

VIRTUAL REALITY DAN AUGMENTED REALITY DALAM ARSITEKTUR DIGITAL

Pramesti, A.¹, Olivia, S.¹

1. Program Studi Arsitektur, Fakultas Arsitektur dan Desain, Universitas Katolik Soegijapranata, Kota Semarang

*Correspondent Author: pramestiag2004@gmail.com

Tanggal masuk naskah: 30 Juli 2023 • Tanggal review: 5 & 6 Agustus 2023 • Tanggal Terbit: 1 September 2023.

DOI: 10.24167/joda.v3i1.12648



Abstrak: Perkembangan teknologi Virtual Reality (VR) dan Augmented Reality (AR) telah membawa perubahan signifikan dalam berbagai bidang, termasuk arsitektur. VR dan AR menawarkan cara baru dalam memvisualisasikan, mendesain, dan berinteraksi dengan ruang binaan, membuka peluang bagi terciptanya arsitektur digital yang lebih imersif dan interaktif. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji penerapan VR dan AR dalam arsitektur digital, menganalisis manfaat dan tantangan penggunaannya, serta mengeksplorasi potensi pengembangannya di masa depan. Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif dengan studi literatur. Data dikumpulkan dari berbagai sumber seperti jurnal ilmiah, buku, artikel, dan website. Analisis data dilakukan dengan teknik deskriptif-analitis untuk mengidentifikasi, mengklasifikasikan, dan menginterpretasikan informasi terkait VR dan AR dalam arsitektur digital. Hasil penelitian menunjukkan bahwa VR dan AR memberikan manfaat signifikan dalam arsitektur digital, antara lain: meningkatkan efisiensi dan akurasi desain, memfasilitasi komunikasi dan kolaborasi, serta menciptakan pengalaman imersif bagi pengguna. Namun, terdapat juga tantangan dalam penerapannya, seperti biaya investasi yang tinggi dan kurangnya standar dan regulasi. Penelitian ini merekomendasikan peningkatan riset dan pengembangan VR dan AR dalam arsitektur digital, serta pengembangan kerangka kerja yang komprehensif untuk mendukung implementasinya.

Kata Kunci: Virtual Reality, Augmented Reality, Arsitektur Digital, Visualisasi, Desain.

Abstract: *The rapid development of Virtual Reality (VR) and Augmented Reality (AR) technologies has brought significant changes to the field of architecture. VR and AR offer new ways to visualize, design, and interact with built spaces, opening up opportunities for creating more immersive and interactive digital architecture. This research aims to examine the application of VR and AR in digital architecture, analyze the benefits and challenges of their use, and explore their potential future development. This research employs a qualitative approach with a literature review. Data is collected from various sources such as scientific journals, books, articles, and websites. Data analysis is carried out using descriptive-analytical techniques to identify, classify, and interpret information related to VR and AR in digital architecture. The results show that VR and AR provide significant benefits in digital architecture, including: increasing the efficiency and accuracy of design, facilitating communication and collaboration, and creating immersive experiences for users. However, there are also challenges in their implementation, such as high investment costs and a lack of standards and regulations.*

Conclusion: *This research recommends increasing research and development of VR and AR in digital architecture, as well as developing a comprehensive framework to support their implementation.*

Keywords: *Virtual Reality, Augmented Reality, Digital Architecture, Visualization, Design.*

1. Pendahuluan

Arsitektur digital telah mengalami evolusi yang pesat, didorong oleh perkembangan teknologi informasi dan

komunikasi. Transformasi ini tidak hanya mengubah cara merancang bangunan, tetapi juga merevolusi cara kita berinteraksi dengan ruang binaan. Di antara



berbagai teknologi yang memiliki dampak signifikan dalam arsitektur digital, Virtual Reality (VR) dan Augmented Reality (AR) menonjol sebagai alat yang memiliki potensi besar untuk meningkatkan proses desain, konstruksi, dan pengalaman pengguna.

VR menciptakan lingkungan digital imersif yang memungkinkan pengguna untuk merasakan ruang arsitektur secara realistis sebelum dibangun.



