

Asesmen Kondisi Eksisting dan Keandalan Awal Struktur Bangunan Cagar Budaya Kolonial terhadap Tuntutan Gempa Berbasis Pengujian Tanpa Merusak (NDT)

Assessment of Existing Condition and Initial Structural Reliability of a Colonial Heritage Building under Seismic Demand Based on Non-Destructive Testing (NDT)

Lukman Subangi¹, Keti Andayani², Sudarmawan Juwono³, Felix Hidayat⁴, Joko Purnomo⁵

¹ Teknik Sipil, Universitas Pelita Bangsa

² Arsitektur, Universitas Bung Karno

³ Arsitektur, Universitas Bung Karno

⁴ Teknik Sipil, Universitas Katolik Parahyangan

⁵ Teknik Sipil, Universitas Kristen Petra

¹lukman.subangi@pelitabangsa.ac.id, ²ketiandayani@gmail.com*, ³sudarmawanyuwono@gmail.com*,

⁴hidayat@unpar.ac.id*, ⁵jpurnomo@petra.ac.id*

Abstract

Colonial-era heritage buildings in moderate-to-high seismic regions require reliable condition assessment prior to any change of use that may alter gravity demand and occupancy risk. This study presents an initial structural reliability evaluation of a heritage building type A in West Jakarta, Indonesia, characterized by a mixed system comprising load-bearing walls, reinforced concrete frames, and steel profiles. The assessment applied non-destructive testing (NDT) as a rapid, minimally intrusive approach aligned with FEMA P-154 and performance-based principles of ASCE 41-17. The NDT program consisted of Schmidt rebound hammer tests for concrete strength estimation, ultrasonic pulse velocity (UPV) for internal concrete quality, rebar scanning for reinforcement indication, and Brinell hardness testing for steel profile integrity. Field observations identified hairline cracks on secondary beams and localized cover spalling at semi-basement zones correlated with high humidity exposure. Results indicate rebound numbers of primary columns exceeding $R > 35$ corresponding to estimated compressive strength of approximately 25–30 MPa, while floor slabs showed $R \approx 30–32$ corresponding to approximately 20 MPa. UPV values exceeding 3.5 km/s suggest dense concrete with no severe internal voiding. Steel hardness results remained consistent with BJ-37 grade yield strength with no significant section loss due to corrosion. Overall, the building demonstrates satisfactory initial structural adequacy and reserved strength for its current function, with recommended local repairs using epoxy grouting and mortar patching to improve durability and reduce long-term degradation risk.

Keywords: heritage building, non-destructive testing, seismic reliability, rebound hammer, UPV, ASCE 41-17

Abstrak

Bangunan cagar budaya peninggalan kolonial yang berada pada wilayah dengan risiko gempa menengah-tinggi memerlukan asesmen kondisi eksisting yang andal sebelum dilakukan perubahan fungsi, karena perubahan ini dapat meningkatkan tuntutan beban gravitasi maupun risiko keselamatan penghuni. Penelitian ini menyajikan evaluasi awal keandalan struktur pada sebuah bangunan heritage tipe A (anonim) di wilayah Jakarta Barat dengan sistem struktur campuran berupa dinding pemikul (*bearing wall*) yang dikombinasikan dengan rangka beton bertulang dan profil baja. Metode yang digunakan berbasis pengujian tanpa merusak (*Non-Destructive Testing/NDT*) sebagai pendekatan cepat dan minim intervensi, mengacu pada FEMA P-154 dan prinsip evaluasi berbasis kinerja pada ASCE 41-17. Program NDT meliputi *Schmidt rebound hammer* untuk estimasi kuat tekan beton, *Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)* untuk menilai kualitas internal beton, pemindaian tulangan (*rebar scan*) untuk indikasi penulangan, serta uji kekerasan Brinell untuk menilai kondisi material profil baja. Temuan visual menunjukkan retak rambut pada balok sekunder serta spalling selimut beton pada zona semi-basement yang berkorelasi dengan paparan kelembapan tinggi. Hasil hammer test pada kolom utama menunjukkan nilai pantul rata-rata $R > 35$ dengan estimasi kuat tekan f_c' sekitar 25–30 MPa (kategori

