

STUDI PERBANDINGAN BIAYA-MANFAAT *RETROFITTING* STRUKTUR BANGUNAN EKSISTING BERDASARKAN *TIER 1 ANALYSIS* ASCE 41-17

Gilbert Hartman¹, Basuki Anondho¹, Mega Waty^{1*}, dan Julian Thedja²

¹Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No. 1, Jakarta, Indonesia

²PT Miyamoto International Indonesia, JB Tower Level 10, 1027C, Jl. Kebon Sirih No.48-50, Jakarta Indonesia

*mega@ft.untar.ac.id

Masuk: 01-07-2025, revisi: 31-07-2025, diterima untuk diterbitkan: 08-08-2025

ABSTRACT

A significant proportion of existing buildings in Indonesia were constructed prior to the adoption of modern seismic design standards, resulting in a high level of vulnerability to earthquakes. This poses a serious threat to occupant safety and the continuity of building functionality during seismic events. This study aims to evaluate retrofitting strategies using the ASCE 41-17 approach to enhance the seismic resilience of existing structures. A total of eight buildings in the Jakarta area were analyzed using the Tier 1 checklist to identify structural vulnerabilities. Based on field inspections, retrofit methods such as the addition of structural elements, column jacketing, expansion joints, and detailed structural surveys were proposed. Cost estimates were prepared through a Bill of Quantities (BOQ) and evaluated using a Benefit-Cost Analysis approach. The results indicate that most retrofit methods yield benefit-cost ratios significantly greater than 1, suggesting that the benefits of improved seismic performance outweigh the associated costs. This study provides practical and effective retrofit recommendations, which can serve as a reference for policymakers, building owners, and civil engineering practitioners in planning structural strengthening of existing buildings in earthquake-prone areas.

Keywords: Retrofitting, Seismic Resilience; ASCE 41-17; Cost-Benefit Analysis; Earthquake Risk Mitigation

ABSTRAK

Sebagian besar bangunan eksisting di Indonesia dibangun sebelum adopsi standar desain seismik yang mutakhir, sehingga memiliki tingkat kerentanan tinggi terhadap gempa bumi. Kondisi ini menjadi ancaman serius bagi keselamatan penghuni dan keberlanjutan fungsi bangunan saat bencana terjadi. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi strategi retrofitting menggunakan pendekatan ASCE 41-17 untuk meningkatkan ketahanan seismik bangunan eksisting. Sebanyak 8 bangunan di wilayah Jakarta dianalisis menggunakan checklist Tier 1 untuk mengidentifikasi kerentanan struktural. Berdasarkan hasil inspeksi lapangan, ditentukan metode retrofit seperti penambahan elemen struktur, jacketing, sambungan dilatasi, dan survei detail struktur. Estimasi biaya disusun melalui Rencana Anggaran Biaya (RAB) dan dianalisis menggunakan pendekatan Analisis Biaya-Manfaat. Hasil menunjukkan sebagian besar metode retrofit memiliki nilai signifikan di atas 1, menandakan bahwa manfaat yang diperoleh dari peningkatan ketahanan terhadap gempa melebihi biaya yang diperlukan. Penelitian ini memberikan rekomendasi solusi retrofit yang layak dan efektif, serta dapat dijadikan acuan bagi pemangku kebijakan, pemilik bangunan, maupun praktisi teknik sipil dalam merencanakan penguatan struktur bangunan eksisting di wilayah rawan gempa.

Kata kunci: *Retrofitting*; Ketahanan Seismik; ASCE 41-17; Analisis Biaya-Manfaat; Mitigasi Risiko Gempa

1. PENDAHULUAN

Indonesia terletak di zona pertemuan tiga lempeng tektonik utama dunia, yaitu Eurasia, Indo-Australia, dan Pasifik (Damayanti et al., 2020). Posisi ini menjadikan wilayah Indonesia sangat aktif secara seismik dan rawan terhadap gempa bumi (Natawidjaja, 2021). Aktivitas tektonik tersebut memicu terbentuknya sesar aktif dan zona megathrust yang tersebar di berbagai wilayah, yang meningkatkan potensi bencana, terutama di kawasan padat penduduk seperti Pulau Jawa dan Sumatra (Amri et al., 2016).

Sejarah mencatat beberapa gempa besar yang menyebabkan kerusakan infrastruktur parah dan korban jiwa dalam jumlah besar. Gempa dan tsunami Aceh tahun 2004 dengan magnitudo Mw 9,1–9,3 mengakibatkan lebih dari 230.000 kematian dan kerugian ekonomi di atas 51 triliun Rupiah. Bangunan-bangunan yang tidak memenuhi standar ketahanan gempa, terutama rumah tinggal dan fasilitas publik, menjadi yang paling terdampak.

Hal serupa terjadi pada gempa Palu tahun 2018 yang disertai tsunami dan likuifaksi tanah. Ribuan bangunan, termasuk jembatan dan area perumahan, mengalami keruntuhan, menewaskan lebih dari 4.000 orang, dengan kerugian

mencapai 13 triliun Rupiah. Bencana-bencana ini menekankan urgensi penerapan standar konstruksi tahan gempa dan strategi mitigasi risiko yang lebih efektif.

