan reaksi (alasan: sulit dibayangkan)	Materi yang sama (alasan: representasi mikroskopik, hubungan makroskopik–partikel)
Cara pandang terhadap teknologi	Teknologi sebagai objek yang perlu dipelajari	Teknologi sebagai alat yang diterapkan dalam pembelajaran

Kode-kode tersebut kemudian dikelompokkan berdasarkan kemiripan makna dan pola kemunculannya pada data pretest maupun posttest.

2. Tahap Pengembangan Tema

Dari proses pengelompokan kode, teridentifikasi lima tema utama yang saling berkaitan dan menggambarkan alur perubahan dari kondisi sebelum hingga sesudah pelatihan:

Tabel 7. Tematik hasil pengkodean

Tema	Deskripsi	Kode Pendukung
T1. Kesenjangan kompetensi teknologi imersif di titik awal	Guru terbiasa dengan teknologi digital konvensional dan belum memiliki pengalaman dengan VR imersif, sehingga kesulitan memvisualisasikan konsep kimia abstrak	Penggunaan media konvensional; kesulitan visualisasi submikroskopik; keterbatasan fasilitas lab
T2. Orientasi kebutuhan belajar berbasis TPACK	Harapan guru terhadap pelatihan sudah selaras dengan kerangka TPACK bukan sekadar mempelajari alat, tetapi mengintegrasikannya dengan pedagogi dan konten	Keinginan belajar VR-AI praktis; kaitan dengan peningkatan kualitas pembelajaran
T3. Transformasi kompetensi aplikatif pascapelatihan	Guru menunjukkan kompetensi nyata dalam mengoperasikan VR dan memanfaatkan AI, disertai apresiasi terhadap manfaat visualisasi dan keamanan praktikum, namun juga melaporkan kendala fisik penggunaan	Pengoperasian VR untuk praktikum virtual; personalisasi via AI; manfaat visualisasi & keamanan; *motion sickness*

T4. Penguatan justifikasi pedagogis pemilihan materi	Konsistensi identifikasi topik kimia yang cocok untuk VR-AI, dengan pendalaman alasan pedagogis yang lebih spesifik setelah pelatihan	Struktur atom, ikatan kimia, laju & kesetimbangan reaksi; alasan representasi mikroskopik pascapelatihan
T5. Pergeseran lokus kendala dari individu ke sistem/infrastruktur	Kendala bergeser dari keterbatasan pengetahuan/keterampilan individu (pra) menjadi keterbatasan biaya, anggaran, dan dukungan kelembagaan (pasca)	Kendala teknis awal; biaya perangkat; anggaran sekolah; kebutuhan pendampingan lanjutan

Sebagai tema payung (*overarching theme*) yang mencakup kelima tema di atas, teridentifikasi pergeseran paradigmatik dari "belajar menggunakan teknologi" menjadi "menerapkan teknologi dalam konteks pembelajaran", yang mencerminkan pertumbuhan kompetensi TPACK secara utuh.

3. Tahap Peninjauan Tema

Peninjauan dilakukan dengan memeriksa koherensi internal tiap tema terhadap kode-kode penyusunnya serta memastikan setiap tema cukup berbeda (*mutually distinct*) satu sama lain. T1 dan T3 ditinjau ulang karena berpotensi tumpang tindih (sama-sama membahas kompetensi teknis), namun keduanya dipertahankan sebagai tema terpisah karena mewakili dua titik waktu yang berbeda (pra vs pasca) sehingga secara substantif menggambarkan *arah perubahan*, bukan kondisi statis. T4 juga ditinjau apakah lebih tepat digabung ke T3; namun T4 dipertahankan terpisah karena berfokus pada *pemetaan konten kimia spesifik* dan alasan pedagogisnya, bukan pada kompetensi operasional teknologi secara umum. Peninjauan terhadap T5 mengonfirmasi bahwa tema ini valid dan penting untuk dipertahankan karena secara eksplisit menunjukkan data yang kontras antara kondisi pra dan pasca pelatihan (dari kendala individual ke kendala struktural), yang menjadi temuan kunci dari desain *pretest–posttest* pada aspek kualitatif.

