

Penerapan Metode Evaluasi Struktur Terkini pada Bangunan Lama di Wilayah Seismik Aktif Sulawesi Utara

Clief Arther Lasut¹

Rekayasa Perawatan dan Restorasi Bangunan Gedung, Teknik Sipil, Politeknik Negeri Manado¹
E-mail: hirogianlasut@gmail.com

Abstrak

Wilayah Sulawesi Utara merupakan salah satu zona seismik aktif di Indonesia yang memiliki potensi kerusakan signifikan pada bangunan, khususnya bangunan lama yang dibangun tanpa mempertimbangkan standar tahan gempa modern. Penelitian ini bertujuan untuk menerapkan metode evaluasi struktur terbaru terhadap bangunan lama guna menilai kelayakan strukturalnya dalam menghadapi beban gempa. Metode evaluasi yang digunakan mengacu pada *Guidelines for Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings (ASCE/SEI 41-23)* dan analisis berbasis perangkat lunak struktur seperti ETABS atau SAP2000. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa beberapa elemen struktural mengalami penurunan kapasitas dan memerlukan tindakan perkuatan (*retrofitting*). Studi ini memberikan gambaran pentingnya pembaruan sistem evaluasi struktur serta menjadi acuan dalam pengambilan keputusan teknis untuk perlindungan aset dan keselamatan publik di wilayah rawan gempa.

Kata kunci — Evaluasi Struktur, Bangunan Lama, Zona Seismik, Sulawesi Utara, *Retrofitting*, ASCE.

1. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara dengan tingkat aktivitas seismik yang tinggi akibat pertemuan tiga lempeng tektonik besar. Gempa bumi besar seperti yang terjadi di Aceh (2004), Yogyakarta (2006), Padang (2009), dan Palu (2018) menunjukkan urgensi evaluasi struktur bangunan terhadap bahaya seismik. Banyak bangunan lama, khususnya yang dibangun sebelum diberlakukannya standar gempa terbaru seperti SNI 1726:2019 dan ASCE/SEI 41-17, memiliki potensi kerentanan struktural yang signifikan. Salah satu sistem struktur yang rentan terhadap beban gempa adalah flat plate system, karena ketiadaan elemen balok utama yang mendistribusikan beban lateral secara efektif. Oleh karena itu, evaluasi seismik berbasis kinerja (*performance-based seismic evaluation*) menjadi penting untuk menilai kelayakan dan menentukan strategi perkuatan bangunan eksisting. Studi ini mengevaluasi performa seismik sebuah gedung perkantoran enam lantai di Jakarta dengan sistem plat datar, menggunakan prosedur ASCE/SEI 41-17 secara bertahap (Tier 1 hingga Tier 3), untuk menilai apakah bangunan tersebut masih memenuhi kriteria keselamatan struktural terhadap gempa dengan periode ulang 975 tahun (BSE-2E). (Andrew et al. 2025)

Evaluasi struktur terhadap beban gempa menjadi penting dalam perancangan dan penilaian bangunan eksisting, khususnya di wilayah rawan gempa seperti Indonesia. Salah satu metode analisis yang umum digunakan adalah *pushover analysis*, yang memberikan gambaran perilaku nonlinier struktur setelah melewati titik leleh. Dalam praktiknya, akurasi hasil *pushover* sangat dipengaruhi oleh detail pemodelan numerik, termasuk keberadaan pelat lantai (*floor slabs*) dan titik penyisipan elemen struktur. Studi ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh pelat lantai dan

variasi titik penyisipan (centroid vs top-center) terhadap kapasitas seismik struktur dengan sistem dinding geser rangka (*frame shear walls*) pada sebuah bangunan rumah sakit bertingkat di Yogyakarta. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap peningkatan akurasi pemodelan dalam analisis seismik bangunan eksisting. (Sweiga, Satyarno, and Supriyadi 2023)