DKI Jakarta merupakan salah satu wilayah dengan indeks risiko bencana tinggi, terutama dari segi jumlah penduduk terpapar dan potensi kerugian ekonomi. Estimasi jumlah penduduk terdampak mencapai lebih dari 11 juta jiwa dengan potensi kerugian fisik dan ekonomi sebesar 13,8 triliun Rupiah (KRB BNPB, 2021). Klasifikasi kerentanan yang tinggi ini mengindikasikan perlunya tindakan antisipatif, termasuk penerapan metode perkuatan struktur pada bangunan eksisting.

Tabel 1 Potensi jumlah penduduk terpapar bencana gempa bumi di Provisi DKI Jakarta (KRB BNPB, 2021)

No	Kabupaten/Kota	Jumlah Penduduk Terpapar (Jiwa)	Potensi Penduduk Terpapar (Jiwa)			Kelas
			Kelompok Rentan			
			Penduduk Umur Rentan	Penduduk Miskin	Penduduk Disabilitas	
1	Administrasi Kepulauan Seribu	29.418	3.367	2.147	128	sedang
2	Kota Administrasi Jakarta Barat	2.585.144	258.407	75.140	842	sedang
3	Kota Administrasi Jakarta Pusat	1.136.029	116.377	46.484	481	sedang
4	Kota Administrasi Jakarta Selatan	2.373.219	232.927	94.860	530	sedang
5	Kota Administrasi Jakarta Timur	3.258.691	323.592	95.701	863	sedang
6	Kota Administrasi Jakarta Utara	1.863.567	190.625	93.442	967	sedang
	Provinsi DKI Jakarta	11.246.068	1.125.295	407.774	3.811	sedang

Tabel 2 Potensi kerugian bencana gempa bumi di Provinsi DKI Jakarta (KRB BNPB, 2021)

No	Kabupaten/Kota	Kerugian (juta Rupiah)			Potensi Kerusakan Lingkungan		
		Kerugian Fisik	Kerugian Ekonomi	Total Kerugian	Kelas Kerugian	Luas	Kelas
1	Administrasi Kepulauan Seribu	5	677.655	677.660	rendah	-	-
2	Kota Administrasi Jakarta Pusat	866.627	1.020.802	1.887.429	sedang	-	-
3	Kota Administrasi Jakarta Utara	876.377	169.475	1.045.852	tinggi	-	-
4	Kota Administrasi Jakarta Barat	2.104.433	402.566	2.506.999	tinggi	-	-
5	Kota Administrasi Jakarta Selatan	3.225.982	195.099	3.421.081	tinggi	-	-
6	Kota Administrasi Jakarta Timur	4.229.664	114.169	4.343.833	tinggi	-	-
	Provinsi DKI Jakarta	11.303.088	2.579.765	13.882.853	tinggi	-	-

Tabel 3 Kelas kerentanan bencana gempa bumi di provinsi DKI Jakarta (KRB BNPB, 2021)

Kabupaten/Kota	Kelas Penduduk Terpapar	Kelas Kerugian	Kelas Kerusakan Lingkungan	Kelas Kerentanan
Administrasi Kepulauan Seribu	sedang	rendah	-	sedang
Kota Administrasi Jakarta Pusat	sedang	sedang	-	sedang
Kota Administrasi Jakarta Utara	sedang	tinggi	-	sedang
Kota Administrasi Jakarta Barat	sedang	tinggi	-	sedang
Kota Administrasi Jakarta Selatan	sedang	tinggi	-	sedang
Kota Administrasi Jakarta Timur	sedang	tinggi	-	sedang
Provinsi DKI Jakarta	sedang	tinggi	-	sedang

Bangunan eksisting di Indonesia umumnya memiliki berbagai kerentanan struktural seperti konfigurasi soft story, ketidakaturan geometrik, sambungan tidak memadai, serta kekurangan tulangan geser. Faktor-faktor ini sering diperburuk oleh degradasi material akibat usia bangunan dan minimnya perawatan. Menurut Chad et al. (2025), bangunan dengan soft story mengalami peningkatan signifikan dalam interstory drift dan gaya geser, yang berkontribusi besar terhadap keruntuhan lokal. Selain itu, konfigurasi weak column–strong beam menyebabkan

