JOURNAL OF RESEARCH, INNOVATION, AND STRATEGIES FOR EDUCATION
VOL. 2, NO. 4, PP. 66-82, AUGUST 2025
https://doi.org/10.70148/rise.v2i4.5

Teknologi Imersif dalam Pendidikan Matematik Murid Ketidakupayaan Pendengaran: Naratif daripada Realiti Terimbuh (AR) hingga ke Metaverse

Ai Peng Chong[1], Kung-Teck Wong[2]* and Vestly Kong Liang Soon[3]

[1,2,3] Faculty of Human Development, Universiti Pendidikan Sultan Idris (UPSI)

ABSTRAK

Ulasan naratif ini bertujuan menilai secara kritis peranan teknologi imersif yang merangkumi realiti terimbuh (AR), realiti maya (VR), realiti campuran (MR) dan metaverse dalam memperkukuh pembelajaran matematik bagi murid ketidakupayaan pendengaran. Murid dalam kategori ini sering menghadapi cabaran komunikasi, kosa kata bahasa isyarat akademik yang terhad, dan kesukaran memahami konsep abstrak yang membawa kepada jurang pencapaian serta kebimbangan matematik. Perkembangan teknologi imersif menawarkan peluang baharu melalui visualisasi tiga dimensi, manipulasi objek maya dan interaktiviti berasaskan avatar yang berupaya meningkatkan kefahaman serta penglibatan murid. Kajian ini menggunakan pendekatan ulasan naratif untuk mensintesis dapatan daripada pelbagai disiplin termasuk pendidikan, psikologi, teknologi maklumat dan sains komputer. Fokus diberikan kepada kajian yang diperoleh daripada pangkalan data utama seperti Scopus, Web of Science, IEEE Xplore, Semantic Scholar dan Google Scholar, di samping sumber lain yang berkaitan dengan matematik dan murid ketidakupayaan pendengaran. Dapatan menunjukkan AR, VR dan MR berkesan dalam memvisualisasikan konsep matematik serta mengukuhkan penaakulan spatial. Metaverse pula meluaskan potensi ini dengan menyediakan kolaborasi maya, kehadiran sosial dan integrasi ciri kebolehcapaian seperti kapsyen serta avatar bahasa isyarat. Walau bagaimanapun, beberapa cabaran masih wujud termasuk kos peranti yang tinggi, infrastruktur tidak sekata, tahap kesediaan guru dan reka bentuk kebolehcapaian yang belum konsisten. Ulasan ini menegaskan keperluan kajian longitudinal berskala besar, pembangunan berasaskan reka bentuk pembelajaran sejagat (UDL) serta penilaian keberkesanan agar integrasi teknologi imersif dapat dilaksanakan secara inklusif, mampan dan berkesan dalam pendidikan matematik khas.

SEJARAH ARTIKEL

Peroleh 30 August 2025
Semakan 08 September 2025
Terima 25 September 2025

KATA KUNCI

Teknologi imersif; Realiti terimbuh; Metaverse; Matematik; Murid ketidakupayaan pendengaran

CONTACT Kung-Teck Wong **thomas@fpm.upsi.edu.my** **Faculty of Human Development, Universiti Pendidikan Sultan Idris (UPSI).**
ISSN : 3030-6582 (Printed), eISSN : 3030-5330 (Online). DOI rise.v2i4.5. This article Journal of Research, Innovation, and Strategies for Education is available under Creative Commons CC-BY 4.0 license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0). For further queries, please contact Editors at editor@teknologi.edu.my. For further queries, please contact Editors at editor@teknologi.edu.my

Immersive Technologies in Deaf and Hard of Hearing (DHH) Mathematics Education: Narratives from Augmented Reality to the Metaverse

ABSTRACT

This narrative review critically examines the role of immersive technologies, including augmented reality (AR), virtual reality (VR), mixed reality (MR), and the metaverse, in enhancing mathematics learning for Deaf and Hard-of-Hearing (DHH) students. These learners often encounter challenges such as limited communication access, restricted academic sign language vocabulary, and difficulties in understanding abstract concepts, which contribute to persistent achievement gaps and mathematics anxiety. Immersive technologies provide new opportunities through three-dimensional visualization, manipulation of virtual objects, and avatar-based interactivity that can enrich comprehension and engagement. This review adopts a narrative approach to synthesize evidence from multiple disciplines, including education, psychology, information technology, and computer science. The focus is on studies retrieved from major databases such as Scopus, Web of Science, IEEE Xplore, Semantic Scholar, and Google Scholar, along with other sources related to mathematics and DHH learners. The findings indicate that AR, VR, and MR are effective in visualizing mathematical concepts and strengthening spatial reasoning, while the metaverse extends these affordances by enabling collaborative learning, social presence, and accessibility features such as captions and sign-language avatars. Nevertheless, challenges remain, including the high cost of devices, uneven infrastructure, limited teacher readiness, and inconsistent accessibility design. This review emphasizes the need for large-scale longitudinal studies, the development of Universal Design for Learning (UDL)-based frameworks, and cost-effectiveness evaluations to ensure that the integration of immersive technologies is inclusive, sustainable, and effective in mathematics education for DHH learners.

ARTICLE HISTORY

Received 30 August 2025
Revised 08 September 2025
Accepted 25 September 2025

KEYWORDS

Immersive technology; Augmented reality; Metaverse; Mathematics; Deaf and hard of hearing (DHH)

1. Pengenalan

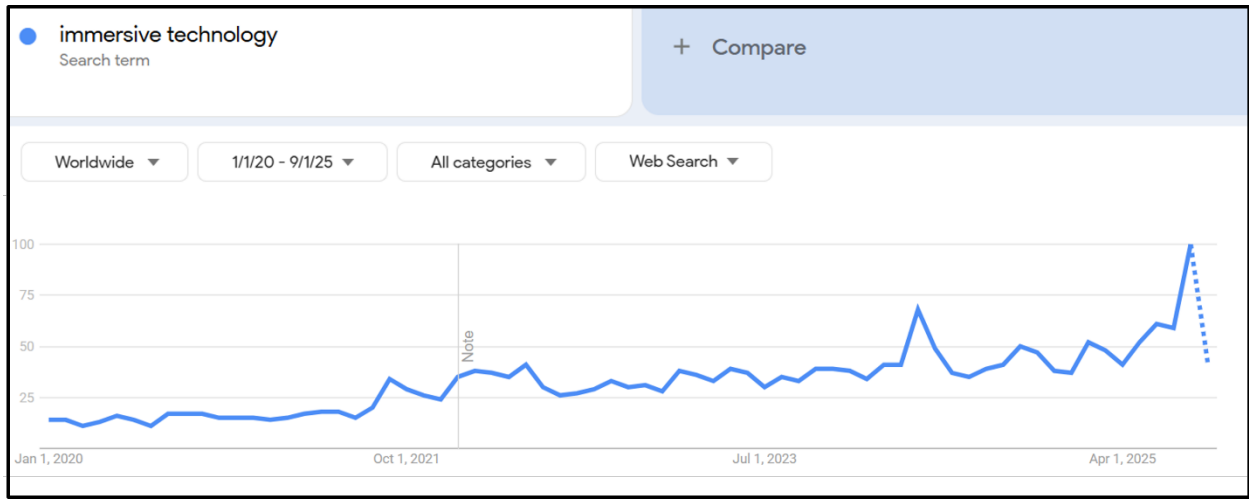
Pendidikan matematik merupakan tunjang utama dalam pembangunan pemikiran logik, kemahiran menyelesaikan masalah, serta kecekapan berfikir aras tinggi (Gradini et al., 2024; Haratua et al., 2025; Puspita et al., 2025). Akses kepada pembelajaran yang berkesan amat penting untuk semua murid, termasuk murid ketidakupayaan pendengaran. Namun, cabaran komunikasi, keterbatasan kosa kata dalam bahasa isyarat akademik, dan kesukaran memahami konsep abstrak sering menyebabkan jurang pencapaian yang ketara antara murid ketidakupayaan pendengaran dan rakan sebaya mereka (Bashir et al., 2024; Praveen Deshan et al., 2023).

Perkembangan teknologi digital, khususnya teknologi imersif, menawarkan peluang baharu untuk menangani cabaran tersebut. Teknologi ini meliputi realiti terimbuh (*Augmented Reality, AR),* realiti maya (*Virtual Reality, VR*), realiti campuran (Mixed Reality, MR), dan metaverse, kesemuanya berasaskan visualisasi tiga dimensi serta

interaktiviti yang membolehkan pengguna berinteraksi secara lebih mendalam dengan kandungan pembelajaran (Fernandes et al., 2023; Krasavina et al., 2023; Rahim et al., 2024). Data Google Trends (Januari 2020–April 2025) turut menunjukkan peningkatan minat global terhadap teknologi imersif, dengan lonjakan ketara menjelang 2023 dan kemuncak pada awal 2025 (Rajah 1). Fenomena ini mencerminkan peningkatan perhatian dalam bidang pendidikan, industri, dan hiburan.

Rajah 1

Trend minat terhadap teknologi imersif berdasarkan data Google Trends



Sumber: https://trends.google.com/trends/explore?date=2020-01-01%202025-09-01&q=immersive%20technology&hl=en

Dalam konteks Malaysia, transformasi pendidikan digital dipandu oleh Pelan Pembangunan Pendidikan Malaysia (PPPM) 2013–2025 serta Dasar Pendidikan Digital (DPD) 2023. DPD memperincikan empat objektif utama melalui enam teras, 18 strategi, dan 41 inisiatif bagi merapatkan jurang digital serta memastikan murid, guru, dan pemimpin pendidikan memanfaatkan teknologi secara optimum (Kementerian Pendidikan Malaysia, 2023). Pelaksanaan dasar ini menunjukkan keterlibatan kerajaan untuk menyediakan pendidikan yang inklusif dan berkesan, selari dengan aspirasi Pendidikan 5.0 sebagai paradigma baharu pembelajaran. Pendidikan 5.0 menggabungkan kemajuan teknologi seperti AI, AR/VR, dan pembelajaran seumur hidup dengan pembangunan nilai kemanusiaan seperti kreativiti, empati, dan kecerdasan emosi (Ahmad et al., 2023; Haratua et al., 2025; Mohd Salleh et al., 2020; Shahidi Hamedani et al., 2024).