4. Interpretasi Data

Berikut ini adalah hasil interpretasi data kualitatif dan pembahasannya:

Tabel 8. Interpretasi data

Tema	Interpretasi dan Pembahasan
T1. Kesenjangan kompetensi teknologi imersif di titik awal	Kesenjangan kompetensi teknologi imersif di titik awal. Temuan bahwa guru pada mulanya hanya terbiasa dengan media konvensional dan kesulitan memvisualisasikan struktur submikroskopik menegaskan karakteristik kimia

	sebagai bidang studi yang menuntut representasi tiga level (makroskopik, submikroskopik, simbolik), sehingga tanpa media visualisasi imersif, pemahaman konsep abstrak cenderung dangkal secara kognitif. Kondisi ini konsisten dengan argumen bahwa teknologi imersif seperti VR memberikan manfaat paling besar justru pada materi sains yang memiliki tingkat abstraksi dan kebutuhan visualisasi spasial yang tinggi (Hamilton et al., 2021).
T2. Orientasi kebutuhan belajar berbasis TPACK	Orientasi kebutuhan belajar berbasis TPACK. Harapan guru untuk mempelajari VR-AI secara aplikatif, bukan sekadar mengenal fitur teknis, menunjukkan bahwa kebutuhan pengembangan profesional guru saat ini telah bergeser ke arah integrasi teknologi dengan pendekatan pedagogis yang sesuai karakteristik materi, sejalan dengan penekanan kerangka TPACK bahwa penguasaan teknologi tanpa keterpaduan dengan pedagogi dan konten tidak cukup untuk mendukung pembelajaran bermakna (Latip et al., 2023).
T3. Transformasi kompetensi aplikatif pascapelatihan	Transformasi kompetensi aplikatif pascapelatihan. Perubahan dari sekadar berharap menjadi mampu mengoperasikan VR untuk praktikum virtual dan memanfaatkan AI untuk personalisasi pembelajaran mengonfirmasi bahwa pelatihan intensif dapat mendorong penguasaan teknologi imersif secara nyata dalam waktu relatif singkat. Manfaat VR dalam menyediakan alternatif praktikum yang lebih aman untuk eksperimen berisiko tinggi sejalan dengan gagasan *Cognitive Affective Model of Immersive Learning* (CAMIL) bahwa lingkungan VR memungkinkan pembelajar memperoleh presence dan agency dalam skenario yang secara fisik sulit atau berbahaya untuk dihadirkan secara langsung (Makransky & Petersen, 2021). Namun demikian, laporan sebagian guru mengenai *motion sickness* menegaskan bahwa efektivitas VR tetap dipengaruhi oleh kenyamanan pengguna dan kualitas desain pengalaman imersif, bukan semata-mata oleh kecanggihan teknologinya (Makransky & Petersen, 2021; Radianti et al., 2020).
T4. Penguatan justifikasi pedagogis pemilihan materi	Penguatan justifikasi pedagogis pemilihan materi. Konsistennya guru mengidentifikasi struktur atom, ikatan kimia, asam–basa, laju reaksi, dan kesetimbangan kimia sebagai materi yang paling membutuhkan VR-AI disertai alasan yang semakin spesifik pascapelatihan menunjukkan

	berkembangnya *Content Knowledge* yang berpadu dengan pemahaman teknis (dimensi TCK dalam TPACK). Pola ini memperkuat temuan bahwa VR paling efektif digunakan pada materi yang menuntut kemampuan menghubungkan fenomena makroskopik dengan model partikel yang tidak teramati secara langsung (Hamilton et al., 2021).
T5. Pergeseran lokus kendala dari individu ke sistem/infrastruktur	Pergeseran lokus kendala dari individu ke sistem/infrastruktur. Pergeseran fokus kendala dari keterbatasan pengetahuan individu menjadi kendala biaya, anggaran, dan ketersediaan perangkat menunjukkan bahwa peningkatan kompetensi individu guru tidak serta-merta menjamin keberlanjutan implementasi tanpa dukungan sistemik. Temuan ini sejalan dengan laporan UNESCO (2023) yang menegaskan bahwa keberhasilan pemanfaatan teknologi dalam pendidikan bergantung pada tiga kondisi sistemik sekaligus, yaitu akses terhadap infrastruktur teknologi, tata kelola/regulasi, dan kesiapan guru bukan pada kesiapan guru semata. Hal serupa turut dikonfirmasi oleh tinjauan sistematis kerangka kompetensi digital guru yang menemukan bahwa dukungan kelembagaan dan ketersediaan sumber daya merupakan faktor penentu keberlanjutan integrasi teknologi setelah pelatihan berlangsung (Velandia Rodriguez et al., 2022).