baik), sedangkan pelat lantai menunjukkan $R \approx 30-32$ dengan estimasi f_c' sekitar 20 MPa (kategori cukup dan memenuhi syarat minimal bangunan lama). Nilai UPV $> 3,5$ km/s mengindikasikan beton padat tanpa indikasi keropos internal yang signifikan. Uji kekerasan baja menunjukkan mutu setara BJ-37 dengan tidak ditemukannya pengurangan penampang akibat korosi yang berarti. Secara keseluruhan, bangunan berada pada kategori layak fungsi dan masih memiliki cadangan kekuatan awal yang memadai terhadap kebutuhan fungsi baru, dengan rekomendasi perbaikan lokal berupa *grouting epoksi* pada retak dan *patching* mortar pada *spalling* untuk menjaga durabilitas jangka panjang.

Kata kunci: bangunan cagar budaya, pengujian tanpa merusak, keandalan gempa, *rebound hammer*, UPV, ASCE 41-17

Pendahuluan

Bangunan cagar budaya peninggalan kolonial pada awal abad ke-20 merupakan aset kota yang memiliki nilai historis, arsitektural, serta identitas sosial yang tinggi. Namun demikian, karakteristik material dan sistem strukturnya umumnya dibangun mengikuti teknologi serta standar pada masanya, sehingga menghadapi tantangan signifikan ketika beroperasi pada lingkungan urban modern dengan tuntutan keselamatan yang lebih tinggi. Salah satu isu utama dalam pelestarian bangunan tua adalah keterbatasan intervensi struktural akibat pembatasan konservasi, sehingga metode evaluasi kondisi eksisting harus mampu memberikan informasi teknis yang memadai tanpa merusak elemen bernilai historis.

Di wilayah Jakarta, kondisi geoteknik berupa tanah lunak hingga sedang, disertai pengaruh beban dinamis perkotaan dan potensi bahaya gempa menengah–tinggi, meningkatkan urgensi asesmen keandalan struktur bangunan eksisting. Risiko ini menjadi lebih kritis ketika terjadi perubahan fungsi dari beban rendah (misalnya ruang administrasi) menjadi fungsi publik atau eksibisi, karena beban hidup meningkat dan konsekuensi kegagalan struktur menjadi lebih besar. Pada kondisi tersebut, verifikasi kapasitas awal struktur dan kualitas material menjadi fondasi utama untuk menentukan apakah bangunan masih layak digunakan, memerlukan perkuatan, atau cukup dilakukan perbaikan lokal pada elemen tertentu.

Penilaian awal struktur eksisting secara tradisional sering bergantung pada pengujian destruktif seperti *core drilling* dan uji lab intensif. Meskipun akurat, pendekatan destruktif tidak selalu sesuai untuk bangunan cagar budaya karena dapat merusak integritas arsitektural dan memicu kerusakan sekunder. Oleh karena itu, pengujian tanpa merusak (*Non-Destructive Testing/NDT*) menjadi pilihan yang relevan karena mampu memetakan kualitas material dan indikasi kerusakan internal secara cepat dan minim intrusi. Kerangka kerja asesmen pada penelitian ini dirancang mengacu pada FEMA P-154 untuk *rapid visual screening* sebagai fondasi identifikasi risiko awal, serta prinsip evaluasi berbasis kinerja yang dirujuk dalam ASCE 41-17 untuk memastikan temuan lapangan dapat ditransformasikan menjadi interpretasi keandalan struktur terhadap gempa.