Perhatian global terhadap metaverse semakin meningkat apabila Facebook menjenamakan semula syarikatnya kepada Meta pada 2021, menandakan komitmen baharu terhadap pembangunan metaverse sebagai ekosistem digital masa depan yang menggabungkan AR, VR, kecerdasan buatan, dan blockchain (Lucia et al., 2025; Raza, 2023). Platform seperti Engage VR dan Minecraft telah membuktikan potensi ruang maya untuk mewujudkan kelas tanpa sempadan geografi melalui kolaborasi digital dan bengkel interaktif (Darmawan et al., 2025; Perinpasingam et al., 2022; Singh & Sun, 2025; Wei et al., 2022). Selaras dengan aspirasi DPD, peluang wujud untuk mengintegrasikan teknologi imersif ke dalam bilik darjah murid berkeperluan pendidikan khas, khususnya dalam pembelajaran matematik. Walaupun bukti awal menunjukkan AR dan VR mampu meningkatkan motivasi, penglibatan, serta kefahaman konsep abstrak (Fernandes et al., 2023; Rahim et al., 2024), pelaksanaan berskala besar masih terhalang oleh isu kebolehcapaian, kesediaan guru, kos peranti, dan infrastruktur yang tidak sekata (Shrivastava et al., 2023). Tambahan pula, kajian khusus tentang metaverse sebagai ruang pembelajaran matematik inklusif masih terhad, sekali gus menandakan jurang dalam asas bukti sedia ada.

Justeru, integrasi teknologi imersif menuntut pendekatan sistematik dan berfasa agar selari dengan dasar nagara serta memastikan pendidikan khas berkembang secara inklusif dan berdaya saing. Ulasan naratif ini meneliti secara kritis perkembangan, potensi, dan kekangan teknologi imersif dalam pendidikan matematik. Perbincangan memberi

tumpuan kepada (i) mengkonseptualisasikan teknologi imersif dalam spektrum AR–VR–MR–metaverse, (ii) menilai keberkesanannya terhadap pembelajaran matematik murid ketidakupayaan pendengaran, dan (iii) mengenal pasti cabaran serta jurang penyelidikan yang perlu ditangani pada masa hadapan. Fokus ini diharapkan dapat menyumbang kepada pembentukan strategi pendidikan khas yang lebih inovatif, inklusif, dan mampan dalam era digital.

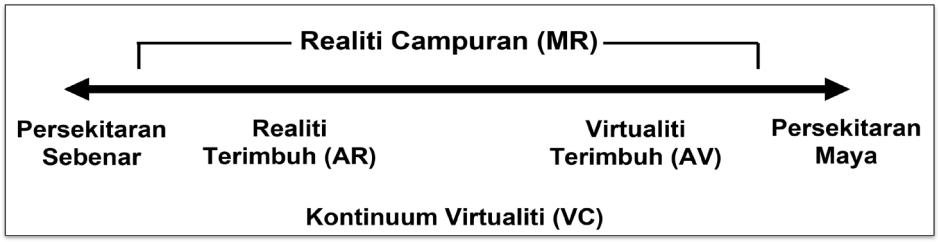
2. Sorotan Kajian

2.1 Perkembangan Teknologi Imersif

AR dan VR sering dibincangkan bersama, tetapi kedua-duanya mempunyai peranan berbeza dalam *reality–virtuality continuum* yang diperkenalkan oleh Milgram dan Kishino (1994). AR berpaksikan dunia nyata dengan menambah lapisan maklumat digital pada objek fizikal, manakala VR sepenuhnya berasaskan dunia maya yang dicipta oleh komputer (Rajah 2). Dunia maya ini boleh meniru realiti sebenar, tetapi bebas daripada hukum fizik seperti masa, graviti, dan sifat bahan (Arici et al., 2019). Dari perspektif kehadiran pengguna (*user presence*), VR menempatkan individu dalam persekitaran sintetik yang membolehkan pengalaman sepenuhnya tanpa perlu hadir ke lokasi sebenar (Austermann et al., 2025; Marougkas et al., 2023; Mikropoulos, 2006). Sebagai contoh, seorang pelajar di Sabah boleh "mengunjungi" Menara Kuala Lumpur secara maya melalui VR dan merasai suasananya secara imersif. Sebaliknya, seorang pelancong yang benar-benar berada di sekitar Menara Kuala Lumpur boleh menggunakan aplikasi AR untuk memaparkan maklumat tambahan tentang sejarah dan reka bentuk menara apabila kamera telefon dihalakan ke arah struktur tersebut.

Rajah 2

Spektrum Persekitaran Imersif: Dari Realiti Sebenar hingga Realiti Maya



Sumber: Milgram and Kishino 1994

Mixed Reality (MR) menempati kedudukan pertengahan dalam spektrum *reality–virtuality continuum* yang diperkenalkan oleh Milgram dan Kishino (1994). Tidak seperti AR yang hanya menambah lapisan maklumat digital ke atas dunia nyata, MR membolehkan interaksi dua hala secara serentak antara objek fizikal dan maya. Dalam hal ini, pengguna bukan sahaja melihat lapisan maya, tetapi juga berupaya memanipulasi, mengubah suai, atau memberi respons terhadapnya dalam ruang nyata. Keupayaan ini menjadikan MR lebih imersif berbanding AR, tetapi masih kurang menyeluruh berbanding VR. Kajian menunjukkan MR berpotensi menyediakan ruang pembelajaran yang menggabungkan manfaat dunia nyata dan maya melalui pengalaman interaktif, kolaboratif, serta berasaskan deria. Sebagai contoh, Maas dan Hughes (2020) dalam tinjauan sistematik tentang AR, VR, dan MR di sekolah K–12 mendapati MR dapat menyokong pemahaman konsep abstrak melalui interaksi langsung dengan objek digital, meningkatkan motivasi serta penglibatan murid, dan memperkukuh keupayaan penaakulan spatial. Begitu juga, Aguayo dan Eames (2023) menegaskan bahawa persekitaran XR/MR mampu memperkayakan pengalaman pembelajaran melalui pendekatan berteraskan *embodied learning* dan heutagogi, sekali gus membolehkan murid belajar secara kendiri sambil membina pengetahuan melalui pengalaman sensorial dan kontekstual.

Perkembangan seterusnya membawa kepada kemunculan istilah "metaverse," yang melampaui spektrum realiti–maya dengan menekankan aspek sosial, kolaboratif, dan ekonomi maya. Istilah ini diperkenalkan oleh Neal Stephenson dalam novel *Snow Crash* (1992), dan sejak itu berkembang melalui platform awal seperti *Habitat* (1986),

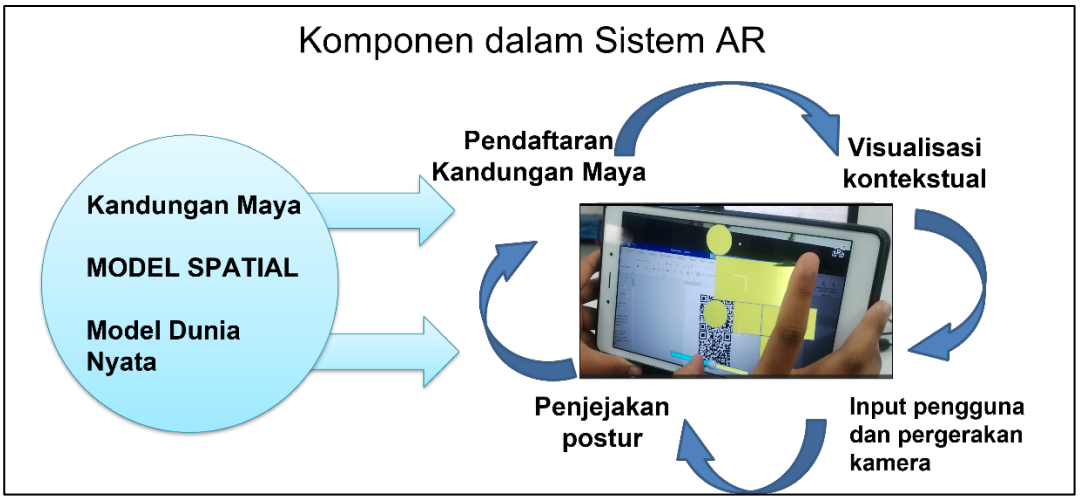
Active Worlds (1995), dan *Second Life* (2003) yang memberi peluang kepada pengguna untuk berinteraksi dan membina dunia maya mereka sendiri (Ball, 2022; Britt, 2008; Dwivedi et al., 2022). Inovasi kontemporari seperti *Roblox* (2006), *Pokémon GO* (2016), dan *Fortnite* (2019) membuktikan integrasi AR dan VR telah sebati dalam kehidupan seharian. Lebih terkini, permainan berasaskan AR seperti *Pikmin Bloom* (2021) dan *Monster Hunter Now* (2023) memperlihatkan kesinambungan trend ini dengan menggabungkan aktiviti harian pengguna bersama elemen maya secara interaktif (Poplin et al., 2025). Dalam bidang VR pula, permainan sosial seperti *Gorilla Tag* (2022) menunjukkan bagaimana interaksi fizikal dan sosial dapat dimanifestasikan dalam ruang maya yang imersif (Boots et al., 2025; Shackelford et al., 2025). Selain itu, kemunculan platform metaverse popular seperti Zepeto (2018), *Decentraland* (2020), *The Sandbox* (2021), dan *Meta Horizon Worlds* (2021) telah memperluas lagi dimensi interaksi digital melalui avatar, persekitaran sosial, serta ekonomi maya yang berterusan (Muruganantham & Kumar, 2024).

