



Pengembangan Kerangka Double Closed-Loop BIM-AR untuk Inspeksi Operasional Sistem Plumbing
Development of a BIM-AR Double Closed-Loop Framework for Operational Plumbing System Inspection

Dica Rosmyanto^{1,2}, Tri Joko Wahyu Adi¹, Yudi Aryma³

¹Program Magister, Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil Perencanaan dan Kebumihan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Alamat korespondensi:

email: dica.rsmaynto@gmail.com

email: tri_joko@ce.its.ac.id

²Jurusan Teknik Sipil & Infrastruktur, Prodi Teknologi Konstruksi Bangunan Gedung, Politeknik Astra

Alamat korespondensi:

email: dica.rosmyanto@polytechnic.astra.ac.id

³PT Hidronav Tehnikatama, Indonesia

Alamat korespondensi:

email: Yudi@hidronav.co.id

Abstract

Concealed plumbing components can make operational building maintenance inspections difficult, particularly when pipe routes are located above ceilings, within walls, or inside service shafts. This study develops a BIM-AR Double Closed-Loop framework that integrates an operational loop with a managerial loop for operational plumbing inspection and digital maintenance decision-making. A quantitative experimental method was applied by comparing existing visual inspection with BIM-AR-assisted inspection on the same objects in Building C of Politeknik Astra. Field observations, interviews, time-motion studies, and inspection documentation were collected and analyzed using descriptive statistics and paired sample t-tests. The results indicate that BIM-AR shortened the total inspection time from 225 to 95 minutes, representing a 57.78% reduction, while identification accuracy increased from 54.75% to 100%. Operational inspection costs also decreased by 57.78%, from IDR 140,625 to IDR 59,375. The 100% identification accuracy was obtained using a validated as-built BIM model and AR visualization calibrated to actual building conditions. The proposed framework therefore extends BIM-AR beyond inspection support by establishing an information feedback mechanism for BIM/AIM updates, maintenance prioritization, repair recommendations, and data-driven maintenance decisions.

Keywords: BIM-AR; double closed-loop; operational inspection; plumbing system; Asset Information Model

Abstrak

Inspeksi operasional sistem plumbing pada bangunan dapat mengalami kendala ketika jalur dan komponennya berada pada area tersembunyi, seperti di atas plafon, dalam dinding, atau pada shaft utilitas. Penelitian ini mengembangkan kerangka *Double Closed-Loop* BIM-AR yang mengintegrasikan *operational loop* dan *managerial loop* untuk mendukung inspeksi operasional plumbing serta pengambilan keputusan pemeliharaan berbasis informasi digital. Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif eksperimental dengan membandingkan metode inspeksi visual eksisting dan BIM-AR pada objek yang sama di Gedung C Politeknik Astra. Data diperoleh melalui observasi lapangan, wawancara, *time-motion study*, dan dokumentasi inspeksi, kemudian dianalisis menggunakan statistik deskriptif dan *paired sample t-test*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa BIM-AR menurunkan total waktu inspeksi dari 225 menjadi 95 menit atau 57,78%, meningkatkan akurasi identifikasi dari 54,75% menjadi 100%, serta menurunkan biaya operasional sebesar 57,78%, dari Rp140.625 menjadi Rp59.375. Akurasi 100% diperoleh melalui penggunaan model BIM berbasis *as-built* yang tervalidasi dan visualisasi AR yang dikalibrasi terhadap kondisi aktual bangunan. Kerangka yang dikembangkan memperluas fungsi BIM-AR dari dukungan inspeksi menjadi mekanisme umpan balik informasi untuk pembaruan BIM/AIM, prioritas pemeliharaan, rekomendasi perbaikan, dan pengambilan keputusan berbasis data.

Kata kunci: BIM-AR; *Double Closed-Loop*; Inspeksi Operasional; Sistem Plumbing; *Asset Information Model*

PENDAHULUAN

Pemeliharaan bangunan merupakan bagian penting dalam mempertahankan fungsi, kenyamanan, keselamatan, dan nilai aset sepanjang masa layan bangunan. Namun, pelaksanaannya masih dapat bergantung pada pemeriksaan reaktif dan dokumentasi aset yang belum terintegrasi, meskipun pedoman pemeliharaan telah mengarahkan agar kegiatan dilakukan secara terencana dan terdokumentasi (PerMen PU, 2008; Soetjipto et al., 2023). Permasalahan tersebut semakin kompleks pada sistem *mechanical, electrical, and plumbing* (MEP), terutama plumbing air bersih dan air kotor, karena sebagian jaringan dan komponennya ditempatkan pada ruang yang tidak mudah terlihat, seperti plafon, shaft, dan dinding.