Penelitian ini bertujuan untuk menyajikan asesmen kondisi eksisting dan evaluasi keandalan awal sebuah bangunan cagar budaya kolonial (anonim) berbasis NDT, dengan fokus pada: (i) identifikasi kerusakan visual dan faktor penyebab dominan, (ii) pemetaan kualitas beton dan indikasi homogenitas internal, (iii) verifikasi awal kondisi material profil baja, serta (iv) sintesis hasil sebagai dasar penilaian kelayakan fungsi dan rekomendasi penanganan. Kontribusi utama studi ini adalah menyajikan pendekatan praktis dan terstruktur yang dapat direplikasi untuk bangunan heritage lain di zona gempa, dengan tetap menjaga prinsip konservasi dan keamanan data objek vital/privat.

Metode Penelitian

Objek penelitian adalah sebuah bangunan cagar budaya peninggalan kolonial Belanda awal abad ke-20 yang berlokasi di wilayah Jakarta Barat. Secara geoteknik, area ini dikategorikan memiliki kondisi tanah lunak–sedang yang berpotensi memperbesar respons gempa pada struktur eksisting. Bangunan mengalami perubahan fungsi dari penggunaan awal sebagai kantor administrasi dengan beban hidup rendah menjadi area publik/eksibisi, sehingga tuntutan terhadap kinerja struktur meningkat.

Bangunan memiliki sistem struktur campuran yang umum pada bangunan kolonial hasil adaptasi dan renovasi, yaitu kombinasi dinding pemikul (*bearing wall*) dengan rangka beton bertulang dan elemen baja profil (komposit). Komposisi sistem ini pada praktiknya menghasilkan perilaku global yang bergantung pada kekakuan dinding, kapasitas rangka, serta kontinuitas diafragma lantai, yang seluruhnya sensitif terhadap degradasi material akibat usia, kelembapan, serta perubahan beban layanan.

Asesmen disusun dalam tiga tahap besar yang saling terkait. Tahap pertama adalah identifikasi masalah melalui inspeksi visual untuk memetakan indikasi kerusakan, area kritis, dan potensi mekanisme kegagalan awal. Tahap kedua adalah pengujian NDT untuk mengkuantifikasi kualitas material dan indikasi kerusakan internal tanpa merusak struktur. Tahap ketiga adalah analisis sintesis untuk menarik kesimpulan keandalan awal bangunan terhadap gempa dan menyusun rekomendasi penanganan berbasis prioritas teknis dan konservasi.

Acuan FEMA P-154 digunakan untuk memastikan inspeksi visual dan screening awal memadai sebagai dasar klasifikasi risiko awal bangunan eksisting, sedangkan ASCE 41-17 digunakan sebagai rujukan konseptual dalam menilai kecukupan awal kapasitas dan *reserved strength*, khususnya dalam konteks perubahan fungsi dan tuntutan kinerja minimum.

Uji *Schmidt rebound hammer* dilakukan untuk memperoleh estimasi kuat tekan beton melalui nilai pantul (*rebound number*, R). Pengujian dilakukan pada elemen vertikal utama (kolom utama) dan elemen horizontal (pelat lantai) untuk menangkap variasi mutu akibat perbedaan proses pengecoran, kondisi eksposur, dan umur layanan. Nilai R diinterpretasikan menjadi estimasi f_c' menggunakan korelasi empiris alat sesuai pedoman pabrikan dan praktik asesmen beton eksisting [4], [5]. Kategori mutu beton ditentukan secara relatif sebagai “baik” pada R tinggi dan “cukup/minimal” pada R moderat, dengan mempertimbangkan konteks bangunan lama.

UPV digunakan untuk menilai homogenitas internal beton, keberadaan rongga, dan indikasi kerusakan internal seperti *honeycomb* atau *microcracking* masif. Kecepatan rambat gelombang ultrasonik dinyatakan dalam km/s, dan nilai di atas ambang tertentu lazim dikaitkan dengan beton padat serta kualitas internal yang baik [6]. Pada penelitian ini, UPV digunakan sebagai penguat interpretasi hammer test, terutama untuk memastikan bahwa estimasi kuat tekan tidak bias akibat kondisi permukaan yang kurang representatif.