2.2 Aplikasi Teknologi Imersif dalam Pendidikan

Teknologi imersif yang merangkumi *Augmented Reality* (AR), *Virtual Reality (*VR), *Mixed Reality* (MR), dan metaverse kini menjadi asas penting dalam inovasi pendidikan digital. VR moden berakar daripada prototaip *head-mounted display* stereoskopik yang dibangunkan oleh Ivan Sutherland pada tahun 1968, manakala AR diperkenalkan secara praktikal melalui pembangunan HUDSet oleh Thomas Caudell untuk pekerja Boeing pada tahun 1992 (Achten, 2021). MR pula menggabungkan elemen nyata dan maya dalam satu persekitaran interaktif yang membolehkan pengguna berinteraksi secara serentak dengan kedua-dua dunia (Wu et al., 2023). Metaverse seterusnya meluaskan konsep ini dengan menyediakan ruang maya kolaboratif berasaskan avatar yang berterusan, membolehkan interaksi sosial, pembelajaran, dan aktiviti ekonomi berlaku dalam ekosistem digital tiga dimensi (Büyüközkan & Mukul, 2024). Teknologi-teknologi ini kemudiannya berkembang pesat dan diaplikasikan secara meluas dalam pelbagai bidang seperti pendidikan, perubatan, seni bina, dan industri kreatif.

Rajah 3

AR melibatkan maklum balas berterusan antara pengguna dan sistem peranti pintar



Diadaptasi daripada Höllerer dan Schmalstieg (2016)

Dalam pendidikan, perbezaan ini memberi implikasi penting. VR digunakan untuk mewujudkan persekitaran pembelajaran yang sepenuhnya maya, membolehkan pelajar menjalankan eksperimen atau visualisasi konsep yang sukar dalam ruang terkawal. Sebaliknya, AR digunakan untuk meningkatkan pengalaman dunia nyata, contohnya melalui lapisan maklumat interaktif pada objek atau model fizikal. Rajah 3 menunjukkan bagaimana sistem AR berfungsi melalui kitaran maklum balas yang melibatkan pendaftaran kandungan maya, penjejakan postur, input pengguna, dan visualisasi kontekstual, sekali gus menegaskan sifat interaktif serta dinamik teknologi ini (Höllerer & Schmalstieg, 2016). Kajian antarabangsa menunjukkan bahawa kedua-dua pendekatan ini berupaya meningkatkan motivasi, penglibatan, dan kefahaman pelajar terhadap konsep abstrak (De Felice et al., 2023; Wu et al., 2023).

Namun, walaupun teknologi ini semakin popular, aksesnya tidak sama rata. Elena-Bucea et al. (2021) menunjukkan bahawa faktor seperti umur, tahap pendidikan, jantina, dan pendapatan mempengaruhi tahap kesediaan serta penggunaan teknologi digital, sekali gus menyumbang kepada jurang digital *(*digital *divide)*. Hal ini penting dalam konteks pendidikan kerana jurang digital boleh menjejaskan keberkesanan pelaksanaan AR dan VR dalam kalangan murid yang berbeza latar belakang. Seperti yang ditegaskan oleh Siddiqi (2024), masa depan pendidikan digital hanya akan benar-benar inklusif dan mampan jika isu kesaksamaan diberi perhatian serius, termasuk memastikan semua pelajar tanpa mengira latar belakang sosioekonomi dapat mengakses teknologi yang sama

Selain itu, Creed et al. (2024) menekankan bahawa AR/VR masih mempunyai banyak halangan kebolehaksesan, khususnya bagi murid berkeperluan khas termasuk ketidakupayaan pendengaran. Halangan seperti ketiadaan ciri kapsyen automatik, keserasian peranti dengan alat sokongan (contohnya alat bantu pendengaran), dan risiko beban kognitif akibat maklumat berlebihan boleh memperluas lagi jurang digital jika tidak ditangani secara proaktif. Oleh itu, pelaksanaan teknologi imersif dalam pendidikan perlu diiringi strategi inklusif yang menitikberatkan reka bentuk pembelajaran sejagat (*Universal Design for Learning, UDL*), sokongan kebolehcapaian, dan dasar pendidikan digital yang menyeluruh bagi memastikan manfaatnya dapat dirasai secara adil dan saksama oleh semua pelajar.

2.3. Cabaran Matematik bagi Murid Ketidakupayaan Pendengaran

Matematik merupakan bahasa simbol dan penaakulan yang menuntut penguasaan konsep abstrak, logik, dan penaakulan ruang. Namun, bagi murid ketidakupayaan pendengaran, pembelajaran matematik sering menjadi cabaran yang kompleks. Kajian mendapati pencapaian matematik murid ketidakupayaan pendengaran berada beberapa tahun di belakang rakan sebaya mereka yang mendengar, bukan kerana kekurangan kognitif, tetapi disebabkan oleh halangan komunikasi, kelewatan perkembangan bahasa isyarat akademik, serta kekurangan sokongan pedagogi yang sesuai (Basigi et al., 2024; Nunes & Moreno, 2002; Pagliaro, 2015). Kekurangan guru matematik yang mahir dalam bahasa isyarat menambahkan jurang ini, manakala kurikulum yang kurang adaptif serta ketiadaan teknologi sokongan menambah lagi beban pembelajaran (Aftab et al., 2022; Schindler et al., 2022).

Selain itu, faktor emosi dan afektif turut memberi kesan ketara. Murid ketidakupayaan pendengaran sering berdepan perasaan terasing, rendah diri, dan kehilangan motivasi akibat kesukaran mengikuti perbincangan kelas yang sangat bergantung pada input auditori (Kritzer, 2009; Nunes & Moreno, 2002). Keadaan ini dikaitkan dengan *mathematics anxiety* (MA), iaitu tindak balas emosi negatif terhadap matematik yang terbukti mengganggu pencapaian akademik dan mengurangkan kecenderungan menyertai bidang STEM. Kajian menunjukkan MA dalam kalangan murid ketidakupayaan pendengaran berkait rapat dengan faktor persekitaran sekolah, pengalaman bahasa, dan sikap guru, serta menjejaskan motivasi, efikasi kendiri, dan hasil matematik (Mishra et al., 2022).

Walaupun demikian, terdapat bukti empirik yang memberangsangkan daripada kajian antarabangsa. Kajian di Arab Saudi mendapati penggunaan AR dalam pengajaran konsep bulatan menjadikan pembelajaran lebih konkrit dan mudah difahami secara visual (Aboud & Al Ali, 2025). Di Portugal, projek *Inclusive Glossary of Mathematical Terms (GIM)* yang menggabungkan permainan kad dengan video bahasa isyarat membantu murid ketidakupayaan pendengaran menguasai istilah matematik dengan lebih berkesan (Casimiro et al., 2023). Sementara itu, Samaradivakara et al. (2025) di Sri Lanka menunjukkan bahawa kapsyen AR masa nyata dapat mengurangkan beban kognitif dan meningkatkan motivasi. Dapatan serupa turut direkodkan di Indonesia, di mana Pamungkas et al. (2023) menegaskan bahawa media pembelajaran matematik yang bersifat visual dan taktil amat penting untuk memastikan murid ketidakupayaan pendengaran memahami konsep abstrak secara lebih mendalam.

Penaakulan spatial merupakan aspek asas dalam pembelajaran matematik. Keupayaan ini menyokong penguasaan topik seperti geometri, bentuk tiga dimensi, dan Teorem Pythagoras, serta terbukti sebagai peramal kukuh pencapaian matematik (Thoma & Hallenbeck, 2022). Namun, murid ketidakupayaan pendengaran sering menghadapi kekangan dalam menguasai penaakulan spatial akibat akses terhad kepada bahasa isyarat akademik dan strategi pengajaran visual yang sistematik. Kajian terkini turut menunjukkan bahawa MA dalam kalangan murid DHH berkait rapat dengan kelemahan penaakulan matematik, termasuk keupayaan spatial, kerana kebimbangan yang

tinggi boleh menjejaskan tumpuan, memori kerja, dan keberanian mencuba strategi penyelesaian masalah (Mishra et al., 2022).

Dalam konteks ini, teknologi imersif menawarkan pendekatan alternatif yang berkesan. Melalui AR, VR, dan metaverse, murid berpeluang berinteraksi dengan objek tiga dimensi dalam ruang maya sambil mengekalkan konteks dunia sebenar. Visualisasi ini membolehkan mereka membina kefahaman konsep abstrak melalui pengalaman langsung, sekali gus memperkukuh penaakulan spatial serta berpotensi mengurangkan tahap kebimbangan matematik dengan menyediakan persekitaran pembelajaran yang lebih inklusif, selamat, dan menyeronokkan (Samaradivakara et al., 2025; Wu et al., 2023). Walau bagaimanapun, faktor kurikulum dan pedagogi tidak boleh diketepikan. Guru sering mengecualikan topik tertentu, seperti matriks dan kebarangkalian, kerana beranggapan ia terlalu sukar untuk murid ini. Pengecualian ini secara tidak langsung mengehadkan peluang murid ketidakupayaan pendengaran untuk menguasai spektrum penuh kandungan matematik (Atış & Doğaner, 2022; Schindler et al., 2022).

2.4. Metaverse sebagai Ruang Pembelajaran

Metaverse menyediakan persekitaran pembelajaran kolaboratif yang menyerupai bilik darjah maya, lengkap dengan avatar dan interaksi sosial yang lebih imersif (Bazargani et al., 2025; Beck et al., 2024; Büyüközkan & Mukul, 2024). Dalam bidang pendidikan kesihatan, misalnya, platform metaverse telah digunakan untuk latihan klinikal jarak jauh yang terbukti meningkatkan penglibatan pelajar serta memperluas akses pembelajaran (Gencer et al., 2025; Yu et al., 2025). Prinsip yang sama boleh diaplikasikan dalam bidang matematik, di mana avatar, simulasi maya, dan ruang kolaboratif mampu memupuk interaksi sosial serta membantu murid ketidakupayaan pendengaran memahami konsep abstrak dengan lebih berkesan (Al-Nawaiseh, 2025; Gradini et al., 2024; Singh et al., 2025; Wu et al., 2023). Walaupun potensinya besar, para penyelidik turut menegaskan risiko beban kognitif akibat rangsangan visual yang berlebihan serta persoalan keberkesanan jangka panjang dalam konteks pembelajaran formal Al-kfairy et al., 2025; Ecevit et al., 2025).