Inspeksi visual masih menjadi pendekatan yang praktis karena dapat dilakukan dengan peralatan dan prosedur yang relatif sederhana. Akan tetapi, keterbatasan visibilitas terhadap jalur pipa dan komponen yang tersembunyi dapat memperpanjang proses penelusuran, meningkatkan kemungkinan kesalahan identifikasi, serta membuat hasil pemeriksaan bergantung pada pengalaman teknisi (Besiktepe et al., 2021; Diao & Shih, 2019). Kondisi tersebut juga ditemukan pada lokasi penelitian. Berdasarkan hasil wawancara, penelusuran jalur pipa air kotor yang mengalami sumbatan pernah memerlukan waktu hingga 10 hari kerja dengan dua petugas karena identifikasi masih mengandalkan gambar instalasi dan pemeriksaan fisik di lapangan.

Pemanfaatan *Building Information Modeling* (BIM) bersama *Augmented Reality* (AR) menawarkan pendekatan yang berbeda dengan menghadirkan informasi aset secara digital dan kontekstual selama proses inspeksi. BIM dapat berperan sebagai sumber informasi aset, sedangkan AR memungkinkan informasi model divisualisasikan pada lingkungan fisik sehingga membantu proses identifikasi dan pengelolaan aset (Kementerian Pekerjaan Umum, 2024; Alavi et al., 2021; Khan et al., 2024; Wang et al., 2024). Sejumlah penelitian juga menunjukkan manfaat integrasi BIM–AR dalam peningkatan efisiensi inspeksi, ketepatan identifikasi, dan penyajian informasi aset (Park et al., 2022; Moghaddam, 2026). Namun, pemanfaatan BIM–AR dalam penelitian terdahulu masih banyak diarahkan pada peningkatan aktivitas inspeksi. Dalam konteks pengelolaan pemeliharaan digital, data inspeksi juga perlu dimanfaatkan untuk mendukung pengelolaan sumber daya dan keputusan pemeliharaan (Ikuabe et al., 2025). Dengan demikian, hasil inspeksi perlu memiliki mekanisme *feedback* yang dapat menghubungkannya kembali dengan informasi aset dan proses pengambilan keputusan.

Konsep *closed-loop* pada pengembangan *Digital Twin* telah digunakan untuk mendukung sinkronisasi informasi dan pembaruan data secara berkelanjutan (Wang et al., 2024). Namun, penerapannya pada integrasi BIM–AR untuk inspeksi operasional sistem plumbing yang secara langsung menghubungkan proses inspeksi, pembaruan informasi aset, dan pengambilan keputusan pemeliharaan masih terbatas. Kesenjangan tersebut menjadi dasar pengembangan kerangka Double Closed-Loop BIM–AR dalam penelitian ini. Kerangka yang diusulkan terdiri atas *Operational Loop* untuk mendukung identifikasi dan penelusuran sistem plumbing melalui BIM–AR, serta *Managerial Loop* yang menggunakan hasil inspeksi sebagai umpan balik bagi pembaruan informasi aset dan pengambilan keputusan pemeliharaan. Efektivitas kerangka dievaluasi berdasarkan waktu inspeksi, akurasi identifikasi, dan biaya operasional pada sistem plumbing Gedung C Politeknik Astra. Pendekatan ini diharapkan tidak hanya meningkatkan efektivitas inspeksi operasional, tetapi juga membentuk aliran informasi berkelanjutan antara kondisi aset, hasil inspeksi, dan pengelolaan pemeliharaan berbasis BIM/AIM.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menerapkan pendekatan kuantitatif eksperimental dengan menguji dua metode inspeksi, yaitu inspeksi visual eksisting dan inspeksi berbantuan BIM–AR, pada objek yang sama. Studi dilakukan pada sistem plumbing air bersih dan air kotor di Gedung C Politeknik Astra. Penentuan objek inspeksi dilakukan secara *purposive* berdasarkan gambar *as-built* plumbing. Pengujian mencakup dua lokasi, yaitu toilet lantai dasar dan toilet lantai 1. Pada setiap lantai



ditetapkan lima elemen inspeksi, sehingga total terdapat 10 objek yang diuji menggunakan kedua metode. Parameter yang dibandingkan meliputi waktu inspeksi, akurasi identifikasi, biaya operasional inspeksi, dan investasi awal penerapan BIM–AR.