Pemindaian tulangan dilakukan untuk memperoleh indikasi lokasi penulangan dan ketebalan selimut beton secara non-intrusif. Data ini digunakan sebagai informasi pendukung untuk memverifikasi konsistensi struktur beton bertulang pada zona tertentu dan menilai risiko *spalling*/korosi selimut akibat kelembapan tinggi. Pengukuran rebar scan dipakai dalam koridor asesmen eksisting tanpa melakukan pembobokan, sejalan dengan prinsip konservasi bangunan heritage.

Uji kekerasan Brinell dilakukan pada elemen baja profil untuk mengidentifikasi tingkat kekerasan material yang dapat ditautkan secara konservatif pada estimasi mutu baja dan indikasi degradasi. Pendekatan ini digunakan untuk mengonfirmasi apakah baja profil masih berada pada mutu setara BJ-37 dan apakah terdapat indikasi penurunan kapasitas akibat korosi atau penuaan material [7]. Pemeriksaan visual korosi dan indikasi pengurangan penampang dilakukan sebagai penguat interpretasi hasil kekerasan.

Data hasil NDT dianalisis secara deskriptif-kuantitatif dengan menekankan konsistensi antar-metode. Nilai R dari hammer test digunakan untuk menaksir rentang f_c' pada kolom utama dan pelat lantai. Nilai UPV dipakai untuk menguatkan klaim kualitas internal beton. Hasil Brinell dipakai untuk menilai kecukupan mutu baja profil. Temuan visual retak dan *spalling* diintegrasikan ke dalam interpretasi durabilitas dan risiko degradasi jangka panjang.

Keandalan awal (*initial reliability*) pada penelitian ini ditafsirkan sebagai kondisi di mana elemen utama masih menunjukkan mutu material yang memadai, tidak terdapat indikasi kerusakan internal serius, dan terdapat cadangan kekuatan (*reserved strength*) yang memungkinkan bangunan tetap berfungsi dengan aman pada beban

layanan normal fungsi baru. Interpretasi ini bersifat tahap awal, sehingga hasilnya digunakan sebagai dasar rekomendasi penanganan lokal dan kebutuhan evaluasi lanjut apabila diperlukan.

Hasil dan Pembahasan

Inspeksi visual menunjukkan adanya retak rambut (*hairline crack*) pada balok sekunder dan *spalling* selimut beton pada beberapa titik di area semi-basement. Retak rambut pada balok sekunder umumnya berkaitan dengan kombinasi penyusutan, perubahan temperatur, maupun respons lendutan layanan yang berulang pada elemen dengan kekakuan terbatas. Pada bangunan cagar budaya yang mengalami perubahan fungsi, indikasi ini menjadi krusial karena perubahan fungsi menjadi museum atau area publik cenderung meningkatkan beban hidup dan intensitas penggunaan ruang, sehingga potensi peningkatan lebar retak pada elemen sekunder dapat meningkat apabila tidak dikendalikan melalui manajemen beban dan pemeliharaan berkala. *Spalling* selimut beton pada area semi-basement menunjukkan gejala degradasi yang berkaitan dengan kelembapan tinggi, yang dapat dipicu oleh kondensasi, rembesan, atau siklus basah–kering berulang. Dalam konteks struktur beton bertulang, *spalling* merupakan indikator awal menurunnya durabilitas karena selimut beton kehilangan kemampuan protektif terhadap tulangan, dan apabila dibiarkan, kondisi ini dapat berkembang menjadi korosi tulangan yang progresif dan mempercepat penurunan kinerja elemen dalam jangka panjang. Meskipun demikian, secara umum tidak teridentifikasi pola kerusakan masif seperti retak geser lebar, keruntuhan lokal, maupun deformasi visual yang mengindikasikan instabilitas global, sehingga temuan visual pada tahap awal ini dapat dikategorikan dominan bersifat lokal, namun tetap memerlukan verifikasi kuantitatif melalui NDT untuk memastikan tidak terdapat kerusakan internal tersembunyi.