Seiring dengan perkembangan teknologi, pelbagai platform metaverse muncul untuk menyokong aktiviti pendidikan. Spatial.io sebagai contoh menyediakan ruang maya 3D interaktif yang boleh diakses melalui web, peranti mudah alih, dan headset VR (Elfanda et al., 2025; Hidayati et al., 2024; Susilana et al., 2024). Platform ini telah dimanfaatkan oleh pencipta, pendidik, dan organisasi untuk membina kelas maya, pameran digital, serta sesi kolaboratif berasaskan kreativiti pengguna. Di Malaysia, *Mitoworld* muncul sebagai platform tempatan yang memberi peluang kepada sekolah, institusi pendidikan, dan komuniti untuk menganjurkan acara interaktif, pameran, serta aktiviti pembelajaran dalam dunia maya (Ministry of Science, Technology and Innovation Malaysia [MOSTI], 2024; Sabrina, 2023). Kehadiran platform global dan tempatan ini bukan sahaja menunjukkan penerapan metaverse secara meluas, tetapi juga membuktikan kesediaan ekosistem pendidikan negara untuk meneroka pendekatan digital yang lebih inklusif.

Keberkesanan metaverse dalam pendidikan banyak bergantung kepada reka bentuk pedagogi yang inklusif. Dalam konteks pendidikan khas, integrasi multimodal seperti bahasa isyarat maya, kapsyen automatik, dan avatar berbahasa isyarat terbukti dapat mengurangkan jurang komunikasi (Andriyani et al., 2022; Deb et al., 2018; Gianotti et al., 2024). Malah, reka bentuk pembelajaran berasaskan metaverse yang menggabungkan elemen lifelogging dan mirror worlds berpotensi menyepadukan pengalaman harian pelajar dengan aplikasi matematik, sekali gus meningkatkan motivasi dan relevansi pembelajaran (Al-Nawaiseh, 2025; Arif & Hayati, 2022; Mulati, 2023). Namun, cabaran seperti kos peranti, tahap kesediaan guru, serta kebolehgunaan aplikasi masih perlu ditangani sebelum pelaksanaan metaverse dapat dilakukan secara meluas dan mampan (Nemani, 2025; Wang, 2025; Yeganeh et al., 2025).

3. Metadologi

Kajian ini menggunakan pendekatan ulasan naratif kerana sifatnya sesuai untuk meneliti isu yang kompleks, pelbagai, dan masih dalam fasa perkembangan awal (Sukhera, 2022). Ulasan naratif membolehkan penyelidik mensintesis serta mentafsir secara kritis kajian daripada pelbagai disiplin seperti pendidikan, psikologi, teknologi maklumat, dan sains komputer tanpa terikat sepenuhnya kepada analisis kuantitatif (Snyder, 2019). Pendekatan ini juga

menawarkan fleksibiliti dan kedalaman, sekali gus sesuai untuk topik interdisiplin yang luas dan memerlukan tafsiran bernuansa berbanding kaedah sistematik atau statistik (Sukhera, 2022; Ahmad, 2025). Justeru, kaedah ini dipilih kerana bidang teknologi imersif yang merangkumi AR, VR, MR, dan metaverse masih dalam tahap perkembangan pesat. Fokus utama diberikan kepada sintesis konseptual dan pemahaman kontekstual berbanding penggabungan statistik melalui meta-analisis (Ferrari, 2015; Greenhalgh et al., 2018). Walaupun beberapa statistik asas penerbitan turut dimasukkan untuk memberi gambaran skop dan pertumbuhan literatur, ia hanya berfungsi sebagai latar, bukan sebagai asas analisis.

Bagi menjamin kebolehpercayaan serta ketelusan dapatan, proses carian dan pemilihan artikel telah dilaksanakan secara sistematik berasaskan garis panduan *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA). Proses carian dilaksanakan dalam tempoh 10 tahun, iaitu dari Januari 2015 hingga Ogos 2025, melibatkan pangkalan data utama seperti *Scopus, Web of Science, Semantic Scholar, IEEE Xplore*, dan *Google Scholar*. Liputan pangkalan data ini dipilih kerana keupayaannya menempatkan jurnal berwasit, prosiding persidangan, serta bab buku yang relevan. Untuk mengurangkan bias penerbitan, artikel tambahan turut dikenal pasti melalui pencarian manual terhadap senarai rujukan daripada kajian terdahulu.

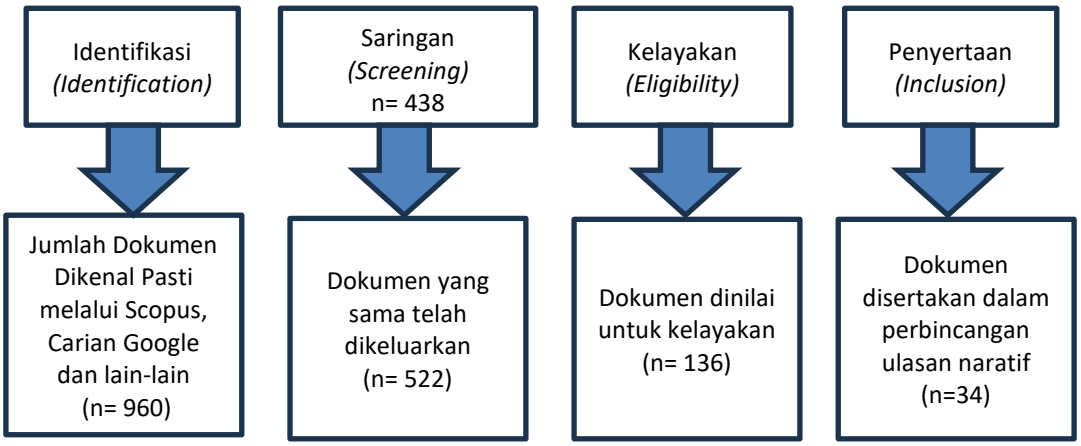
Strategi carian dibangunkan berasaskan tiga elemen utama: teknologi imersif, pendidikan matematik, dan populasi murid ketidakupayaan pendengaran. Istilah berkaitan teknologi imersif termasuk *immersive technology, virtual reality, augmented reality, mixed reality, extended reality,* dan *metaverse*. Untuk pendidikan matematik, kata kunci seperti *mathematics education, mathematics learning, geometry, algebra,* dan *math pedagogy* digunakan. Populasi sasaran pula merangkumi istilah seperti *deaf students, hard of hearing, DHH, hearing impaired, special education,* dan *inclusive education*. Ketiga-tiga elemen ini digabungkan dengan operator AND untuk memastikan hasil carian menepati skop kajian, manakala sinonim dalam setiap elemen dihubungkan dengan operator OR. Rumusan lengkap strategi carian adalah seperti berikut:

("immersive technology" OR "virtual reality" OR "augmented reality" OR "mixed reality" OR "extended reality" OR metaverse) AND ("mathematics education" OR "mathematics learning" OR geometry OR algebra OR "math pedagogy") AND ("deaf students" OR "hard of hearing" OR DHH OR "hearing impaired" OR "special education" OR "inclusive education")

Carian ini memfokuskan kepada kajian berkaitan AR, VR, MR, XR dan metaverse dalam konteks pendidikan matematik murid ketidakupayaan pendengaran di samping mempertimbangkan bidang berkaitan seperti STEM dan pendidikan khas. Proses pemilihan artikel dilaksanakan melalui empat fasa penapisan iaitu: sebanyak 960 artikel dikenal pasti (Identifikasi) , 438 artikel disaring selepas penghapusan pendua (Saringan), 136 artikel dinilai layak (Kelayakan) berdasarkan tahap kesesuaian, dan akhirnya 34 artikel dipilih (Penyertaan) sebagai sumber yang paling relevan serta berkualiti tinggi untuk ulasan ini. Secara keseluruhan, lapan kumpulan carian unik telah dijalankan yang menumpukan pelbagai aspek teknologi imersif dalam pendidikan matematik murid ketidakupayaan pendengaran. Hasilnya ialah sintesis berfokus yang merangkumi 34 artikel utama. Rajah 4 memaparkan carta alir berasaskan PRISMA yang menggambarkan keseluruhan proses pemilihan kajian.

Rajah 4

Carta Alir Berasaskan PRISMA bagi Proses Pemilihan Artikel untuk Ulasan Naratif



4. Dapatan dan Perbincangan

4.1 Definisi dan Konseptualisasi Teknologi Imersif

Teknologi imersif merangkumi Augmented Reality (AR), Virtual Reality (VR), Mixed Reality (MR) dan metaverse yang berfungsi sebagai medium pembelajaran berasaskan visual, interaktif dan kolaboratif (Lampropoulos & Kinshuk, 2024; Wu & Chen, 2023). Dalam pendidikan matematik, teknologi ini membolehkan visualisasi konsep abstrak seperti bentuk geometri, fungsi algebra dan teorem matematik dalam bentuk yang lebih konkrit serta kontekstual. Bagi murid ketidakupayaan pendengaran, keupayaan (*affordances*) seperti simulasi tiga dimensi, manipulasi objek maya dan avatar digital berfungsi sebagai pengganti maklumat auditori, sekali gus memperkukuh pengalaman pembelajaran inklusif (Aboud & Al Ali, 2025; Andriyani et al., 2022).