Data primer dikumpulkan melalui observasi lapangan, wawancara dengan petugas inspeksi, dan *time-motion study*. Data sekunder mencakup gambar *as-built* plumbing, model BIM 3D yang tersedia, informasi aset plumbing, serta data biaya tenaga kerja. Berdasarkan data tenaga kerja yang digunakan dalam penelitian, tarif inspeksi ditetapkan sebesar Rp625 per menit.

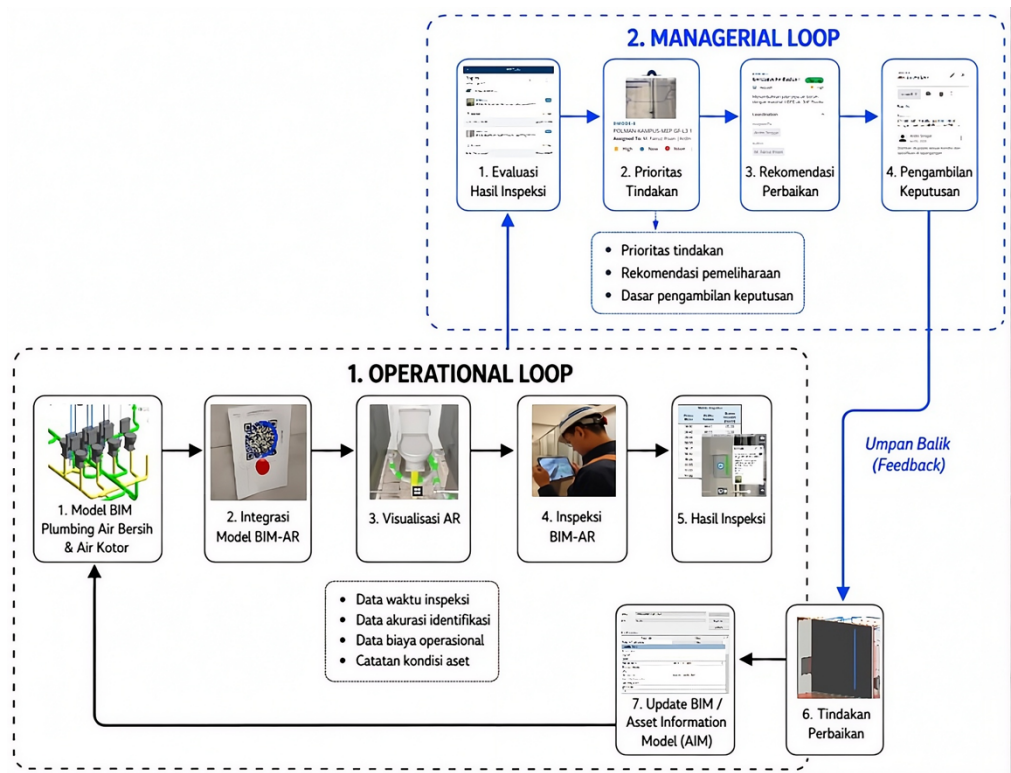
Pengukuran waktu dilakukan sejak pemeriksaan dimulai hingga seluruh target pada masing-masing objek selesai diidentifikasi. Akurasi ditentukan berdasarkan rasio antara jumlah komponen yang berhasil dikenali dengan jumlah komponen yang menjadi target pemeriksaan. Sementara itu, biaya operasional diperoleh dari hasil perkalian durasi inspeksi dengan tarif tenaga kerja per menit. Karena setiap objek yang sama diperiksa menggunakan dua metode, perbedaan hasil antara inspeksi visual dan BIM–AR dianalisis menggunakan *paired sample t-test*.