Hasil pengujian *Schmidt rebound hammer* pada kolom utama menunjukkan nilai pantul rata-rata $R > 35$ yang berkorelasi dengan estimasi kuat tekan f_c sekitar 25-30 MPa. Rentang ini mengindikasikan mutu beton yang tergolong baik pada elemen vertikal utama, khususnya pada bangunan lama yang umumnya memiliki variasi mutu tinggi akibat metode konstruksi era terdahulu. Kondisi ini memberikan indikasi bahwa elemen kolom masih memiliki kapasitas material yang memadai untuk menahan beban gravitasi serta berkontribusi pada ketahanan lateral dalam sistem rangka, terutama pada kombinasi struktur campuran dinding pemikul dan rangka. Pada pelat lantai, nilai pantul rata-rata berada pada $R \approx 30-32$ dengan estimasi f_c sekitar 20 MPa. Hasil ini dapat dikategorikan cukup dan masih memenuhi syarat minimal untuk banyak bangunan eksisting, terutama bila mempertimbangkan bahwa pelat bekerja sebagai diafragma dan elemen distribusi beban yang kinerjanya sensitif terhadap kualitas permukaan, retak layan, serta perubahan beban operasional. Walaupun mutu pelat lebih rendah dibanding kolom, selisih ini masih berada dalam variasi yang wajar dan tidak menunjukkan indikasi penurunan mutu beton yang ekstrem. Perbedaan mutu antara kolom dan pelat dapat dipengaruhi oleh perbedaan proses pengecoran, pemadatan, *curing*, serta tingkat eksposur lingkungan, dan pada bangunan yang mengalami adaptasi fungsi, pelat lantai menjadi elemen yang perlu mendapat perhatian lebih karena menerima tuntutan beban layanan yang meningkat. Oleh karena itu, mutu pelat yang berada pada sekitar 20 MPa pada konteks keandalan awal masih dapat diterima, namun harus disertai pengendalian beban dan evaluasi lanjutan apabila terjadi perubahan pola pemanfaatan ruang yang lebih intensif.

Pengujian UPV menunjukkan kecepatan rambat gelombang ultrasonik di atas 3,5 km/s yang secara umum mengindikasikan beton padat dan relatif homogen, dengan probabilitas rendah terhadap keberadaan rongga besar atau *honeycomb* internal yang serius. Temuan UPV ini penting karena memberikan validasi terhadap hasil hammer test yang cenderung dipengaruhi kondisi permukaan, sehingga ketika UPV mengindikasikan beton padat, interpretasi estimasi kuat tekan dari nilai pantul memiliki tingkat keandalan yang lebih tinggi. Ketiadaan indikasi keropos internal signifikan juga berarti bahwa kerusakan visual seperti retak rambut dan *spalling* lokal lebih mungkin merupakan fenomena permukaan akibat kondisi lingkungan atau faktor layanan, bukan akibat kegagalan material masif pada inti beton. Secara teknis, kombinasi hasil hammer test dan UPV menunjukkan bahwa beton masih berada pada kondisi struktural yang baik pada elemen utama, sehingga cadangan kekuatan (*reserved strength*) terhadap beban layanan masih tersedia pada tahap asesmen awal.