Tema payung Dari "belajar menggunakan teknologi" menuju "menerapkan teknologi dalam pembelajaran". Secara keseluruhan, kelima tema di atas membentuk satu alur perubahan yang koheren: dari kesenjangan kompetensi dan harapan berbasis kebutuhan (T1–T2), menuju penguasaan aplikatif dan justifikasi pedagogis yang lebih matang (T3–T4), hingga kesadaran akan tantangan struktural bagi keberlanjutan implementasi (T5). Pola perubahan ini secara konsisten mencerminkan pertumbuhan kompetensi TPACK guru kimia secara utuh bukan hanya pada dimensi teknologi, tetapi juga pada keterpaduannya dengan pedagogi dan konten — sekaligus menegaskan bahwa data kualitatif memperkuat dan memperkaya temuan kuantitatif mengenai efektivitas pelatihan VR-AI.

5. KESIMPULAN DAN IMPLIKASI

Penelitian ini menunjukkan bahwa pelatihan berbasis VR dan AI efektif meningkatkan kompetensi TPACK guru kimia. Peningkatan tersebut ditunjukkan oleh perbedaan signifikan antara skor pretest dan posttest, N-Gain berkategori tinggi, serta ukuran efek yang sangat besar. Aspek *Pedagogical Knowledge*, *Technological Knowledge*, dan integrasi TPACK mengalami peningkatan tertinggi, sedangkan *Content Knowledge* serta Implementasi dan Keberlanjutan meningkat pada kategori sedang

karena kompetensi awal peserta telah relatif tinggi. Temuan kualitatif memperkuat hasil tersebut dengan menunjukkan peningkatan kemampuan guru dalam memanfaatkan VR-AI untuk memvisualisasikan konsep kimia abstrak, merancang pembelajaran yang lebih interaktif, dan mengintegrasikan teknologi ke dalam pembelajaran. Secara praktis, pelatihan ini berpotensi menjadi model pengembangan profesional guru berbasis teknologi imersif. Penelitian selanjutnya disarankan melibatkan kelompok kontrol, jumlah sampel yang lebih besar, serta studi longitudinal untuk mengevaluasi keberlanjutan implementasi VR-AI dan dampaknya terhadap hasil belajar peserta didik serta pengembangan kompetensi TPACK guru.

6. UCAPAN TERIMAKASIH

Pengabdian kepada masyarakat ini didanai oleh LPPM Universitas Negeri Jakarta (Nomor 12/PPM-KKN/LPPM/III/2026).

7. DAFTAR PUSTAKA

Balushi, Jasim Sharki Ghulam; Al Jabri, Malak Ibrahim Ahmed; Palarimath, Suresh Maran, P., & Thenmozhi, K Balakumar, C. (2024). Incorporating Artificial Intelligence Powered Immersive Realities to Improve Learning using Virtual Reality (VR) and Augmented Reality (AR) Technology. *2024 3rd International Conference on Applied Artificial Intelligence and Computing (ICAAIC)*, 760–765. https://doi.org/10.1109/ICAAIC60222.2024.10575046

Braun, V., & Clarke, V. (2021). *Thematic analysis: A practical guide*. SAGE Publications.

Cahyana, U., Lestari, I., Irwanto, I., & Suroso, J. (2024). Development of a mobile learning network for science with augmented reality and its impact on students' literacy and numeracy. *International Journal of Innovative Research and Scientific Studies*, *7*(2), 576–586. https://doi.org/10.53894/ijirss.v7i2.2685

Cohen, J. (2013). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2nd ed.). Routledge. https://doi.org/https://doi.org/10.4324/9780203771587

Conover, W., J. (1999). *Practical nonparametric statistics* (3rd ed.). Wiley.

Duc, N. M., & Quang, N. V. (2024). Application of augmented reality in chemistry education: a systemic review based on bibliometric analysis from 2002 to 2023. *International Journal of Education in Mathematics, Science and Technology*, 1415–1434. https://doi.org/10.46328/ijemst.4265

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

Hamilton, D., McKechnie, J., Edgerton, E., & Wilson, C. (2021). Immersive virtual reality as a pedagogical tool in education: a systematic literature review of quantitative learning outcomes and experimental design. *Journal of Computers in Education*, *8*(1), 1–32. https://doi.org/10.1007/s40692-020-00169-2

Han, X. (2025). Improving pre-service teachers' AI competencies: a quasi experimental study. *Frontiers in Psychology*, *Volume 16-2025*. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2025.1642465

Hu-Au, E. (2024). Learning abstract chemistry concepts with virtual reality: An experimental study using a VR chemistry lab and molecule simulation. *Electronics*, *13*(16). https://doi.org/10.3390/electronics13163197