Perbahasan dalam literatur menunjukkan perbezaan pendekatan. Terdapat penyelidik melihat teknologi imersif sebagai kesinambungan daripada pedagogi tradisional ke arah pengalaman maya sepenuhnya (Wu & Chen, 2023), manakala yang lain menegaskan kepentingannya sebagai pelengkap kepada strategi pengajaran sedia ada agar tidak wujud pergantungan berlebihan (Jain et al., 2025). Kajian terkini turut menekankan dimensi pembelajaran kolaboratif, dengan VR dilihat mampu menyediakan ruang interaksi bersama dalam persekitaran maya yang menyokong kerjasama dan refleksi. Namun, teknologi ini masih berdepan kekangan dari segi kebolehgunaan, tahap realisme, dan kualiti interaksi sosial (Paulsen et al., 2024). Walaupun teknologi imersif diiktiraf mampu meningkatkan motivasi dan penglibatan, pelajar pendidikan tinggi masih cenderung memilih pengajaran bersemuka, khususnya disebabkan isu kos, keselesaan, dan kebolehcapaian (Baxter & Hainey, 2023). Sebaliknya, dalam konteks pendidikan khas, Molloy dan Farrell (2024) menunjukkan bahawa persekitaran imersif yang direka berasaskan UDL berpotensi mengurangkan halangan pembelajaran dan meningkatkan penglibatan afektif, motivasi, serta efikasi kendiri murid keperluan pendidikan khas. Perbezaan dapatan ini bukan sahaja mencerminkan variasi teknikal, tetapi juga menyingkap orientasi falsafah pendidikan yang berbeza tentang peranan teknologi dalam bilik darjah inklusif.

Dari segi teori, teknologi imersif berakar pada konstruktivisme, pembelajaran berasaskan pengalaman serta pembelajaran kolaboratif yang menekankan penglibatan aktif, visualisasi dan interaksi sosial (Mallek et al., 2024; Singh et al., 2025). Pendekatan ini memberi peluang kepada pelajar untuk membina pengetahuan melalui pengalaman langsung, manipulasi objek maya dan kolaborasi digital, sekali gus memperkukuh pemahaman terhadap konsep matematik yang abstrak. Bagi murid ketidakupayaan pendengaran, keupayaan (*affordances*) ini berfungsi sebagai sokongan kompensatori (*compensatory support)* yang bukan sahaja mengukuhkan pemahaman, tetapi juga

mendorong penglibatan setara dalam bilik darjah inklusif. Visualisasi dinamik, animasi tiga dimensi dan interaksi avatar misalnya, dapat membantu membina konsep matematik yang sukar difahami melalui teks atau penjelasan verbal semata-mata (Deb & Bhattacharya, 2018; Samaradivakara et al., 2025).

Kajian empirikal turut membuktikan bahawa AR dan VR mampu meningkatkan motivasi, menambah tumpuan, dan memperkayakan pengalaman pembelajaran yang diperibadikan, di samping berkesan memvisualisasikan konsep matematik dan Sains yang abstrak (Gianotti et al., 2024; Hidayati et al., 2024). Tambahan pula, analisis bibliometrik melaporkan peningkatan signifikan dalam penerbitan berkaitan metaverse dan matematik selepas tahun 2020, yang menandakan asas teori yang semakin kukuh serta pertumbuhan minat global dalam bidang ini (Yazdi, 2025). kesepadanan antara teori pembelajaran moden dan bukti empirikal antarabangsa mengesahkan nilai pedagogi teknologi imersif serta potensinya sebagai medium inklusif untuk mengatasi halangan komunikasi auditori dan memperluas akses kepada konsep matematik yang kompleks.

4.2 Aplikasi dalam Matematik Murid Ketidakupayaan Pendengaran

Walaupun terdapat bukti kukuh tentang keberkesanan teknologi imersif, penyelidikan khusus dalam konteks matematik murid ketidakupayaan pendengaran masih agak terhad. Sebahagian besar kajian memberi tumpuan kepada pembelajaran STEM arus perdana atau pemerolehan bahasa isyarat (Ng, 2025; Samaradivakara et al., 2025). Namun begitu, beberapa kajian menunjukkan potensi yang signifikan apabila teknologi seperti *marker-based AR* dan simulasi visual digunakan untuk mengajar konsep matematik yang abstrak, khususnya yang memerlukan penaakulan spatial (Thom & Hallenbeck, 2022; Wu et al., 2023).

Penyelidikan antarabangsa secara konsisten menegaskan bahawa penaakulan spatial ialah prediktor yang kukuh bagi pencapaian matematik merentas peringkat umur dan latar pendidikan, malah pengaruhnya melebihi kebolehan verbal dan kuantitatif (Young et al., 2018; Thom & Hallenbeck, 2022). Kajian meta-analisis terkini turut menunjukkan bahawa intervensi berasaskan teknologi seperti GeoGebra memberi kesan positif yang signifikan dalam memupuk penaakulan spatial dan seterusnya menyokong pencapaian matematik (Suparman et al., 2024; Yerizon et al., 2021). Nanum, murid ketidakupayaan pendengaran sering tidak mendapat manfaat daripada pedagogi yang secara langsung membangunkan kemahiran ini (Thom & Hallenbeck, 2022). Tambahan pula, dapatan bibliometrik menunjukkan bahawa AR dan VR semakin banyak digunakan dalam topik geometri tiga dimensi seperti prisma, piramid dan sfera. Aplikasi seperti *cleARmaths* misalnya membuktikan keberkesanannya dalam menjadikan konsep abstrak lebih konkrit (Yazdi, 2025). Secara keseluruhan, bukti awal menunjukkan AR dan VR berpotensi menyokong pembelajaran matematik murid ketidakupayaan pendengaran melalui visualisasi yang lebih jelas, walaupun penggunaannya masih jarang ditemui dan memerlukan penyelidikan yang lebih sistematik.

4.3 Metaverse sebagai Ruang Pembelajaran Matematik

Metaverse, hasil integrasi AR, VR dan MR, berkembang sebagai platform transformasi pendidikan yang menyediakan ruang pembelajaran kolaboratif, interaktif, dan berskala besar (Egger et al., 2024; Milgram & Kishino, 1994). Ia dilihat sebagai fasa seterusnya Internet yang menghubungkan dunia fizikal dan maya melalui avatar serta interaksi sosial yang berterusan (Büyüközkan & Mukul, 2024; Ng, 2022). Dalam konteks pendidikan, metaverse bukan sahaja menyediakan simulasi tiga dimensi yang menyerupai bilik darjah sebenar, tetapi juga membolehkan pelajar dan guru membina pengalaman autentik melalui integrasi teknologi XR, kecerdasan buatan, dan rangkaian sosial maya (Elsayed et al., 2023; Guspian et al., 2024; Sghaier et al., 2022).

Platform antarabangsa seperti Spatial.io memudahkan penciptaan ruang maya tiga dimensi yang boleh diakses melalui pelbagai peranti, sekali gus memperkaya pengalaman kolaborasi global (Susilana et al., 2024; Martí-Testón et al., 2023). Di Malaysia, Mitoworld muncul sebagai contoh aplikasi tempatan yang digunakan untuk pameran digital dan acara interaktif, mencerminkan kesediaan ekosistem pendidikan untuk meneroka pembelajaran inklusif melalui metaverse (Sabrina, 2023). Kajian terkini turut melaporkan bahawa metaverse meningkatkan penglibatan pelajar, keterhubungan sosial melalui avatar, serta motivasi dalam pembelajaran, menjadikannya lebih imersif dan berpusatkan pelajar (Elfanda et al., 2025; Fernández-Cerero et al., 2024).

Analisis bibliometrik mengenal pasti dua kluster utama penyelidikan: *Immersive Mathematics Education in the Metaverse*, yang menekankan penggunaan AR/VR dan simulasi interaktif; serta *Reimagining Mathematics Education in the Metaverse*, yang memberi fokus kepada e-pembelajaran dan pembelajaran adaptif yang diperibadikan (Yazdi, 2025). Walau bagaimanapun, walaupun dapatan kajian menunjukkan potensi metaverse dalam meningkatkan pencapaian Matematik dan kemahiran kognitif pelajar berkeperluan khas (Al-Nawaiseh, 2025), aplikasinya khusus untuk murid ketidakupayaan pendengaran masih jarang diterokai.

Metaverse berpotensi sebagai ruang pembelajaran matematik yang inklusif, dengan kekuatan dalam menyediakan pengalaman visual, kolaboratif dan autentik. Namun, ia memerlukan lebih banyak penyelidikan yang berfokus pada keperluan murid ketidakupayaan pendengaran, termasuk integrasi sokongan bahasa isyarat dan kapsyen automatik agar benar-benar selari dengan prinsip pendidikan inklusif global dan dasar seperti DPD 2023.

5. Cabaran dan Jurang Penyelidikan

Walaupun keberkesanan teknologi imersif semakin diakui dalam pendidikan, pelbagai cabaran masih wujud. Pertama, isu akses dan infrastruktur menjadi penghalang utama kerana penggunaan AR dan VR memerlukan peranti berteknologi tinggi yang tidak sentiasa tersedia di sekolah atau program Pendidikan Khas, khususnya di negara membangun (Hidayati et al., 2024). Kedua, risiko beban kognitif muncul apabila paparan visual yang kompleks berpotensi mengalih perhatian murid daripada objektif pembelajaran (Mallek et al., 2024). Ketiga, reka bentuk kajian sedia ada kebanyakannya berskala kecil, menggunakan tempoh intervensi yang singkat, dan tidak konsisten dari segi metodologi, sekali gus mengehadkan kebolehan untuk membuat generalisasi (Deb et al., 2018; Aboud & Al Ali, 2025).

Selain itu, terdapat perbezaan pandangan mengenai peranan teknologi imersif dalam pendidikan matematik murid ketidakupayaan pendengaran. Sesetengah penyelidik menekankan bahawa ia wajar dijadikan alat utama dalam pengajaran, manakala yang lain berpendapat ia hanya berkesan apabila digabungkan dengan pedagogi inklusif sedia ada. Isu lain yang turut menghalang penerapan meluas termasuk kos peranti, tahap kesediaan guru, kebolehgunaan aplikasi, serta jurang digital antara sekolah bandar dan luar bandar (Shrivastava et al., 2023; Tlili et al., 2022). Bagi murid ketidakupayaan pendengaran, ketiadaan ciri kebolehaksesan seperti kapsyen automatik atau avatar bahasa isyarat menambah beban kognitif, selain ketidakselesaan penggunaan *head-mounted display* (Samaradivakara et al., 2025).