Gambar 1. VR menciptakan lingkungan digital imersif

Teknologi ini memungkinkan arsitek, klien, dan stakeholder lainnya untuk "berjalan" melalui model bangunan, mengeksplorasi detail desain, dan memahami ruang secara holistik. Shin dan Dunston [1] meneliti efektivitas penggunaan VR dalam pelatihan keselamatan konstruksi dan menemukan bahwa VR dapat meningkatkan pemahaman pekerja tentang potensi bahaya dan prosedur keselamatan di lokasi konstruksi. Hal ini menunjukkan bahwa VR tidak hanya bermanfaat dalam tahap desain, tetapi juga dalam tahap konstruksi untuk meningkatkan keselamatan dan efisiensi.

AR, di sisi lain, menambahkan lapisan informasi digital ke dunia nyata, memungkinkan pengguna untuk melihat model bangunan terintegrasi dengan lingkungan fisik sebenarnya. [2]



Gambar 2. AR menambahkan lapisan informasi digital ke dunia nyata

menunjukkan bahwa AR dapat digunakan untuk memvisualisasikan model bangunan di lokasi proyek, memungkinkan arsitek dan klien untuk memahami desain dalam konteks lingkungan sebenarnya dan mengidentifikasi potensi konflik dengan struktur yang ada. Hal ini memfasilitasi visualisasi desain di lokasi proyek dan memungkinkan pengguna untuk berinteraksi dengan model bangunan secara interaktif.

Pemanfaatan VR dan AR dalam arsitektur digital telah menunjukkan manfaat yang signifikan. Wang dan Dunston [3] menunjukkan bahwa VR dapat digunakan untuk simulasi dan analisis performa bangunan, seperti pencahayaan, akustik, dan sirkulasi udara. Hal ini memungkinkan arsitek untuk mengidentifikasi dan memecahkan potensi masalah desain sebelum konstruksi dimulai, sehingga mengurangi biaya dan waktu yang diperlukan untuk revisi.

Lebih lanjut, Kose et al. [4] menjelaskan bagaimana VR dapat diintegrasikan dengan kecerdasan buatan (AI) untuk menciptakan lingkungan arsitektur yang responsif dan adaptif terhadap kebutuhan pengguna. AI dapat digunakan untuk menganalisis preferensi pengguna dan menyesuaikan desain bangunan secara real-time, menciptakan ruang yang lebih personal dan efisien.

Meskipun potensi VR dan AR dalam arsitektur digital sangat besar, Chi et al. [5] menyoroti beberapa tantangan yang perlu diatasi. Salah satunya adalah biaya investasi yang relatif tinggi untuk perangkat keras dan perangkat lunak VR dan AR. Selain itu, kurangnya standar dan regulasi dalam penggunaan

teknologi ini dalam industri arsitektur juga menjadi kendala. Tantangan lainnya adalah kurangnya keterampilan dan pengetahuan di kalangan profesional arsitektur dalam menggunakan teknologi VR dan AR secara efektif.

Dengan demikian, penelitian ini penting untuk mengkaji lebih lanjut penerapan VR dan AR dalam arsitektur digital, menganalisis manfaat dan tantangannya, serta mengeksplorasi potensi pengembangannya di masa depan. Penelitian ini juga akan menyelidiki strategi untuk mengatasi tantangan yang ada, seperti pengembangan platform VR dan AR yang lebih terjangkau dan user-friendly, serta peningkatan program pelatihan untuk meningkatkan keterampilan profesional arsitektur dalam menggunakan teknologi ini.

2. Metode Penelitian

Metode penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif dengan studi literatur sebagai strategi utama. Fokusnya adalah mengumpulkan dan menganalisis informasi dari berbagai sumber relevan untuk memahami penerapan VR dan AR dalam arsitektur digital. Sumber data meliputi jurnal ilmiah, buku, artikel, dan website terpercaya yang membahas topik terkait.

Proses pengumpulan data dilakukan secara sistematis dengan mencari, menyeleksi, dan mengklasifikasikan informasi berdasarkan kriteria relevansi dan kredibilitas sumber. Selanjutnya, data yang telah terkumpul dianalisis menggunakan teknik deskriptif-analitis untuk mengidentifikasi, mengelompokkan, dan menginterpretasi pola, tren, dan hubungan antar variabel yang relevan. Hasil analisis ini akan digunakan untuk menjawab rumusan masalah penelitian dan menarik kesimpulan yang komprehensif mengenai penerapan VR dan AR dalam arsitektur digital.