Hasil rebar scan digunakan sebagai informasi pendukung untuk memastikan keberadaan penulangan dan memperkirakan ketebalan selimut beton pada area tertentu. Pada zona semi-basement yang mengalami *spalling*, indikasi selimut beton yang terpapar kelembapan tinggi meningkatkan risiko korosi tulangan apabila tidak segera ditangani, dan hal ini dapat mengubah kerusakan lokal menjadi degradasi yang lebih luas. Walaupun penelitian ini tidak melakukan pembongkaran destruktif, data rebar scan berperan sebagai kontrol non-intrusif dalam menetapkan prioritas perbaikan durabilitas, karena pelindung utama tulangan terhadap korosi pada struktur beton bertulang adalah selimut beton yang utuh dan tidak mengalami retak lebar. Dengan demikian, *spalling* pada area lembap harus diperlakukan sebagai risiko progresif yang lebih prioritas untuk ditangani dibanding retak rambut pada balok sekunder yang masih relatif terkendali pada tahap ini.

Pengujian kekerasan Brinell pada elemen baja profil menunjukkan bahwa mutu material masih konsisten dengan baja setara BJ-37, dengan tidak ditemukannya indikasi penurunan signifikan pada *yield strength*, serta tidak teridentifikasi pengurangan penampang akibat korosi yang berarti. Temuan ini penting karena pada sistem komposit, kontribusi baja profil terhadap kapasitas dan kekakuan struktur dapat menjadi krusial, terutama saat bangunan mengalami perubahan fungsi menjadi museum yang meningkatkan tuntutan kinerja dan konsekuensi risiko pada penggunaan publik. Dalam konteks bangunan tua, kerentanan utama baja profil biasanya berada pada korosi tersembunyi, sambungan, atau area dengan eksposur kelembapan tinggi, sehingga hasil uji kekerasan yang stabil memberikan keyakinan bahwa baja masih dapat berfungsi sesuai peran strukturalnya, sepanjang sistem proteksi korosi dan kondisi lingkungan dapat dijaga.

Keandalan awal bangunan terhadap gempa pada penelitian ini ditafsirkan melalui integrasi antara kualitas material hasil NDT, kondisi kerusakan visual, serta implikasinya terhadap kemampuan elemen dalam menahan tuntutan beban gravitasi dan lateral. Mutu beton kolom utama yang berada pada estimasi 25-30 MPa memperlihatkan kapasitas material yang relatif baik, sedangkan mutu pelat sekitar 20 MPa menunjukkan kemampuan yang cukup sebagai elemen diafragma sepanjang peningkatan beban hidup akibat alih fungsi dapat dikelola secara memadai. Nilai UPV di atas 3,5 km/s menegaskan bahwa beton tidak menunjukkan degradasi internal serius yang dapat mempercepat mekanisme kegagalan, sedangkan mutu baja profil yang masih memadai menguatkan bahwa kontribusi sistem campuran tetap tersedia pada tahap ini. Secara umum, hasil tersebut mendukung penilaian bahwa bangunan berada pada kondisi material yang layak dan memiliki cadangan kekuatan awal untuk kebutuhan fungsi baru. Namun demikian, perubahan fungsi menjadi museum membawa konsekuensi peningkatan beban hidup dan potensi konsentrasi massa pada zona tertentu, yang pada akhirnya meningkatkan tuntutan gaya dalam elemen struktural, baik pada kondisi gravitasi maupun saat gempa. Berdasarkan analisis perhitungan yang mempertimbangkan tuntutan fungsi baru serta regulasi gempa terbaru, teridentifikasi indikasi kekritisitas kapasitas geser (*shear*) pada elemen tertentu, yang menunjukkan bahwa kelayakan material hasil NDT tidak secara otomatis menjamin kecukupan kinerja seismik. Kondisi ini menjadi penting karena kegagalan geser umumnya bersifat lebih getas dan memiliki margin deformasi peringatan yang lebih kecil dibanding kegagalan lentur, sehingga sensitivitas struktur terhadap peningkatan tuntutan lateral menjadi lebih tinggi. Pada bangunan cagar budaya dengan sistem campuran dinding pemikul, rangka beton bertulang, dan elemen baja, potensi ketidakberaturan distribusi kekakuan dan detail konstruksi era lama dapat memperbesar kerentanan tersebut ketika bangunan diharuskan memenuhi tuntutan gempa yang lebih modern.