Kondisi Seismik di Sulawesi Utara Sulawesi Utara merupakan wilayah yang terletak pada pertemuan tiga lempeng tektonik utama, yaitu Lempeng Eurasia, Lempeng Indo-Australia, dan Lempeng Pasifik, menjadikannya sebagai zona seismik aktif dengan potensi gempa bumi yang tinggi. Data seismisitas periode 2019–2023 menunjukkan bahwa wilayah ini mengalami aktivitas gempa yang signifikan, dengan nilai *a-value* berkisar antara 6,16 hingga 8,13 dan *b-value* antara 0,91 hingga 1,32, mengindikasikan tingkat keaktifan dan kerapuhan batuan yang tinggi. (Sangi et al. 2024) Salah satu pendekatan utama yang diakui secara internasional adalah metode *performance-based seismic evaluation* yang tertuang dalam ASCE/SEI 41-17 maupun revisi terbaru ASCE/SEI 41-23 (American Society of Civil Engineers, 2023). Pendekatan ini membagi proses evaluasi ke dalam tiga *tier*, yaitu *screening* (Tier 1), *deficiency-based evaluation* (Tier 2), dan *systematic performance evaluation* (Tier 3) yang masing-masing disesuaikan dengan tingkat kompleksitas dan urgensi bangunan yang ditinjau (Andrew, Herlina, and Wijanto 2024).

Evaluasi struktur bangunan lama, terutama bangunan bersejarah yang terletak di zona seismik aktif, merupakan tantangan teknis yang kompleks karena bentuk geometri yang tidak beraturan, kondisi material yang memburuk, dan sejarah intervensi struktural yang panjang. Dalam kajian oleh Zucca et al. (2024), dikembangkan pendekatan multidisipliner untuk menilai perilaku seismik dua gereja ikonik di Italia—Basilika Santa Maria Novella di Florence dan Santa Maria di Collemaggio di L'Aquila—dengan mengintegrasikan teknologi *laser scanning*, *terrestrial photogrammetry*, dan analisis numerik berbasis *finite element method* (FEM) (Zucca et al. 2024). Dalam kajian kritis oleh Ronchetti dan Borri (2021), dibahas bahwa pendekatan evaluasi seismik pada bangunan tua dapat dilakukan pada tiga skala operasional: makro (wilayah/kawasan), meso (kelompok bangunan homogen), dan mikro (analisis mendalam pada satu bangunan). Untuk skala makro, teknik *simplified vulnerability indices* digunakan, sementara pada skala mikro, diperlukan pemodelan numerik berbasis *finite element method* (FEM), baik linier maupun non-linier. (Lourenço and Karanikoloudis 2018)

Standar **ASCE/SEI 41-23** merupakan pembaruan dari standar sebelumnya yang menyediakan pedoman untuk evaluasi dan perkuatan bangunan eksisting terhadap bahaya gempa. Standar ini memperkenalkan pendekatan berbasis kinerja (***performance-based approach***) dan prosedur analisis nonlinier yang lebih komprehensif, termasuk penggunaan model plastisitas terdistribusi dan kriteria penerimaan yang diperbarui. (Asıkoğlu, Vasconcelos, and Lourenço 2021) Evaluasi keamanan seismik dan perkuatan bangunan eksisting merupakan topik utama dalam rekayasa struktur modern, terutama pada bangunan yang tidak dirancang sesuai standar seismik terkini. Dalam tinjauan komprehensif oleh Asıkoğlu, Vasconcelos, dan Lourenço (2021), dibahas penerapan standar ASCE/SEI 41, yang merupakan acuan utama dalam evaluasi dan perkuatan bangunan eksisting di Amerika Serikat dan negara-negara lain yang mengadopsi pendekatan berbasis kinerja (***performance-based approach***). (Mokarram et al. 2024)