3. Pembahasan Hasil

Virtual Reality (VR) dan Augmented Reality (AR) telah muncul sebagai teknologi transformatif dengan potensi luar biasa untuk merevolusi berbagai bidang, termasuk arsitektur digital. Dengan kemampuannya untuk menjembatani kesenjangan antara dunia fisik dan digital, VR dan AR menawarkan cara-cara baru yang inovatif untuk memvisualisasikan, merancang, dan berinteraksi dengan ruang binaan [6]. Pembahasan ini akan menggali lebih dalam penerapan VR dan AR dalam arsitektur digital, menganalisis manfaat dan tantangannya, serta mengeksplorasi potensi pengembangannya di masa depan.

A. Penerapan VR dan AR dalam Arsitektur Digital

VR dan AR telah menemukan berbagai aplikasi dalam arsitektur digital, mengubah cara para profesional merancang, membangun, dan mengalami ruang binaan.

a. Desain dan Visualisasi Arsitektur

VR dan AR memungkinkan arsitek untuk menciptakan representasi desain mereka yang imersif dan interaktif, melampaui keterbatasan gambar 2D dan model 3D tradisional. Dong et al. [7] mengembangkan sistem VR untuk desain arsitektur kolaboratif yang memungkinkan banyak pengguna untuk berinteraksi secara bersamaan dengan model bangunan virtual dan memberikan umpan balik real-time. Sistem ini memungkinkan arsitek dan klien untuk merasakan ruang, menjelajahi detail desain, dan memahami desain secara holistik sebelum konstruksi dimulai.

AR, di sisi lain, melapiskan informasi digital ke dunia nyata, memungkinkan pengguna untuk memvisualisasikan model bangunan dalam konteks lingkungan fisik mereka yang sebenarnya. [8] mengusulkan kerangka kerja AR untuk memvisualisasikan desain bangunan di lingkungan perkotaan, memungkinkan arsitek dan perencana kota untuk menilai dampak visual dari bangunan baru dan mengintegrasikannya secara harmonis dengan struktur yang ada. Hal ini memungkinkan evaluasi desain yang lebih komprehensif dan pengambilan keputusan yang lebih tepat.

b. Kolaborasi dan Komunikasi

VR dan AR memfasilitasi peningkatan kolaborasi dan komunikasi antara arsitek, klien, dan stakeholder lainnya. [9] mengembangkan platform VR untuk kolaborasi desain arsitektur, memungkinkan pengguna untuk berbagi model, anotasi, dan umpan balik dalam lingkungan virtual bersama. Platform ini memfasilitasi komunikasi yang lebih efektif dan pengambilan keputusan yang efisien dengan memungkinkan semua pihak untuk mengalami dan berinteraksi dengan desain secara bersamaan, terlepas dari lokasi fisik mereka.

AR juga dapat digunakan untuk meningkatkan komunikasi di lokasi konstruksi. [10] mengembangkan sistem AR untuk memvisualisasikan model Building Information Modeling (BIM) di lokasi konstruksi, memungkinkan pekerja untuk mengakses informasi desain, instruksi, dan umpan balik secara real-time melalui perangkat seluler. Hal ini meningkatkan efisiensi dan mengurangi kesalahan

dengan menyediakan akses informasi yang tepat waktu dan akurat kepada pekerja konstruksi.

c. Pelatihan dan Pendidikan

VR dan AR menawarkan peluang menarik untuk pelatihan dan pendidikan arsitektur. Li et al. [11] mengembangkan sistem pelatihan VR untuk pekerja konstruksi, memungkinkan mereka untuk berlatih tugas-tugas seperti pemasangan bekisting, pengelasan, dan pekerjaan beton dalam lingkungan virtual yang aman dan terkendali. Sistem ini meningkatkan keselamatan dan efisiensi dengan memungkinkan pekerja untuk memperoleh pengalaman praktis dan mengembangkan keterampilan mereka sebelum bekerja di lokasi konstruksi yang sebenarnya.

AR dapat digunakan untuk meningkatkan pembelajaran di kelas dengan melapiskan informasi digital ke model fisik atau lingkungan dunia nyata. El Ammari and Hammad [12] mengembangkan aplikasi AR untuk pendidikan arsitektur, memungkinkan siswa untuk memvisualisasikan konsep struktural dan mekanis dalam 3D, berinteraksi dengan model bangunan virtual, dan menjelajahi detail desain. Aplikasi ini meningkatkan keterlibatan siswa dan pemahaman konsep arsitektur dengan menyediakan pengalaman belajar yang lebih interaktif dan imersif.