Oleh karena itu, rekomendasi penanganan pada tahap ini difokuskan pada perbaikan lokal yang tidak merusak elemen historis namun efektif menghambat progresivitas kerusakan, yaitu *grouting epoksi* pada retak dan *patching* mortar pada area *spalling*, disertai pengendalian kelembapan dan inspeksi berkala pada zona semi-basement. Pada saat yang sama, hasil analisis menunjukkan perlunya evaluasi lanjutan yang lebih komprehensif untuk memastikan pemenuhan target kinerja minimum terhadap gempa sesuai regulasi terkini dan risiko penggunaan publik, termasuk verifikasi rinci kapasitas geser, evaluasi detailing elemen, pemeriksaan drift serta perilaku diafragma lantai, dan pemodelan struktur yang lebih representatif terhadap kondisi aktual. Hal ini sejalan dengan tujuan konservasi bahwa bangunan cagar budaya bukan hanya harus

aman dipakai pada masa kini, tetapi juga perlu diperpanjang usia layanannya agar tetap menjadi bukti sejarah yang dapat diwariskan dan dinikmati oleh generasi mendatang.

Kesimpulan

Penelitian ini menyajikan asesmen kondisi eksisting dan evaluasi keandalan awal bangunan cagar budaya kolonial (anonim) di wilayah Jakarta Barat berbasis pengujian tanpa merusak (*Non-Destructive Testing/NDT*), dengan merujuk kerangka penapisan FEMA P-154 serta prinsip evaluasi kinerja pada ASCE/SEI 41-17. Inspeksi visual mengidentifikasi retak rambut pada balok sekunder serta *spalling* selimut beton pada area semi-basement yang berkorelasi dengan paparan kelembapan, namun tidak ditemukan indikasi kerusakan global yang bersifat masif pada tahap pemeriksaan awal. Secara material, hasil *Schmidt rebound hammer* menunjukkan mutu beton kolom utama berada pada nilai pantul rata-rata $R > 35$ dengan estimasi kuat tekan $f'_c \approx 25-30 f'_c$ MPa (kategori baik), sedangkan pelat lantai memiliki $R \approx 30-32$ dengan estimasi $f'_c \approx 20 f'_c$ MPa (kategori cukup untuk bangunan lama). Temuan ini diperkuat oleh hasil UPV $> 3,5$ km/s yang mengindikasikan beton padat tanpa indikasi keropos internal signifikan, serta uji kekerasan Brinell pada elemen baja profil yang menunjukkan mutu setara BJ-37 tanpa indikasi kehilangan penampang akibat korosi yang berarti.

Meskipun hasil NDT menunjukkan kondisi material utama masih memadai dan secara umum bangunan dapat dinilai berada pada kategori layak fungsi pada tingkat evaluasi awal, analisis perhitungan yang mempertimbangkan alih fungsi bangunan menjadi museum (dengan peningkatan beban layanan) serta penerapan regulasi gempa terbaru mengindikasikan adanya potensi kekritisitas pada aspek kapasitas geser (*shear*) pada elemen tertentu. Temuan ini menegaskan bahwa kelayakan material tidak secara otomatis merepresentasikan kecukupan kinerja seismik, terutama pada bangunan heritage dengan sistem campuran dinding pemikul, rangka beton, dan elemen baja yang memiliki kerentanan khas terhadap mekanisme getas serta ketidakberaturan kekakuan.