Dalam konteks penerapan global, termasuk Indonesia, efektivitas tiga metode utama yang sering dirujuk dalam standar ASCE/SEI 41-23, yaitu *Coefficient Method* (CM), *Capacity Spectrum Method* (CSM), dan *Modal Pushover Analysis* (MPA). Melalui lebih dari 25.000 analisis *nonlinear time history* (NTHA) terhadap model struktur baja tidak beraturan, penelitian ini mengungkapkan bahwa metode CM dan CSM memiliki akurasi rendah pada bangunan dengan

ketidakaturan lateral-torsional dan efek $P-\Delta$ yang signifikan. Ini sangat relevan untuk konteks Indonesia, khususnya Jakarta, di mana banyak bangunan eksisting memiliki konfigurasi asimetris dan dibangun berdasarkan standar lama yang tidak mempertimbangkan perilaku dinamis secara menyeluruh..(Mokarram et al. 2024) Standar ASCE/SEI 41-23 merupakan pembaruan signifikan dalam pendekatan evaluasi dan perkuatan struktur bangunan eksisting terhadap bahaya gempa. Dibanding versi sebelumnya (ASCE 41-17), standar ini memperkenalkan prosedur evaluasi yang lebih rinci, penggunaan analisis nonlinier yang ditingkatkan, serta pendekatan berbasis kinerja (*performance-based*) yang lebih fleksibel dan realistis dalam menggambarkan respons struktur.(Fihunissa 2024)

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan simulasi numerik dengan metode *pushover analysis* untuk mengevaluasi kinerja seismik bangunan eksisting. Objek studi adalah gedung parkir bertingkat tiga di Kota Madiun. Pemodelan struktur dilakukan menggunakan ETABS dengan memasukkan data geometri elemen struktur, mutu material berdasarkan uji lapangan, serta asumsi perletakan kaku.

Beban gempa dihitung menggunakan metode gaya statik ekuivalen sesuai SNI 1726:2012. Analisis pushover dilakukan dengan memberi beban lateral secara bertahap hingga struktur menunjukkan respons nonlinier. Kurva kapasitas diperoleh dari hubungan antara gaya geser dasar dan perpindahan atap. Selanjutnya, performa struktur dievaluasi berdasarkan pembentukan sendi plastis dan nilai *interstory drift* untuk menentukan level kinerja struktur terhadap gempa.(Wibowo, Rohman, and Cahyono 2021)

Penelitian ini menggunakan metode *Performance-Based Seismic Evaluation (PBSE)* dengan analisis statik nonlinier (*pushover analysis*) untuk mengevaluasi kinerja seismik bangunan eksisting. Objek studi adalah Gedung Wari Medan, sebuah bangunan 3 lantai dengan sistem struktur rangka beton bertulang.

Struktur dimodelkan dalam program SAP2000 dengan beban mati, beban hidup, dan beban gempa berdasarkan SNI 03-1726-2002. Analisis pushover dilakukan untuk mendapatkan kurva kapasitas dan titik kinerja (*performance point*), yang kemudian dievaluasi berdasarkan pedoman ATC-40 dan FEMA-356. Kriteria kinerja bangunan dianalisis berdasarkan nilai *drift ratio* maksimum dan distribusi sendi plastis untuk menentukan level kinerja seperti *Immediate Occupancy (IO)*, *Life Safety (LS)*, atau *Collapse Prevention (CP)*.(Handana, Karolina, and Steven 2018).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Evaluasi struktur bangunan eksisting dilakukan terhadap sebuah gedung kantor yang berlokasi di Indonesia, menggunakan pendekatan *performance-based* sesuai dengan standar **ASCE/SEI 41-17**. Pendekatan ini dipilih karena dianggap mampu mengakomodasi kondisi aktual struktur yang telah berusia tua dan kemungkinan besar tidak dirancang berdasarkan ketentuan gempa modern. Melalui tahapan evaluasi **Tier 1** yang bersifat kualitatif, diidentifikasi bahwa bangunan memiliki potensi kelemahan struktural, khususnya pada elemen-elemen kolom dan balok dengan bentang panjang. Evaluasi ini kemudian dilanjutkan dengan **analisis nonlinier statik (pushover analysis)**, yang memberikan gambaran lebih mendalam terkait respons struktur terhadap beban gempa bertahap.(Sulthan et al. 2023)