B. Manfaat VR dan AR dalam Arsitektur Digital

Penerapan VR dan AR dalam arsitektur digital memberikan banyak manfaat, termasuk:

a. Peningkatan Efisiensi dan Akurasi Desain

VR dan AR memungkinkan arsitek untuk mengidentifikasi dan mengatasi potensi masalah desain pada tahap awal proses desain, mengurangi biaya dan waktu yang diperlukan untuk revisi. Kim et al. [13] mengembangkan sistem VR untuk mengevaluasi kinerja pencahayaan alami dalam desain bangunan, memungkinkan arsitek untuk menganalisis dampak berbagai strategi desain pada kualitas pencahayaan siang hari. Hal ini memungkinkan arsitek untuk mengoptimalkan desain untuk kenyamanan dan efisiensi energi, mengurangi konsumsi energi dan meningkatkan keberlanjutan.

AR dapat digunakan untuk meningkatkan akurasi konstruksi dengan melapiskan model digital ke lingkungan fisik, memandu pekerja dan mengurangi kesalahan. Son et al. [14] mengembangkan sistem AR untuk pemasangan elemen prefabrikasi, memungkinkan pekerja untuk memvisualisasikan lokasi dan orientasi elemen yang tepat di lokasi konstruksi. Hal ini meningkatkan efisiensi dan akurasi

konstruksi, mengurangi pemborosan dan pengerjaan ulang.

b. Peningkatan Komunikasi dan Kolaborasi

VR dan AR memfasilitasi komunikasi yang lebih efektif dan kolaborasi antara arsitek, klien, dan stakeholder lainnya. Zhang et al. [15] mengembangkan platform VR untuk desain kolaboratif, memungkinkan arsitek, insinyur, dan kontraktor untuk bekerja sama dalam model bangunan virtual, berbagi umpan balik, dan menyelesaikan konflik desain secara real-time. Platform ini meningkatkan pemahaman bersama dan pengambilan keputusan dengan memungkinkan semua pihak untuk mengalami dan berinteraksi dengan desain secara bersamaan.

AR dapat digunakan untuk meningkatkan komunikasi di lokasi konstruksi dengan menyediakan akses real-time ke informasi desain, instruksi, dan umpan balik. Baik et al. [16] mengembangkan sistem AR untuk inspeksi lokasi konstruksi, memungkinkan inspektur untuk mengakses model BIM, mencatat masalah, dan berkomunikasi dengan pekerja di lokasi melalui perangkat seluler. Hal ini meningkatkan efisiensi dan akurasi inspeksi, mengurangi kesalahan dan meningkatkan keselamatan.

c. Pengalaman Pengguna yang Ditingkatkan

VR dan AR menciptakan pengalaman yang lebih imersif dan menarik bagi pengguna, memungkinkan mereka untuk merasakan ruang arsitektur dengan cara yang belum pernah ada sebelumnya. [17] mengembangkan sistem VR untuk pemasaran real estat, memungkinkan calon pembeli untuk melakukan tur virtual properti, merasakan ruang, dan memvisualisasikan pilihan desain yang berbeda. Hal ini meningkatkan keterlibatan klien dan pengambilan keputusan dengan memungkinkan mereka untuk mengalami desain secara langsung dan personal.

AR dapat digunakan untuk meningkatkan pengalaman pengguna di ruang binaan dengan melapiskan informasi digital ke lingkungan fisik. Jiao et al. [18] mengembangkan sistem AR untuk museum, menyediakan pengunjung dengan informasi tambahan tentang pameran, memandu mereka melalui museum, dan menciptakan pengalaman yang lebih interaktif dan mendidik. Hal ini meningkatkan keterlibatan pengunjung dan apresiasi terhadap pameran museum.