Kholifah, K., Pradita, N., Prasetyo, A., Mahyuzar, H., & Hidayat, R. (2024). Pelatihan pemanfaatan media digital berbasis kecerdasan buatan (AI) dan realitas virtual (VR) Untuk guru mata pelajaran eEkonomi di Kebumen. *Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat Nusantara*, *5*(3), 3678–3685. https://doi.org/10.55338/jpkmn.v5i3.3856

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

Latip, A., Robandi, B., Khakim, R. R., & Fatonah, N. (2023). Technological pedagogical content knowledge (TPACK) framework for science teachers' comptences in facing global challenges and issues : A narrative literature review. *International Journal of Pedagogy and Teacher Education*, *7*(1), 45–56. https://doi.org/https://doi.org/10.20961/ijpte.v0i0.74699

Makransky, G., & Petersen, G. B. (2021). The Cognitive Affective Model of Immersive Learning (CAMIL): A theoretical research-based model of learning in immersive virtual reality. *Educational Psychology Review*, *33*(3), 937–958. https://doi.org/10.1007/s10648-020-09586-2

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

Nisa, A., & Dwiningsih, K. (2021). Analisis hasil belajar peserta didik melalui media visualisasi geometri molekul berbasis mobile virtual reality (MVR). *PENDIPA Journal of Science Education*, *6*(1), 135–142. https://doi.org/10.33369/pendipa.6.1.135-142

Paristiowati, M., Yusmaniar, Fazar Nurhadi, M., & Imansari, A. (2020). Analysis of technological pedagogical and content knowledge (TPACK) of prospective chemistry teachers through lesson study. *Journal of Physics: Conference Series*, *1521*(4), 42069. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1521/4/042069

Radianti, J., Majchrzak, T. A., Fromm, J., & Wohlgenannt, I. (2020). A systematic review of immersive virtual reality applications for higher education: Design elements, lessons learned, and research agenda. *Computers and Education*, *147*(December 2019), 103778. https://doi.org/10.1016/j.compedu.2019.103778

Scherer, R., Siddiq, F., & Tondeur, J. (2019). The technology acceptance model (TAM): A meta-analytic structural equation modeling approach to explaining teachers' adoption of digital technology in education. *Computers & Education*, *128*, 13–35. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compedu.2018.09.009

Shulman, L. S. . (1986). Those Who Understand: Knowledge Growth in Teaching. *Educational Researcher*, *15*(2), 4–14. https://doi.org/10.3102/0013189X015002004

Siahaya, S. R. (2024). Literatur review: Penerapan virtual reality sebagai media pembelajaran interaktif. *Buletin Ilmiah Ilmu Komputer Dan Multimedia (BIIKMA)*, *2*(2), 313–319.

Su, J. (2023). Preservice teachers' technological pedagogical content knowledge development: A bibliometric review. *Frontiers in Education*, *Volume 7-2022*. https://doi.org/10.3389/feduc.2022.1033895

Tan, X., Cheng, G., & Ling, M. H. (2025). Artificial intelligence in teaching and teacher professional development: A systematic review. *Computers and Education: Artificial Intelligence*, *8*, 100355. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.caeai.2024.100355

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.

UNESCO. (2023). *Global education monitoring report 2023: Technology in education — A tool on whose terms?* UNESCO Publishing. https://doi.org/https://doi.org/10.54676/UZQV8501

Valtonen, T., Eriksson, M., Kärkkäinen, S., Tahvanainen, V., Turunen, A., Vartiainen, H., Kukkonen, J., & Sointu, E. (2023). Emerging imbalance in the development of TPACK - A challenge for teacher training. *Education and Information Technologies*, *28*(5), 5363–5383. https://doi.org/10.1007/s10639-022-11426-5

Velandia Rodriguez, C. A., Mena-Guacas, A. F., Tobón, S., & López-Meneses, E. (2022). Digital teacher competence frameworks evolution and their use in Ibero-America up to the year the COVID-19 pandemic began: A systematic review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *19*(24). https://doi.org/10.3390/ijerph192416828

Wang, S., Wang, F., Zhu, Z., Wang, J., Tran, T., & Du, Z. (2024). Artificial intelligence in education: A systematic literature review. *Expert Systems with Applications*, *252*(PA), 124167. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.124167

Yildirim, B., & Akcan, A. T. (2024). AI-professional development model for chemistry teacher: Artificial intelligence in chemistry education. *Journal of Education in Science, Environment and Health*, *10*(4), 161–182. https://doi.org/https://doi.org/10.55549/jeseh.741