Hasil penelitian yang terangkum dalam artikel ini menunjukkan bahwa pendekatan *Performance-Based Seismic Design (PBSD)* secara signifikan meningkatkan performa seismik bangunan,

terutama ketika diterapkan pada struktur eksisting di kawasan rawan gempa. Dalam beberapa studi kasus, simulasi perkuatan melalui sistem eksoskeleton baja ringan, viscoelastic dampers, dan sistem hybrid dual-frame mampu menggeser level kinerja struktur dari kondisi *Life Safety* (LS) menuju *Immediate Occupancy* (IO). Perubahan level kinerja ini menunjukkan peningkatan signifikan dalam kapasitas struktur untuk tetap berfungsi segera setelah gempa besar terjadi. (Nastri and Pisapia 2025)

Penelitian ini mengevaluasi kinerja seismik Rumah Sakit Cut Nyak Dhien di Aceh menggunakan metode pushover analysis berbasis ATC-40. Hasil analisis menunjukkan bahwa struktur bangunan memenuhi kriteria perpindahan antar lantai yang ditetapkan oleh SNI 1726:2019, dengan nilai drift aktual 0,0126 (arah x) dan 0,0081 (arah y), keduanya berada dalam batas aman. Level kinerja struktur dikategorikan dalam zona *Immediate Occupancy* (IO), yang berarti kerusakan akibat gempa terbatas pada elemen non-struktural dan tidak membahayakan keselamatan pengguna.

Distribusi sendi plastis menunjukkan pola pelumeran yang sesuai dengan prinsip *strong column-weak beam*, menandakan perilaku struktur yang baik terhadap beban gempa. Pushover dilakukan dalam 9-11 tahap hingga struktur menunjukkan perilaku inelastis. Hasil ini menegaskan bahwa metode evaluasi berbasis kinerja efektif dalam menilai kapasitas struktur dan memberikan dasar teknis untuk perkuatan bila diperlukan. (Zebua et al. 2023)

4. KESIMPULAN

Studi ini menegaskan pentingnya penerapan metode evaluasi struktur berbasis kinerja (Performance-Based Seismic Evaluation/PBSE) dalam menilai dan meningkatkan kelayakan bangunan lama di zona seismik aktif seperti Sulawesi Utara. Dengan mengadopsi standar terkini seperti **ASCE/SEI 41-17 dan ASCE/SEI 41-23**, serta menggunakan **analisis pushover** berbantuan perangkat lunak seperti ETABS dan SAP2000, evaluasi struktur dapat dilakukan secara lebih akurat dan komprehensif. Hasil penelitian menunjukkan bahwa:

- Banyak bangunan lama tidak memenuhi standar keamanan seismik terbaru dan memerlukan perkuatan struktural (retrofitting).
- Pendekatan berbasis kinerja mampu mengidentifikasi titik lemah struktur dan meningkatkan level kinerja bangunan dari *Life Safety* (LS) ke *Immediate Occupancy* (IO).
- Evaluasi berbasis simulasi numerik sangat membantu dalam pengambilan keputusan teknis terhadap bangunan eksisting di kawasan rawan gempa.

Dengan demikian, studi ini memberikan kontribusi signifikan dalam pengembangan strategi mitigasi risiko gempa melalui penerapan metode evaluasi struktur yang lebih mutakhir dan berbasis ilmiah.

DAFTAR PUSTAKA

Andrew, Jonathan, Liana Herlina, and Sugeng Wijanto. 2024. "EFEKTIVITAS TINGKAT DALAM EVALUASI SEISMIC BANGUNAN EKSISTING BERDASARKAN ASCE 41-17 EFFECTIVENESS OF TIER ON SEISMIC EVALUATION OF EXISTING BUILDINGS BASED ON ASCE 41-17." 02(01):73–78.

Andrew, Jonathan, Liana Herlina, Sugeng Wijanto, and Usman Wijaya. 2025. "A Study Case: Seismic Evaluation of Existing Six-Story Office Building with Flat Plate Structural System." *Materials Research Proceedings* 48:135–42. doi: 10.21741/9781644903414-16.