Tabel 1. Elemen Inspeksi Sistem Plumbing Air Bersih dan Air Kotor

Sistem	Objek Inspeksi	Aspek Identifikasi
Air Bersih	Jalur pipa air bersih	Lokasi jalur, arah aliran, posisi pipa
	Valve	Lokasi, jumlah, dan fungsi valve
	Fitting Pipa	Lokasi sambungan, elbow, tee, reducer, dan percabangan
Air Kotor	Jalur pipa air kotor	Lokasi jalur, arah aliran, kemiringan, dan posisi pipa
	Floor drain/ Clean out	Lokasi dan keterhubungan dengan jalur pembuangan

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kerangka yang dikembangkan dalam penelitian ini terdiri atas dua siklus yang saling berhubungan, yaitu *operational loop* dan *managerial loop*. Pada *operational loop*, model BIM plumbing digunakan sebagai dasar integrasi BIM–AR untuk visualisasi dan pelaksanaan inspeksi, dilanjutkan dengan pencatatan hasil, tindakan perbaikan, serta pembaruan BIM/AIM. Sementara itu, *managerial loop* menggunakan informasi hasil inspeksi sebagai dasar evaluasi kondisi aset, penentuan prioritas tindakan, penyusunan rekomendasi perbaikan, dan pengambilan keputusan. Konsep tersebut mengadopsi prinsip *double-loop learning* yang tidak hanya berorientasi pada perbaikan tindakan, tetapi juga mendorong evaluasi terhadap asumsi, strategi, dan proses pengambilan keputusan yang mendasarinya (Argyris, 1977). Konsep ini tetap relevan dalam kajian organisasi dan pembelajaran hingga saat ini, sebagaimana ditunjukkan oleh Auqui-Caceres & Furlan (2023) melalui tinjauan sistematis terhadap penelitian *double-loop learning*. Dalam penelitian ini, prinsip tersebut diterapkan melalui umpan balik dari hasil inspeksi untuk tidak hanya mendukung tindakan perbaikan operasional, tetapi juga evaluasi kondisi aset, penentuan prioritas pemeliharaan, dan pengambilan keputusan pada *managerial loop*.



Gambar 1. Kerangka *double closed-loop* BIM-AR untuk inspeksi operasional sistem plumbing

Hasil validasi menunjukkan bahwa kedua loop telah mencakup komponen utama yang diperlukan dalam inspeksi operasional sistem plumbing. *Operational loop* menghubungkan penggunaan model BIM, visualisasi AR, pelaksanaan inspeksi, pencatatan hasil, tindakan perbaikan, dan pembaruan BIM/AIM. Di sisi lain, *managerial loop* memanfaatkan data inspeksi sebagai masukan untuk evaluasi, penetapan prioritas, rekomendasi perbaikan, dan pengambilan keputusan.

Tabel 2. Statistik deskriptif hasil pengukuran inspeksi

Parameter	Metode	N	Mean	SD
Waktu inspeksi (menit)	Visual eksisting	10	22,50	11,61
	BIM-AR	10	9,50	4,22
Akurasi identifikasi (%)	Visual eksisting	10	54,75	37,16
	BIM-AR	10	100,00	0,00
Biaya operasional inspeksi (Rp)	Visual eksisting	10	14.062,50	7.254,37
	BIM-AR	10	5.937,50	2.639,35

Berdasarkan Tabel 2, BIM–AR menghasilkan akurasi identifikasi sebesar 100,00% (SD 0,00) pada seluruh objek yang diuji. Hasil tersebut diperoleh karena model BIM berbasis *as-built* telah merepresentasikan elemen yang diperiksa secara lengkap dan sistem AR telah dikalibrasi sebelum



pengujian sehingga visualisasi dapat diselaraskan dengan kondisi aktual. Pada kondisi penelitian ini, kesesuaian model dengan kondisi fisik, kelengkapan elemen dalam model, dan kalibrasi AR menghasilkan visualisasi yang konsisten selama inspeksi. Rohman et al. (2022) menunjukkan bahwa kesesuaian posisi objek AR di lapangan dapat dipengaruhi oleh akurasi *positioning* perangkat. Oleh karena itu, akurasi 100,00% yang diperoleh dalam penelitian ini merupakan hasil pada kondisi model dan lingkungan pengujian yang terkendali dan belum dapat digeneralisasikan pada seluruh kondisi lapangan. Perubahan kondisi fisik aset, ketidaksesuaian model *as-built*, maupun ketidakakuratan registrasi AR dapat memengaruhi hasil identifikasi pada penerapan yang lebih luas.