Tambahan pula, kajian longitudinal yang menilai kesan jangka panjang teknologi imersif terhadap matematik murid ketidakupayaan pendengaran masih jarang dijalankan. Sebahagian besar penyelidikan tertumpu pada intervensi jangka pendek dengan saiz sampel kecil (Ng, 2025). Dari perspektif global, analisis bibliometrik turut menunjukkan jurang ketara, di mana kebanyakan penyelidikan lebih menekankan STEM arus perdana berbanding matematik dalam pendidikan khas (Yazdi, 2025). Oleh itu, cabaran teknikal, pedagogi, dan digital kekal sebagai penghalang utama yang menuntut penyelidikan yang lebih inklusif, berskala besar, dan berpanjangan.

6. Kesimpulan

Secara keseluruhannya, ulasan naratif ini telah (i) mengkonseptualisasikan teknologi imersif dalam spektrum AR–VR–MR–metaverse, (ii) menilai keberkesanannya terhadap pembelajaran matematik murid ketidakupayaan pendengaran, dan (iii) mengenal pasti jurang serta hala tuju baharu dalam penyelidikan. Dapatan menunjukkan bahawa AR dan VR berkesan memvisualisasikan konsep abstrak dan memperkukuh penaakulan spatial, sekali gus meningkatkan motivasi serta tumpuan murid. Dalam masa yang sama, metaverse menawarkan peluang lebih luas dari segi kolaborasi, kehadiran sosial, dan pengalaman autentik yang berlandaskan prinsip konstruktivis. Walau bagaimanapun, bukti sedia ada masih terbatas kerana dominasi kajian bersampel kecil, intervensi jangka pendek, serta konteks negara maju. Kekangan kebolehcapaian, termasuk risiko beban kognitif, ketiadaan kapsyen adaptif, dan ketiadaan avatar bahasa isyarat, terus membataskan kesan pada tahap yang lebih meluas.

Beberapa batasan perlu dipertimbangkan dalam mentafsir dapatan ulasan ini. Pertama, carian literatur berfokus kepada pangkalan data terpilih dan artikel berbahasa Inggeris dan Melayu, yang berisiko mengecualikan bukti

daripada kajian tempatan atau bahasa lain. Kedua, sifat ulasan naratif sendiri membuka kemungkinan berlakunya bias tafsiran kerana sintesis bergantung pada pemilihan tema dan interpretasi pengkaji. Ketiga, ketiadaan integrasi dengan pendekatan kuantitatif seperti meta-analisis mengehadkan kekuatan generalisasi berasaskan statistik.

Bagi penyelidikan masa hadapan, beberapa agenda wajar diberi perhatian. Pertama, kajian longitudinal perlu dijalankan untuk menilai kesan jangka panjang penggunaan teknologi imersif untuk murid ketidakupayaan pendengaran. Kedua, pembangunan media imersif berasaskan UDL wajar dilaksanakan melalui reka bentuk kolaboratif antara guru dan murid ketidakupayaan pendengaran. Ketiga, ukuran hasil perlu diharmonikan agar dapatan dapat dibandingkan secara lebih konsisten, khususnya dalam aspek penaakulan spatial dan pemahaman konsep matematik. Di samping itu, analisis kos-efektiviti antara AR, VR, dan metaverse, serta kajian empirikal tentang latihan guru dan kesesuaian infrastruktur sekolah, juga wajar diberi perhatian. Melalui langkah ini, asas bukti dapat diperkukuh, jurang kebolehcapaian dapat dirapatkan, dan keberkesanan teknologi imersif dalam pembelajaran matematik murid ketidakupayaan pendengaran dapat ditingkatkan secara lebih sistematik.

Pernyataan

Penghargaan
Penghargaan dan ucapan terima kasih ditujukan kepada Fakulti Pembangunan Manusia, Universiti Pendidikan Sultan Idris (UPSI) atas sokongan moral dalam penghasilan ini.

Konflik Kepentingan
Para pengarang mengisytiharkan tiada sebarang konflik kepentingan dalam penyelidikan dan penerbitan artikel ini.

Kelulusan Etika
Kajian ini dikecualikan daripada keperluan kelulusan etika kerana tidak melibatkan peserta manusia atau pengumpulan data peribadi yang sensitif. Kajian ini menggunakan kaedah ulasan naratif sepenuhnya berdasarkan data sekunder daripada pangkalan data Scopus, Web of Science, Semantic Scholar, IEEE Xplore, dan Google Scholar. Oleh itu, ia mematuhi garis panduan institusi yang mengklasifikasikan kajian seperti ini sebagai berisiko rendah dan tidak tertakluk kepada kelulusan etika formal.

Sumbangan Penulis
Pengarang[1]: Pengkonsepsian, pengurusan artikel, analisis, penulisan – draf asal
Pengarang [2]: Penyeliaan, metodologi, pengesahan
Pengarang [3]:, Visualisasi, semakan dan penyuntingan

Ketersediaan Data (jika ada)
Tiada.

Rujukan

Aboud, Y. Z., & Al Ali, R. (2025). Bridging the Gap: Augmented Reality for Math Education among Saudi Deaf Students. *Decision Making: Applications in Management and Engineering*, 348-363. https://doi.org/10.31181/dmame8120251369

Achten, H. (2021). A concise history of VR/AR in architecture. In *Virtual Aesthetics in Architecture* (pp. 3-9). Routledge. https://doi.org/10.4324/9781003183105-2

Aftab, D. M. J., Farooq, M. A., & Khan, M. A. (2022). *Challenges Faced by Teachers in Teaching Mathematics to Students with Hearing Impairment*. *VFAST Transactions on Education and Social Sciences, 10*(3), 36–46. https://doi.org/10.21015/vtess.v10i3.946

Aguayo, C., & Eames, C. (2023). Using mixed reality (XR) immersive learning to enhance environmental education. *The Journal of Environmental Education*, *54*(1), 58-71. https://doi.org/10.1080/00958964.2022.2152410

Ahmad, S., Umirzakova, S., Mujtaba, G., Amin, M. S., & Whangbo, T. (2023). Education 5.0: requirements, enabling technologies, and future directions. *arXiv preprint arXiv:2307.15846*. https://doi.org/10.48550/arXiv.2307.15846

Al-kfairy, M., Alfandi, O., & Khaddaj, S. (2025). Psychological barriers to metaverse-based education: examining the impact of technophobia and digital fatigue. *Journal of Information, Communication and Ethics in Society*. https://doi.org/10.1108/JICES-04-2025-0080

Al-Nawaiseh, S. (2025). The effectiveness of augmented reality technology (metaverse) on mathematics achievement among students with learning difficulties. *Jordan Journal of Applied Science-Humanities Series*, *42*(1), 7. https://doi.org/10.35192/jjoas-h.v42i1.1017

Andriyani, A., Buliali, J. L., & Pramudya, Y. (2022, July). The effectiveness application of learning model with augmented Reality on deaf student's geometry learning outcomes. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2479, No. 1). AIP Publishing. https://doi.org/10.1063/5.0099940

Arici, F., Yildirim, P., Caliklar, Ş., & Yilmaz, R. M. (2019). Research trends in the use of augmented reality in science education: Content and bibliometric mapping analysis. *Computers & education*, *142*, 103647. https://doi.org/10.1016/j.compedu.2019.103647

Arif, Y. M., & Hayati, H. N. (2022). Learning material selection for metaverse-based mathematics pedagogy media using multi-criteria recommender system. *International Journal of Intelligent Engineering and Systems*, *15*(6), 541-551. https://doi.org/10.22266/ijies2022.1231.48

Atış, D., & Doğaner, E. Ş. (2022). *Uzaktan Eğitim Sürecinde İşitme Engelli Öğrencilere Matematik Öğretimi: Türkiye–Romanya Örneği*. *ODÜSOBİAD, 12*(3), 1845–1866. https://doi.org/10.48146/odusobiad.1100772

Austermann, C., Blanckenburg, F., Blanckenburg, K., & Utesch, T. (2025, June). Exploring the impact of virtual reality on presence: findings from a classroom experiment. In *Frontiers in Education* (Vol. 10, p. 1560626). Frontiers Media SA. https://doi.org/10.3389/feduc.2025.1560626

Ball, M. (2022). *The metaverse: and how it will revolutionize everything*. Liveright Publishing.

Basigi, et al. (2024). *Supporting inference-making in school-aged deaf and hard-of-hearing children*. *Journal of Deaf Studies and Deaf Education, 29*(2), 290–291. https://doi.org/10.1093/deafed/enae004

Baxter, G., & Hainey, T. (2023). Using immersive technologies to enhance the student learning experience. *Interactive Technology and Smart Education, 20*(3), 345–366. https://doi.org/10.1108/ITSE-05-2023-0078

Bazargani, J., Sadeghi-Niaraki, A., & Choi, S. (2025). A Survey and Framework for Education in the Metaverse. *IEEE Access*, 13, 33231-33245. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3543496.

Beck, D., Morgado, L., & O'Shea, P. (2024). Educational Practices and Strategies With Immersive Learning Environments: Mapping of Reviews for Using the Metaverse. *IEEE Transactions on Learning Technologies*, 17, 319-341. https://doi.org/10.1109/TLT.2023.3243946.