C. Tantangan VR dan AR dalam Arsitektur Digital

Meskipun potensi VR dan AR dalam arsitektur digital sangat besar, ada beberapa tantangan yang perlu diatasi:



Gambar 3 Tantangan VR dan AR masa depan

a. Biaya dan Aksesibilitas

Biaya perangkat keras dan perangkat lunak VR dan AR yang tinggi dapat menjadi penghalang bagi adopsi yang luas, terutama untuk usaha kecil dan menengah. Selain itu, kurangnya aksesibilitas ke teknologi ini di daerah pedesaan atau kurang berkembang dapat memperburuk kesenjangan digital. Martin-Gutierrez et al. [19] menyoroti perlunya solusi yang lebih terjangkau dan mudah diakses untuk memastikan bahwa VR dan AR dapat diakses oleh semua profesional arsitektur, terlepas dari sumber daya keuangan atau lokasi mereka.

b. Kurangnya Standar dan Regulasi

Kurangnya standar dan regulasi yang jelas untuk penggunaan VR dan AR dalam arsitektur dapat menyebabkan kebingungan dan inkonsistensi dalam praktik industri. Pengembangan standar dan pedoman yang komprehensif sangat penting untuk memastikan kualitas, keamanan, dan interoperabilitas aplikasi VR dan AR dalam arsitektur. Irizarry et al. [20] menekankan perlunya kolaborasi antara badan standar, organisasi profesional, dan pengembang teknologi untuk menetapkan standar dan pedoman yang jelas untuk penggunaan VR dan AR dalam arsitektur.

c. Keterampilan dan Pelatihan

Penggunaan VR dan AR dalam arsitektur membutuhkan keterampilan dan pelatihan khusus. Kurangnya profesional yang berkualitas dalam teknologi ini dapat menghambat adopsi dan implementasi yang efektif. Program pendidikan dan pelatihan sangat penting untuk membekali arsitek dan profesional konstruksi dengan keterampilan yang diperlukan untuk memanfaatkan VR dan AR secara efektif. Radu et al. [21] mengusulkan pengembangan kurikulum pendidikan arsitektur yang terintegrasi dengan VR dan AR untuk mempersiapkan generasi

arsitek berikutnya dengan keterampilan yang diperlukan untuk praktik profesional di era digital.

d. Tantangan Teknis

VR dan AR menghadirkan beberapa tantangan teknis, seperti mual, latensi, dan kualitas gambar. Mual, atau mabuk perjalanan, dapat terjadi ketika ada ketidakcocokan antara gerakan yang dirasakan dalam lingkungan virtual dan gerakan fisik pengguna. Latensi, atau penundaan antara tindakan pengguna dan respons sistem, dapat memengaruhi pengalaman imersif dan menyebabkan frustrasi. Kualitas gambar, termasuk resolusi dan kecepatan bingkai, dapat memengaruhi realisme dan keefektifan aplikasi VR dan AR. Sacks et al. [22] menyelidiki tantangan teknis ini dan mengusulkan solusi untuk meningkatkan pengalaman pengguna dan mengatasi keterbatasan teknologi VR dan AR saat ini.

4. Kesimpulan

VR dan AR menawarkan potensi luar biasa untuk mentransformasi arsitektur digital, merevolusi proses desain, konstruksi, dan pengalaman pengguna. Melalui visualisasi imersif, kolaborasi yang ditingkatkan, dan pelatihan yang efektif, VR dan AR meningkatkan efisiensi, akurasi, dan komunikasi dalam proyek arsitektur. Meskipun terdapat tantangan seperti biaya, aksesibilitas, dan kurangnya standar, kemajuan teknologi yang berkelanjutan menjanjikan masa depan yang cerah bagi VR dan AR dalam arsitektur. Integrasi dengan AI, IoT, dan teknologi lainnya akan membuka peluang baru untuk menciptakan lingkungan binaan yang lebih cerdas, berkelanjutan, dan berpusat pada manusia. Dengan demikian, VR dan AR bukan lagi sekadar alat visualisasi, tetapi telah menjadi bagian integral dari arsitektur digital masa depan.

Referensi

1. Shin, D. H., & Dunston, P. S. (2008). Identification of application areas for augmented reality in industrial construction based on technology suitability. *Automation in Construction*, 17(7), 882-894. DOI: 10.1016/j.autcon.2008.02.007
2. Behzadan, A. H., & Kamat, V. R. (2013). Enabling immersive virtual environments for collaborative design review. *Automation in Construction*, 33, 65-78. DOI: 10.1016/j.autcon.2012.12.008
3. Wang, X., & Dunston, P. S. (2007). Design, validation, and application of a virtual reality model for construction safety training. *Journal*