Tabel 3. Perbandingan hasil pengukuran berdasarkan parameter utama

Parameter	Visual Eksisting	BIM-AR	Nilai
Rata-rata waktu inspeksi	22,50 menit	9,50 menit	57,78%
Rata-rata akurasi identifikasi	54,75%	100,00%	45,25%
Total biaya operasional inspeksi	Rp140.625	Rp59.375	57,78%
Biaya investasi awal	-	Rp59.300.000	-

Efektivitas BIM-AR tidak menunjukkan pola yang sama pada seluruh elemen plumbing. Manfaat paling besar terlihat pada jalur pipa air bersih dan air kotor yang sebagian komponennya berada pada area tersembunyi. Visualisasi berbasis BIM-AR membantu menunjukkan posisi dan lintasan elemen yang sulit diamati secara langsung. Sebaliknya, *floor drain* dan *clean out* tidak mengalami perubahan waktu maupun biaya inspeksi karena kedua elemen tersebut dapat ditemukan secara langsung melalui pemeriksaan visual. Dengan demikian, keunggulan BIM-AR terutama terletak pada objek yang tersembunyi atau membutuhkan penelusuran spasial, sedangkan penerapannya pada komponen yang sudah terlihat secara langsung memberikan tambahan manfaat yang relatif terbatas.

Temuan tersebut memberikan implikasi terhadap strategi penerapan dan justifikasi investasi BIM-AR. Teknologi ini lebih tepat diprioritaskan pada sistem atau area dengan tingkat ketersembunyian dan kompleksitas yang tinggi daripada diterapkan secara merata pada seluruh elemen bangunan. Jalur plumbing yang tersembunyi dan membutuhkan penelusuran spasial berpotensi memberikan manfaat yang lebih besar, sedangkan elemen yang mudah dijangkau masih dapat diperiksa menggunakan metode visual. Pendekatan selektif tersebut juga perlu mempertimbangkan kualitas registrasi AR dan kesesuaian model digital dengan kondisi fisik, karena ketidaktepatan penyelarasan dapat mengurangi manfaat visualisasi di lapangan.

Tabel 4. Hasil uji *paired sample t-test*

Parameter	t hitung	p-value	Keterangan
Waktu inspeksi (menit)	4,96	0,001	Signifikan
Akurasi identifikasi (%)	3,85	0,004	Signifikan
Biaya operasional inspeksi (Rp)	4,96	0,001	Signifikan

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa penerapan BIM–AR menurunkan rata-rata waktu inspeksi dari 22,50 menit menjadi 9,50 menit, atau terjadi pengurangan sebesar 57,78%. Penurunan biaya operasional juga mencapai persentase yang sama. Efisiensi waktu tersebut lebih rendah dibandingkan penelitian Tan et al. (2024), yang melaporkan peningkatan efisiensi inspeksi sebesar 78,63% melalui integrasi BIM, AR, dan *computer vision*. Perbedaan hasil dapat berkaitan dengan karakteristik objek, teknologi yang digunakan, serta tahapan inspeksi yang menjadi pembanding. Di sisi lain, temuan penelitian ini sejalan dengan May et al. (2022), yang menunjukkan bahwa BIM–AR dapat meningkatkan kinerja inspeksi, waktu penyelesaian, dan kemampuan identifikasi elemen dibandingkan pendekatan konvensional.

Dari aspek akurasi, BIM–AR meningkatkan hasil identifikasi sebesar 45,25 poin persentase, dari 54,75% menjadi 100,00%. Perbedaan tersebut juga signifikan secara statistik dengan $p = 0,004$. Hasil ini menunjukkan bahwa visualisasi informasi BIM melalui AR dapat membantu proses pencarian dan identifikasi elemen bangunan. Namun, besarnya peningkatan akurasi tetap perlu dipahami dalam konteks objek, kualitas model, dan kondisi pengujian penelitian ini. Dengan demikian, kontribusi penelitian tidak hanya terletak pada peningkatan nilai akurasi, tetapi juga pada penerapan BIM–AR untuk inspeksi operasional sistem plumbing dan pengintegrasian dengan mekanisme *Double Closed-Loop*.