Boots, B., Berg, D., Hewitt, E., Naugle, K., & Naugle, K. (2025). Physical Activity and Enjoyment in Active Virtual Reality Games in Youth: Comparative Analysis of Gorilla Tag and Beat Saber. *JMIR Serious Games*, *13*(1), e66593. https://doi.org/10.2196/66593

Britt, A. (2008, August 8). On language: Avatar. *The New York Times Magazine.ball*

Büyüközkan, G., & Mukul, E. (2024). Metaverse-based education: Literature review and a proposed framework. *Interactive Learning Environments, 32*(10), 7468–7496. https://doi.org/10.1080/10494820.2024.2324322

Casimiro, C., Neves, J. C., & Sousa, C. (2023, October). Mathematics and sign language learning with a tangible game: An inclusive approach for DHH and hearing children. In *Proceedings of the 17th European Conference on Games Based Learning, ECGBL 2023* (pp. 621-631). Dechema eV. https://doi.org/10.34190/ecgbl.17.1.1411

Creed, C., Al-Kalbani, M., Theil, A., Sarcar, S., & Williams, I. (2024). Inclusive AR/VR: accessibility barriers for immersive technologies. *Universal Access in the Information Society*, *23*(1), 59-73. https://doi.org/10.1007/s10209-023-00969-0

Darmawan, C., Ervandi, A. J., Hatip, A., & Tobing, V. M. T. L. (2025). The Effect of Using Minecraft: Education Edition on Students' Conceptual Understanding and Collaboration. *Jurnal Ilmu Pendidikan (JIP) STKIP Kusuma Negara*, *17*(1), 186-196. https://doi.org/10.37640/jip.v17i1.2374

De Felice, F., Petrillo, A., Iovine, G., Salzano, C., & Baffo, I. (2023). How does the metaverse shape education? A systematic literature review. *Applied Sciences*, *13*(9), 5682. https://doi.org/10.3390/app13095682

Dwivedi, Y. K., Hughes, L., Baabdullah, A. M., Ribeiro-Navarrete, S., Giannakis, M., Al-Debei, M. M., ... & Wamba, S. F. (2022). Metaverse beyond the hype: Multidisciplinary perspectives on emerging challenges, opportunities, and agenda for research, practice and policy. *International journal of information management*, *66*, 102542. https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2022.102542

Deb, S., Surakshaa & Bhattacharya, P. (2018). Augmented Sign Language Modeling (ASLM) with interaction design on smartphone-an assistive learning and communication tool for inclusive classroom. *Procedia Computer Science*, *125*, 492-500. https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.12.064

Egger, J., Gsaxner, C., Kleesiek, J., & Puladi, B. (2024). What is diminished Virtuality? A directional and layer-based taxonomy for the reality-virtuality Continuum. *JMIR XR and Spatial Computing (JMXR)*, *1*(1), e52904. https://doi.org/10.2196/52904

Elena-Bucea, A., Cruz-Jesus, F., Oliveira, T., & Coelho, P. S. (2021). Assessing the role of age, education, gender and income on the digital divide: Evidence for the European Union. *Information Systems Frontiers*, *23*(4), 1007-1021. https://doi.org/10.1007/s10796-020-10012-9

Elfanda, B. P., Wahyudi, A., Fitriana, E., & Lestari, S. T. (2025). Penerapan Media Pembelajaran Geografi Pada Materi Hidrosfer Berbasis Spatial. io untuk Meningkatkan Kemampuan Berpikir Kritis Siswa Kelas X-1 di SMAN 1 Lawang. *Cetta: Jurnal Ilmu Pendidikan*, *8*(4), 257-269. https://doi.org/10.37329/cetta.v8i4.4533

Elsayed, M., & Abdo, S. (2023). Applications of Artificial Intelligence and Their Relationship to Spatial Thinking and Academic Emotions Towards Mathematics: Perspectives from Educational Supervisors. *Eurasian Journal of Educational Research (EJER)*, (107). https://doi.org/10.14689/ejer.2023.107.019

Fernandes, N., & Casteleiro-Pitrez, J. (2023). Augmented reality in Portuguese museums: A grounded theory study on the museum professionals' perspectives. *Multimodal Technologies and Interaction*, *7*(9), 87. https://doi.org/10.3390/mti7090087

Ferrari, R. Writing narrative style literature reviews. Med. Writ. 2015, 24, 230–235. https://doi.org/10.1179/2047480615Z.000000000329

Gencer, G., Şensoy, N., & Gencer, K. (2025). Problem-based Learning in the Metaverse Environment: Evaluation of Virtual Reality Applications in Medical Education. *Journal of Learning and Teaching in Digital Age*, *10*(2), 109-121. https://doi.org/10.53850/joltida.1521626

Gianotti, M., Marini, M. C., Beccaluva, E. A., Marulli, M. M., De Meis, I., Tomaiuoli, D., & Garzotto, F. (2024, May). Multisensory Training Intervention for Hearing Impaired Children: Preliminary Results of a Pilot Study. In *Extended Abstracts of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 1-7). https://doi.org/10.1145/3613905.3650734

Gradini, E., Umar, A., Firmansyah, F., Effendi, Y., & Winardi, W. (2024). Fostering Higher Order Thinking Skills in Mathematics Learning: A Scoping Review of Teacher Development Initiatives. *Unram Journal of Community Service*, *5*(1), 9-14. https://doi.org/10.29303/ujcs.v5i1.570

Greenhalgh, T.; Thorne, S.; Malterud, K. Time to challenge the spurious hierarchy of systematic over narrative reviews? Eur. J. Clin. Investig. 2018, 48, e12931. https://doi.org/10.1111/eci.12931

Guspian, I., Noviyanti, I., & Aryansyah, A. F. (2024). Analisis Perkembangan Teknologi dan Tren Terkini Pada Platform Metaverse dalam Pendidikan: Perspektif Manajerial. *Jurnal Riset Dan Inovasi Pembelajaran*, *4*(3), 1697-1714. https://doi.org/10.51574/jrip.v4i3.2059

Haratua, C. S., Lestari, A., Abdul, R. C., Haryanti, W. D., Suratno, S., & Ardiansyah, T. (2025). Peran matematika dan ilmu pengetahuan alam dalam menghadapi tantangan SDM di society 5.0. *JIIP-Jurnal Ilmiah Ilmu Pendidikan*, *8*(1), 218-224. https://doi.org/10.54371/jiip.v8i1.6635

Hidayati, A., Pratama, A., Maulana, A., Primanda, D., & Hariyanto, N. (2024). Optimization Of Metaverse Technology For Immersive Learning Using The Spatial. Io Platform. In *Proceeding Al Ghazali International Conference* (Vol. 2, pp. 547-554). https://doi.org/10.52802/aicp.v1i1.1366

Hollerer, T., & Schmalstieg, D. (2016). Introduction to augmented reality. *Augmented Reality: Principles and Practice*. https://doi.org/10.1109/ISMAR-Adjunct.2016.0015

Jain, P., Kaur, K., & Porcu, L. (2025). Augmented Reality and Its Applications in the Virtual World: A Bibliometric Analysis Framework of Two Decades (2003–2023). https://doi.org/10.1108/978-1-83708-724-220251003

Krasavina, Y. V., Ponomarenko, E. P., Shishkina, A. A., & Gareev, A. A. (2023). Learning experiences of deaf and hard-of-hearing students in digital media: a literature review. *Перспективы науки и образования*, (6 (66)), 317-331.

Kementerian Pendidikan Malaysia, (2023) *Dasar Pendidikan Digital.* Documentation. Kementerian Pendidikan Malaysia.

Kritzer, K. L. (2009). *Barely started and already left behind: A descriptive analysis of the mathematics ability demonstrated by young deaf children*. *Journal of Deaf Studies and Deaf Education, 14*(4), 409–421. https://doi.org/10.1093/deafed/enp015

Lampropoulos, G., & Kinshuk. (2024). Virtual reality and gamification in education: a systematic review. *Educational technology research and development*, *72*(3), 1691-1785.https://doi.org/10.1007/s11423-024-10351-3. https://doi.org/10.1007/s11423-024-10351-3

Lucia, B., Vetter, M. A., & Adubofour, I. K. (2025). Behold the metaverse: Facebook's Meta imaginary and the circulation of elite discourse. *new media & society*, *27*(2), 790-807. https://doi.org/10.1177/14614448231184249

Maas, M. J., & Hughes, J. M. (2020). Virtual, augmented and mixed reality in K–12 education: A review of the literature. *Technology, Pedagogy and Education*, *29*(2), 231-249. https://doi.org/10.1080/1475939X.2020.1737210

Mallek, F., Mazhar, T., Shah, S., Ghadi, Y., & Hamam, H. (2024). A review on cultivating effective learning: synthesizing educational theories and virtual reality for enhanced educational experiences. PeerJ Computer Science, 10. https://doi.org/10.7717/peerj-cs.2000

Marougkas, A., Troussas, C., Krouska, A., and Sgouropoulou, C. (2023). Virtual reality in education: a review of learning theories approaches and methodologies for the last decade. Electronics. 12, 32832. https://doi.org/10.3390/electronics12132832

Mikropoulos, T. A. (2006). Presence: a unique characteristic in educational virtual environments. Virtual Real. 10, 197–206. https://doi.org/10.1007/s10055-006-0039-1

Milgram, P., & Kishino, F. (1994). Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays. IEICE Transactions on Information and Systems, E77, 1321-1329. https://doi.org/10.1.1.102.4646

Milgram, P., Takemura, H., Utsumi, A., & Kishino, F. (1995, December). Augmented reality: A class of displays on the reality-virtuality continuum. In *Telemanipulator and telepresence technologies* (Vol. 2351, pp. 282-292). Spie. https://doi.org/10.1117/12.197321

Ministry of Science, Technology and Innovation Malaysia [MOSTI]. 2024. *Mitoworld*. MySTI. https://mysti.gov.my/product/mitoworld-3

Mishra, A., Walker, K., Oshiro, B., Langdon, C., & Coppola, M. (2022). *Mathematics anxiety in deaf, hard of hearing, and hearing college students*. *Annals of the New York Academy of Sciences, 1513*(1), 89–107. https://doi.org/10.1111/nyas.14854

Mohd Salleh, M. I., Ibrahim, Z., Othman, K. I., Yusoff, H., & Ariffin, S. (2020). Educator acceptance of Education 5.0@ UiTM framework and initiatives: a descriptive analysis/Mohd Idzwan Mohd Salleh...[et al.]. *International Journal of e-Learning and Higher Education (IJELHE)*, *12*(1), 99-108. https://ir.uitm.edu.my/id/eprint/65919

Molloy, C., & Farrell, R. (2024). Cultivating positive classroom environments: Exploring the efficacy of immersive technologies in removing barriers to learning among primary school students. *Computers in the Schools*, *41*(2), 164-192. https://doi.org/10.1080/07380569.2024.2325441

Mulati, Y. (2023). Analisis penggunaan teknologi Metaverse terhadap pembentukan memori pada proses belajar. *Ideguru: Jurnal Karya Ilmiah Guru*, *8*(2), 120-128. https://doi.org/10.51169/ideguru.v8i2.480