- of Construction Engineering and Management*, 133(10), 798-806. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-364(2007)133:10(798)
3. Kose, A., Ikhsan, M., & Wiratmaja, I. I. (2017). Virtual Reality Meets Intelligence in Large Scale Architecture. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 267(1), 012049. DOI: 10.1088/1757-899X/267/1/012049
 4. Chi, H. L., Kang, S. C., & Wang, X. (2013). Research trends and opportunities of augmented reality applications in architecture, engineering, and construction. *Automation in Construction*, 33, 116-122. DOI: 10.1016/j.autcon.2012.12.009
 5. Baik, Y., Kim, H., & Park, J. (2022). AR-based BIM visualization system for construction site inspection using mobile devices. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 36(3), 04022012. DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000946
 6. Chen, Y., Wang, X., & Love, P. E. D. (2023). A framework for integrating augmented reality with urban planning for visualizing building designs in an urban environment. *Automation in Construction*, 147, 104744. DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104744
 7. Dong, S., Li, Z., & Zhang, Y. (2021). A Collaborative Virtual Reality System for Architectural Design Based on BIM and Cloud Computing. *Advances in Engineering Software*, 153, 102971. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2020.102971
 8. El Ammari, K., & Hammad, A. (2021). Augmented Reality Application for Architectural Education: A Case Study of Structure and MEP Systems. *Sustainability*, 13(14), 7884. DOI: 10.3390/su13147884
 9. Irizarry, J., Choo, S., & Navarro, I. (2022). Augmented Reality in Construction: A Systematic Literature Review. *Journal of Construction Engineering and Management*, 148(12), 04022107. DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0002246
 10. Jiao, Y., Chen, Y., & Liu, D. (2022). An Augmented Reality System for Museum Guidance and Interaction Based on Mobile Devices. *Applied Sciences*, 12(11), 5452. DOI: 10.3390/app12115452
 11. Kim, M., Han, S., & Lee, S. (2022). A virtual reality-based system for evaluating daylighting performance in building design. *Building and Environment*, 208, 108611. DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.108611
 12. Li, J., Zhang, Y., & Wang, X. (2022). Virtual Reality-Based Training System for Construction Workers: A Case Study of Formwork Installation. *Automation in Construction*, 134, 104077. DOI: 10.1016/j.autcon.2021.104077
 13. Liu, Y., Wang, X., & Love, P. E. D. (2023). A virtual reality platform for collaborative architectural design review. *Automation in Construction*, 145, 104655. DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104655
 14. Liu, Z., Wu, P., & Wang, J. (2020). An Augmented Reality System for Visualizing BIM Models on Construction Sites. *Journal of Construction Engineering and Management*, 146(10), 04020101. DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001874
 15. Martin-Gutierrez, J., Mora, C. E., & Rivard, H. (2021). A Review of Immersive Virtual Reality Systems for Construction Applications: Challenges and Opportunities. *Advanced Engineering Informatics*, 47, 101233. DOI: 10.1016/j.aei.2020.101233
 16. Park, K., & Kim, M. (2021). A virtual reality system for real estate marketing using interactive floor plan navigation and furniture arrangement. *Applied Sciences*, 11(11), 5165. DOI: 10.3390/app11115165
 17. Radu, R., Gheorghe, M., & Ciobanu, C. (2023). Integrating Virtual and Augmented Reality in Architectural Education: A Case Study. *Sustainability*, 15(3), 2327. DOI: 10.3390/su15032327
 18. Sacks, R., Wu, J., & Dede, C. (2022). Addressing the Challenges of Virtual and Augmented Reality in Education: A Systematic Review. *Educational Research Review*, 38, 100507. DOI: 10.1016/j.edurev.2022.100507
 19. Son, J., Kim, C., & Lee, J. (2021). Augmented Reality-Assisted Installation of Prefabricated Elements in Construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, 147(11), 04021104. DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0002114
 20. Wang, X., Love, P. E. D., & Kang, S. C. (2020). Augmented Reality in Built Environment: Classification and Implications for Future Research. *Automation in Construction*, 111, 103061. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.103061
 21. Wu, S., Zhang, Y., & Li, H. (2022). A Virtual Reality Platform for Collaborative Architectural Design Based on BIM and Game Engine. *Advances in Engineering Software*, 165, 103094. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2021.103094

22. Yan, H., Chen, W., & Lin, Y. (2021). A Virtual Reality System for Collaborative Architectural Design with Haptic Feedback. *Virtual Reality*, 25(3), 549-562. DOI: 10.1007/s10055-020-00471-9