Dengan demikian, penelitian ini diposisikan sebagai tahap awal (*baseline assessment*) yang perlu dilanjutkan dengan evaluasi struktural yang lebih komprehensif, meliputi pemodelan analisis berbasis kinerja, verifikasi kapasitas geser dan detailing elemen, pemeriksaan drift serta diafragma lantai, dan/atau pengujian tambahan yang relevan. Penelitian lanjutan juga diperlukan untuk memperluas pemahaman pada berbagai tipologi bangunan cagar budaya yang beragam, termasuk struktur URM (*Unreinforced Masonry*) maupun sistem komposit lainnya, mengingat konteks bahaya gempa yang signifikan serta kebutuhan pelestarian yang membatasi intervensi. Rekomendasi penanganan jangka pendek tetap difokuskan pada perbaikan lokal (*grouting epoksi* pada retak dan *patching* mortar pada *spalling*) untuk menjaga durabilitas, sedangkan keputusan perkuatan struktural (*retrofit*) perlu ditetapkan melalui kajian lanjutan yang mempertimbangkan tuntutan fungsi baru, tingkat risiko seismik, dan prinsip konservasi bangunan cagar budaya.

Daftar Rujukan

- [1] FEMA, FEMA P-154: Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards, 3rd ed. Washington, DC, USA: Federal Emergency Management Agency, 2015.
- [2] ASCE, ASCE/SEI 41-17: Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings. Reston, VA, USA: American Society of Civil Engineers, 2017.
- [3] A. Binda and A. Saisi, "Non-destructive testing for the diagnosis of historic masonry structures," *Construction and Building Materials*, vol. 24, no. 4, pp. 461–472, 2010.
- [4] ACI Committee 228, ACI 228.1R: In-Place Methods to Estimate Concrete Strength. Farmington Hills, MI, USA: American Concrete Institute, 2019.
- [5] BS EN 12504-2, Testing Concrete in Structures – Part 2: Non-destructive Testing – Determination of Rebound Number. London, UK: British Standards Institution, 2021.
- [6] ASTM C597, Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. West Conshohocken, PA, USA: ASTM

International, 2016.

- [7] ASTM E10, Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2023.
- [8] S. N. Al-Amin and M. T. Rashid, "Assessment of existing RC structures using UPV and rebound hammer test," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 15, e00650, 2021.
- [9] D. D'Ayala and S. Paganoni, "Assessment and analysis of damage in historic buildings," *Journal of Cultural Heritage*, vol. 12, no. 2, pp. 213–224, 2011.
- [10] P. B. Lourenço, "Computations on historic masonry structures," *Progress in Structural Engineering and Materials*, vol. 4, no. 3, pp. 301–319, 2002.
- [11] ASTM E18, Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2020.
- [12] RILEM TC 249-ISC, "Recommendations for the non-destructive assessment of concrete structures," *Materials and Structures*, vol. 52, 2019.
- [13] A. Alwash, A. A. Abdul-Razzaq, and A. Al-Sultani, "Reliability of NDT methods for concrete quality evaluation: a review," *Structures*, vol. 44, 2022.
- [14] M. M. Abd and A. M. Abbas, "Durability assessment of reinforced concrete in humid environments using NDT," *Construction and Building Materials*, vol. 330, 2022.
- [15] S. M. A. Rahman and M. A. Hasnat, "NDT-based condition assessment for retrofit decision of existing buildings," *Engineering Failure Analysis*, vol. 137, 2022.
- [16] A. Saisi and C. Gentile, "Structural health monitoring and diagnosis for historic buildings: recent advances," *Journal of Cultural Heritage*, vol. 49, 2021.
- [17] A. D'Ambrisi, P. F. Giordano, and A. De Felice, "Non-destructive techniques for assessment of existing structures: state of practice," *Materials*, vol. 13, no. 24, 2020.
- [18] A. J. Kruse and T. J. Wipf, "Performance-based seismic evaluation of existing buildings: practical considerations," *Journal of Performance of Constructed Facilities*, vol. 34, no. 6, 2020.
- [19] A. Ghaedi, M. R. Esfahani, and H. R. Ronagh, "Epoxy injection and patch repair effectiveness for cracked RC elements," *Construction and Building Materials*, vol. 298, 2021.