Muruganantham, G., & Kumar, B. D. (2024). Augmented Reality: Shaping the Metaverse. In *The Metaverse Dilemma: Challenges and Opportunities for Business and Society* (pp. 33-52). Emerald Publishing Limited. https://doi.org/10.1108/978-1-83797-524-220241003

Nemani, S. (2025). Barriers and Enablers to Adopting Virtual Reality in Lower Secondary STEAM Curricula. *Journal of Advanced Research in Education*, *4*(2), 1-14. https://doi.org/10.56397/JARE.2025.03.01

Nunes, T., & Moreno, C. (2002). *An intervention program for promoting deaf pupils' achievement in mathematics*. *Journal of Deaf Studies and Deaf Education, 7*(2), 120–133. https://doi.org/10.1093/deafed/7.2.120

Pagliaro, C. M. (2015). *Instructional strategies for elementary-age deaf students: An evidence-based review*. *Deafness & Education International, 17*(1), 5–24. https://doi.org/10.1179/1557069X14Y.0000000042

Pamungkas, M. D., Rahmawati, F., Chasanah, A. N., Hendrastuti, Z. R., Franita, Y., & Wicaksono, A. B. (2023). *Identification of Mathematics Learning Media Needs for Junior High School Students with Hearing Impairment*. *Al-Ishlah: Jurnal Pendidikan, 15*(2), 2076–2083. https://doi.org/10.35445/alishlah.v15i2.2865

Paulsen, L., Dau, S., & Davidsen, J. (2024). Designing for collaborative learning in immersive virtual reality: A systematic literature review. *Virtual Reality, 28*(1), 63–83. https://doi.org/10.1007/s10055-024-00975-4

Perinpasingam, P. T. S., Naidu, C. S., & Fadzil, F. A. M. Exploring Future Preservice Teachers' Experience in Virtual Reality Role-Playing Micro-Teaching Activities using the EngageVR Platform. *Innovating Education For A Better Tomorrow*, 365. https://fslmjournals.taylors.edu.my/wp-content/uploads/SEARCH/SEARCH-2023-15-2/SEARCH-2023-P4-15-2.pdf

Poplin, A., Sharma, N., Siddharth, K., & Garau, C. (2025, June). Emotions Geogame: Developing a Game for Mapping Emotions and Evaluating Places. In *International Conference on Computational Science and Its Applications* (pp. 249-259). Cham: Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-97606-3_17

Puspita, W., Syawahid, M., & Sucipto, L. (2024). Berpikir Fungsional dalam Menyelesaikan Permasalahan Matematika Materi Pola Bilangan. *Jurnal Pemikiran dan Penelitian Pendidikan Matematika (JP3M)*, *7*(1), 72-83. https://doi.org/10.36765/jp3m.v7i1.731

Rahim, R. H. A., Mohd Nizam, D. N., Mohd Naim, N. F., & Baharum, A. (2024). Immersive learning constructs for deaf and hard-of-hearing students in TVET practical skill. In *2024 International Visualization, Informatics and Technology Conference (IVIT)* (pp. 192–199). IEEE. https://doi.org/10.1109/ivit62102.2024.10692890

Raza, A. (2023). Our Changing Reality: The Metaverse and the Importance of Privacy Regulations in the United States. *Global Bus. L. Rev.*, *12*, 30. https://engagedscholarship.csuohio.edu/gblr/vol12/iss1/6

Sabrina, S. (2023, 15 Mac). *This M'sian startup launched a no-code platform for businesses to start their own metaverses*. Vulcan Post. Retrieved 31 Ogos 2025, from https://vulcanpost.com/819891/mitoworld-metaverse-platform-virtual-tech-frontier-malaysia/

Samaradivakara, Y., Pathirage, A., Ushan, T., Sasikumar, P., Karunanayaka, K., Keppitiyagama, C., & Nanayakkara, S. (2025). Tailored Real-time AR Captioning Interface for Enhancing Learning Experience of Deaf and Hard-of-Hearing (DHH) Students. *arXiv preprint arXiv:2501.02233*. https://doi.org/10.48550/arXiv.2501.02233

Schindler, M., Doderer, J. H., Simon, A. L., Schaffernicht, E., Lilienthal, A. J., & Schäfer, K. (2022). Small number enumeration processes of deaf or hard-of-hearing students: A study using eye tracking and artificial intelligence. *Frontiers in Psychology*, *13*, 909775. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.909775

Sghaier, S., Elfakki, A. O., & Alotaibi, A. A. (2022). Development of an intelligent system based on metaverse learning for students with disabilities. *Frontiers in Robotics and AI*, *9*, 1006921. https://doi.org/10.3389/frobt.2022.1006921

Shackelford, S., Mattioli, M., Prince, J., & Marinotti, J. (2025). *The Metaverse: What Everyone Needs to Know®*. Oxford University Press. https://doi.org/10.1093/wentk/9780197759431.001.0001

Shahidi Hamedani, S., Aslam, S., Mundher Oraibi, B. A., Wah, Y. B., & Shahidi Hamedani, S. (2024). Transitioning towards tomorrow's workforce: Education 5.0 in the landscape of society 5.0: A systematic literature review. *Education Sciences*, *14*(10), 1041. https://doi.org/10.3390/educsci14101041

Shrivastava, D. V., Singh, S., Dadheech, V., & Yadav, U. (2023). Scopic Review of Existing Immersive Technology Solutions for Sign Languages in a Single Clustered Dataset for Sign Language Interpretation and Assistive/Accessible Teaching technologies for Education of the deaf and mute. *Accessible Teaching technologies for Education of the deaf and mute (October 14, 2023)*. https://doi.org/10.2139/ssrn.4602374

Siddiqi, M. M. (2024). Future of digital education: inclusive, immersive, equitable. *MediaSpace: DME Media Journal of Communication*, *5*(01), 8-24. https://doi.org/10.53361/dmejc.v5i01.02

Singh, M., & Sun, D. (2025). Evaluating Minecraft as a game-based metaverse platform: exploring gaming experience, social presence, and STEM outcomes. *Interactive Learning Environments*, 1-23. https://doi.org/10.1080/10494820.2025.2459200

Singh, M., Sun, D., & Yang, Y. (2025). Design and Implementation of Math City: An Inquiry-based Metaverse Platform for Mathematics Education. *Computers and Education: Artificial Intelligence*, 100462. https://doi.org/10.1080/10494820.2025.2459200

Snyder, H. (2019). Literature review as a methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research, 104*, 333–339. https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039

Stephenson, N. (2003) Snow crash: a novel. Spectra

Sukhera, J. (2022). Narrative reviews: Flexible, rigorous, and practical. *Perspectives on Medical Education, 11*(5), 263–264. https://doi.org/10.1007/s40037-022-00732-0

Suparman, Marasabessy, R., & Helsa, Y. (2024). Fostering spatial visualization in GeoGebra-assisted geometry lesson: A systematic review and meta-analysis. *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education, 20*(9), em2509. https://doi.org/10.29333/ejmste/15170

Susilana, R., Dewi, L., & Rullyana, G. (2024). Exploring Student Perceptions of Virtual Learning Experiences: A Study of the Use of the Spatial. io 3D Metaverse Platform. *Journal of Education Technology*, *8*(4), 673-683. https://doi.org/10.23887/jet.v8i4.85190

Tlili, A., Huang, R., Shehata, B., Liu, D., Zhao, J., Metwally, A. H. S., ... & Burgos, D. (2022). Is Metaverse in education a blessing or a curse: a combined content and bibliometric analysis. *Smart Learning Environments*, *9*(1), 1-31. https://doi.org/10.1186/s40561-022-00205-x

Thom, J. S., & Hallenbeck, T. (2021). Beyond words/signs: DHH learners' spatial reasoning in mathematics as embodied cognition. *American Annals of the Deaf*, *166*(3), 378-408. https://doi.org/10.1353/aad.2021.0026

Thom, J. S., & Hallenbeck, T. (2022). Spatial reasoning in mathematics: A cross-field perspective on deaf and general education research. *Deafness & Education International*, *24*(2), 127-159. https://doi.org/10.1080/14643154.2020.1857539

Wang, J. (2025). Promoting the application of metaverse technology in practical teaching for university: an identification and evaluation of barriers. *International Journal of Human–Computer Interaction*, *41*(16), 9959-9977. https://doi.org/10.23887/jet.v8i4.85190

Wei, G. W., Leng, G. P., & Naidu, C. S. Creating a Virtual Learning Environment (VLE) Using the Engage VR Platform to Create an Immersive Virtual Presence. *Innovating Education For A Better Tomorrow*, 646.

Wu, X., Chen, Y., & Wu, Y. (2023). *Exploration of mathematics education by metaverse technology*. IEEE 12th International Conference on Educational and Information Technology, 171–177. https://doi.org/10.1109/ICEIT57125.2023.10107894

Yazdi, M. (2025). *Exploring the intersection of metaverse and mathematics: A visual analysis of bibliometric networks*. Journal of Digital Learning and Education, 5(2), 112–128. https://doi.org/10.xxxx/jdle.2025.xxxxx

Yeganeh, L. N., Fenty, N. S., Chen, Y., Simpson, A., & Hatami, M. (2025). The future of education: A multi-layered metaverse classroom model for immersive and inclusive learning. *Future Internet*, *17*(2), 63. https://doi.org/10.3390/fi17020063

Yerizon , Fitrani Dwina , Nor'ain Mohd. Tajudin (2021). Improving Students' Spatial Ability with GeoGebra Software. Universal Journal of Educational Research, 9(1), 129 - 135. https://doi.org/10.13189/ujer.2021.090114

Young, C. J., Levine, S. C., & Mix, K. S. (2018). The connection between spatial and mathematical ability across development. *Frontiers in Psychology, 9,* Article 755. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.00755

Yu, T., Yang, Z., Zhang, M., Yao, L., & Sun, X. (2025). The application of the metaverse in surgical clinical teaching: transforming medical education through immersive approaches. *Frontiers in Oncology*, *15*, 1626680. https://doi.org/10.3389/fonc.2025.1626680

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of RISE and/or the editor(s). RISE and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.