Tabel 5. Rekapitulasi biaya investasi awal BIM-AR

Kebutuhan	Qty.	Total Biaya (Rp)	Ket.
11-inch iPad Pro M4, visualisasi AR	1 unit	17.000.000	Perangkat aplikasi AR saat inspeksi
<i>Lisensi SiteVision Annual</i>	1 tahun	40.800.000	<i>Include training</i>
Penyesuaian model BIM plumbing	1 paket	1.500.000	1 modeler selama 1 minggu kerja
Total investasi awal		59.300.000	

Penerapan BIM–AR memerlukan investasi awal sebesar Rp59.300.000 yang terdiri atas perangkat AR, lisensi perangkat lunak, dan penyesuaian model BIM. Berdasarkan hasil pengukuran,



biaya operasional turun dari Rp14.062,50 menjadi Rp5.937,50 per objek, sehingga penghematan rata-rata mencapai Rp8.125 per objek. Untuk satu siklus pemeriksaan yang mencakup 10 objek, penghematan mencapai Rp81.250. Dengan pendekatan *break-even point*, investasi awal diperkirakan mencapai titik impas setelah sekitar 730 siklus inspeksi lengkap (Rp59.300.000/Rp81.250). Hasil tersebut menunjukkan bahwa investasi BIM-AR belum ekonomis apabila hanya digunakan pada frekuensi inspeksi yang terbatas dalam studi kasus ini. Namun, kelayakan ekonominya berpotensi meningkat apabila teknologi digunakan secara berulang pada frekuensi tinggi dan diperluas ke area atau sistem bangunan lainnya.

Selain menghasilkan manfaat pada parameter waktu, akurasi, dan biaya, *managerial loop* memberikan fungsi lanjutan dalam pemanfaatan data inspeksi. Informasi berupa hasil identifikasi, durasi pemeriksaan, biaya, foto kondisi, lokasi elemen, dan catatan aset dapat menjadi masukan untuk memperbarui AIM, mengevaluasi kondisi aset, menentukan prioritas pemeliharaan, menyusun rekomendasi perbaikan, dan mendukung pengambilan keputusan berbasis data. Dengan mekanisme tersebut, kerangka *double closed-loop* tidak berhenti pada percepatan proses inspeksi, tetapi menghubungkan hasil pemeriksaan lapangan dengan proses pengelolaan aset secara berkelanjutan.

KESIMPULAN

Penelitian ini menghasilkan kerangka *Double Closed-Loop* BIM-AR untuk mendukung inspeksi operasional sistem plumbing air bersih dan air kotor di Gedung C Politeknik Astra. Kerangka tersebut menghubungkan *operational loop* dan *managerial loop* melalui mekanisme *feedback*. *Operational loop* mendukung proses visualisasi AR, inspeksi, pencatatan hasil, tindakan perbaikan, serta pembaruan BIM/AIM, sedangkan *managerial loop* memanfaatkan informasi inspeksi untuk mengevaluasi kondisi aset, menetapkan prioritas tindakan, menyusun rekomendasi perbaikan, dan mendukung pengambilan keputusan pemeliharaan.

Pengujian eksperimental menunjukkan bahwa penggunaan BIM-AR memberikan perbedaan yang signifikan dibandingkan metode visual eksisting. Waktu inspeksi berkurang dari 225 menit menjadi 95 menit (57,78%), akurasi identifikasi meningkat dari 54,75% menjadi 100,00%, dan biaya operasional turun dari Rp140.625 menjadi Rp59.375. Hasil *paired sample t-test* menunjukkan bahwa perbedaan pada ketiga parameter tersebut signifikan secara statistik dengan $p\text{-value} < 0,05$. Temuan ini menunjukkan bahwa manfaat BIM-AR terutama terlihat pada elemen plumbing yang tersembunyi atau membutuhkan penelusuran spasial, sementara penerapannya pada elemen yang dapat diamati secara langsung memberikan manfaat tambahan yang lebih terbatas.