- Asıkoğlu, Abide, Graça Vasconcelos, and Paulo B. Lourenço. 2021. "Overview on the Nonlinear Static Procedures and Performance-Based Approach on Modern Unreinforced Masonry Buildings with Structural Irregularity." *Buildings* 11(4). doi: 10.3390/buildings11040147.
- Fiqhunissa, Ananda Elnish. 2024. "Seismic Performance Evaluation of Irregular Auditorium Building Based on Asce 41-17 Master Programme in Civil Engineering Department of Civil and Environmental Engineering Faculty of Engineering Gadjah Mada University 2024." (September). doi: 10.22146/jcef.13306.
- Handana, M. A. P., R. Karolina, and Steven. 2018. "Performance Evaluation of Existing Building Structure with Pushover Analysis." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 309(1):0–7. doi: 10.1088/1757-899X/309/1/012039.
- Lourenço, Paulo B., and Georgios Karanikoloudis. 2018. "Seismic Behavior and Assessment of Masonry Heritage Structures. Needs in Engineering Judgement and Education." *RILEM Technical Letters* 3(2018):114–20. doi: 10.21809/rilemtechlett.2018.76.
- Mokarram, Vahid, Mahmoud Reza Banan, Mohammad Reza Banan, and Abdollah Kheyri. 2024. *A Critical Evaluation of the Coefficient Method, Capacity Spectrum Method and Modal Pushover Analysis for Irregular Steel Buildings in Seismic Zones*.
- Nastri, Elide, and Alessandro Pisapia. 2025. "Performance-Based Seismic Design." *Applied Sciences (Switzerland)* 15(5):4–9. doi: 10.3390/app15052254.
- Sangi, Monika Siska, Rolles N. Palilingan, Armstrong F. Sompotan, and Stasiun Geofisika. 2024. "ANALISIS PARAMETER KEGEMPAAN A-VALUE DAN b-VALUE DI PROVINSI SULAWESI UTARA PERIODE 2019-2023 ANALYSIS OF a-VALUE AND b-VALUE SEISMIC PARAMETERS IN NORTH SULAWESI PROVINCE FOR THE 2019-2023 PERIOD." 7(2).
- Sulthan, Faiz, Angga Arief Gumilang S, Muhammad Rusli, and Matsutaro Seki. 2023. "Seismic Evaluation of Existing Building Structure Using United States (ASCE 41-17) and Japanese (JBDPA) Standard: Case Study Office Building in Indonesia." *E3S Web of Conferences* 429. doi: 10.1051/e3sconf/202342905001.
- Sweiga, A. G. Y., I. Satyarno, and B. Supriyadi. 2023. "The Effect of Floor Slabs in a Structure with Frame Shear Walls Modeling in Pushover Analysis." *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 1244(1). doi: 10.1088/1755-1315/1244/1/012015.
- Wibowo, Rendi Gusta, Rosyid Kholilur Rohman, and Setiyo Daru Cahyono. 2021. "Seismic Evaluation of Existing Building Structures in the City of Madiun Using Pushover Analysis." *Journal of Physics: Conference Series* 1845(1). doi: 10.1088/1742-6596/1845/1/012032.
- Zebua, Dermawan, As Andika Sah Putra, Leonardus Setia Budi Wibowo, and Sania Alfiani. 2023. "Evaluation of Seismic Performance of Hospital Building Using Pushover Analysis Based on Atc-40." *Journal of Civil Engineering, Science and Technology* 14(2):138–45. doi: 10.33736/jcest.5326.2023.
- Zucca, Marco, Emanuele Reccia, Enrica Vecchi, Valentina Pintus, Andrea Dessì, and Antonio Cazzani. 2024. "An Evaluation of the Structural Behaviour of Historic Buildings Under Seismic Action: A Multidisciplinary Approach Using Two Case Studies." *Applied Sciences (Switzerland)* 14(22). doi: 10.3390/app142210274.