Penelitian berikutnya perlu menguji kerangka pada bangunan yang belum memiliki model BIM, termasuk mengevaluasi pengaruh proses pemodelan awal terhadap efektivitas penerapan. Pengujian juga dapat diperluas ke sistem MEP lainnya untuk menilai konsistensi kerangka pada karakteristik aset yang berbeda. Selain itu, keterlibatan beberapa petugas inspeksi dan penerapan analisis *multi-rater reliability* dapat digunakan untuk mengevaluasi konsistensi hasil serta pengaruh perbedaan pengguna terhadap penerapan BIM-AR.

DAFTAR PUSTAKA

- Alavi, H., Forcada, N., Fan, S.-L., & San, W. (2021). *BIM-based augmented reality inspection of facility maintenance management*. Proceedings of the 2021 European Conference on Computing in Construction, 431–438. <https://doi.org/10.35490/EC3.2021.180>
- Auqui-Caceres, M.-V., & Furlan, A. (2023). Revitalizing double-loop learning in organizational contexts: A systematic review and research agenda. *European Management Review*, 20(4), 741–761. <https://doi.org/10.1111/emre.12615>
- Besiktepe, D., Ozbek, M.E. and Atadero, R.A. (2021). Condition assessment framework for facility management based on fuzzy sets theory.
- Diao, P. and Shih, N. (2019). BIM-Based AR Maintenance System (BARMS) as an intelligent instruction platform for complex plumbing facilities. *Applied Sciences*.
- Ikuabe, M., Aigbavboa, C., Awuzie, B., & Ogungbe, M. (2025). Towards a computerised maintenance management system for healthcare facilities in South Africa. *World Construction Symposium*, 1384–1390. <https://doi.org/10.31705/WCS.2025.103>
- Kementerian Pekerjaan Umum. (2024). SOP Implementasi Building Information Modeling (BIM) (No. 252/SOP/BDI). Pusat Data dan Teknologi Informasi, Kementerian Pekerjaan Umum, from https://storage.googleapis.com/monitoring-bim-pupr/publication/SOP_Implementasi_BIM_PU_Tahun_2024.pdf
- Khan, S., Panuwatwanich, K. and Usanavasin, S. (2024). Integrating building information modeling with augmented reality: application and empirical assessment in building facility management. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 31(7), pp. 2809-2828. <https://doi.org/10.1108/ECAM-12-2021-1146>.
- May, K. W., KC, C., Ochoa, J. J., et al. (2022). The identification, development, and evaluation of BIM-ARDM: A BIM-based AR defect management system for construction inspections. *Buildings*, 12(2), 140. <https://doi.org/10.3390/buildings12020140>
- Moghaddam, S. (2026). An integrated BIM-based augmented reality framework for improving facility maintenance management workflow. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 33(3), pp. 2007-2047. <https://doi.org/10.1108/ECAM-12-2024-1671>.
- Park, J. et al. (2022). Inspection data exchange and visualization for building maintenance using AR-enabled BIM. *ISARC*, pp. 483-490.
- PerMen PU. (2008). Peraturan Menteri Pekerjaan Umum No. 24/PRT/M/2008 tentang Pedoman Pemeliharaan dan Perawatan Bangunan Gedung.
- Rohman, A., Rinaldi, A., & Hidayat, F. (2022). Pembuatan augmented reality berbasis titik untuk mendukung Building Information Modelling (BIM). *Jurnal Inovasi Konstruksi*, 1(1), 19–24. <https://doi.org/10.56911/jik.v1i1.13>
- Soetjipto, J.W., Zarkasi, I.K. and Trisiana, A. (2023). Model of building maintenance planning using the Building Information Modeling (BIM). *Jurnal Permukiman*, 18(1), pp. 1-15. <https://doi.org/10.31815/jp.2023.18.1-15>.
- Tan, Y., Xu, W., Chen, P., & Zhang, S. (2024). Building defect inspection and data management using computer vision, augmented reality, and BIM technology. *Automation in Construction*, 160, 105318. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105318>
- Wang, X., Yu, H., McGee, W., Menassa, C. C., & Kamat, V. R. (2024). Enabling building information model-driven human-robot collaborative construction workflows with closed-loop digital twins. *Computers in Industry. Advance online publication*. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2024.104112>