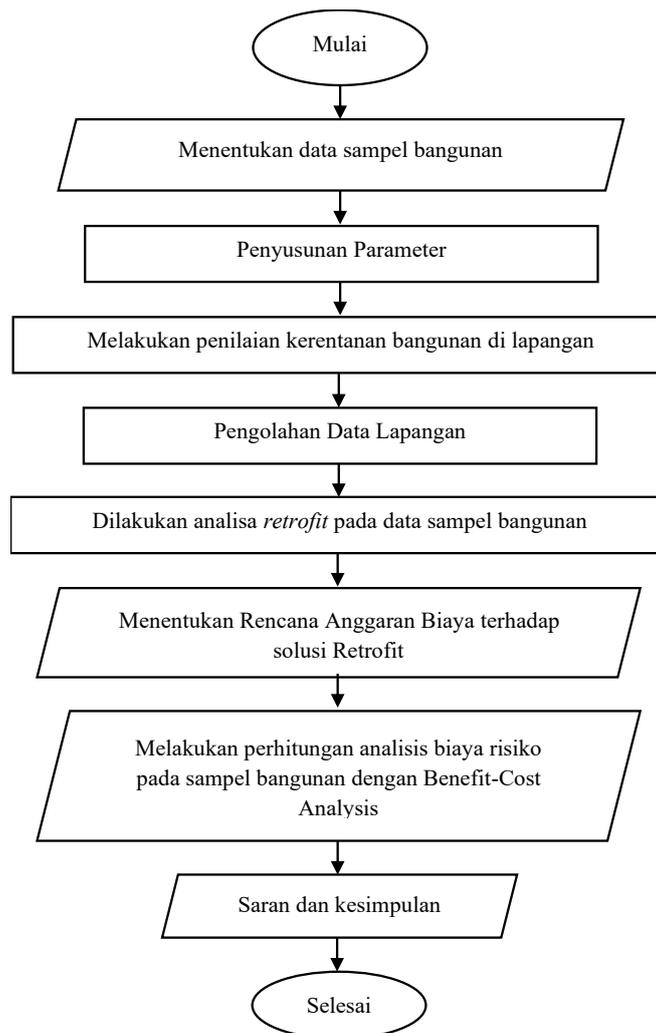
mekanisme kegagalan yang tidak efektif dalam menyerap energi gempa. Identifikasi awal terhadap kerentanan ini sangat penting dan dapat dilakukan melalui pendekatan observasional pada Tier 1 ASCE 41-17.

Salah satu pendekatan yang digunakan untuk mengevaluasi kelayakan strategi mitigasi gempa adalah Benefit-Cost Analysis (BCA). Pendekatan ini menilai efektivitas metode retrofit dari sudut pandang ekonomi, dengan mengkuantifikasi pengurangan risiko kerusakan dan korban jiwa dalam satuan moneter. Liel & Deierlein (2013) menekankan bahwa metode retrofit dapat dianggap layak jika total biayanya tidak melebihi 50% dari estimasi biaya rekonstruksi bangunan. Meskipun tidak selalu menguntungkan secara finansial dalam konteks penghematan langsung, pertimbangan keselamatan membuat strategi ini tetap relevan, khususnya di wilayah berisiko tinggi.

Metode retrofit seperti penambahan dilatasi (Fajari & Sumarsono, 2018), penambahan elemen struktur, dan jacketing telah banyak dikembangkan untuk meningkatkan kapasitas struktur terhadap gempa. Pemilihan metode retrofit yang optimal sangat bergantung pada kondisi bangunan, lokasi, dan efisiensi implementasi dalam hal biaya dan waktu. Dalam konteks manajemen rekayasa konstruksi, kombinasi antara efektivitas struktural dan efisiensi proyek menjadi faktor kunci dalam menentukan strategi perkuatan bangunan.

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas dan kelayakan ekonomi beberapa metode retrofitting bangunan eksisting dengan mengacu pada standar ASCE 41-17. Analisis dilakukan dengan pendekatan Benefit-Cost Analysis dan prinsip rekayasa ekonomi untuk mengidentifikasi solusi yang optimal dalam meningkatkan ketahanan seismik bangunan pendidikan, khususnya di wilayah rawan gempa seperti DKI Jakarta. Dengan pendekatan komprehensif ini, diharapkan hasil penelitian dapat memberikan dasar yang kuat bagi pengambilan keputusan dalam perencanaan mitigasi risiko struktural.

2. METODE PENELITIAN



Gambar 1 Diagram alir penelitian

Metode penelitian diawali dengan identifikasi permasalahan terkait kerentanan bangunan eksisting terhadap gempa bumi, yang dianalisis menggunakan pendekatan standar ASCE 41-17. Tahap awal melibatkan pemilihan sampel bangunan yang akan ditinjau, diikuti oleh penyusunan parameter penilaian lapangan yang mengacu pada daftar periksa (quick checklist) Tier 1.

Selanjutnya, dilakukan inspeksi langsung di lapangan untuk menilai kondisi struktural dan tingkat kerentanan bangunan terhadap gempa. Data lapangan yang diperoleh kemudian diolah dan dianalisis untuk mengidentifikasi jenis kerentanan dominan. Berdasarkan hasil evaluasi tersebut, ditentukan metode retrofitting yang paling sesuai, seperti penambahan elemen struktur, jacketing, dilatasi, atau survey topografi dan laser rebar scan (survey detail struktur).

Setelah metode retrofit dipilih, dilakukan penyusunan rencana anggaran biaya. Tahap berikutnya adalah analisis ekonomi menggunakan pendekatan Benefit-Cost Analysis untuk membandingkan biaya retrofit dengan potensi kerugian yang dapat terjadi jika bangunan mengalami keruntuhan saat gempa.

Kesimpulan akhir dari penelitian ini berisi rekomendasi metode retrofitting yang optimal bagi bangunan eksisting di wilayah rawan gempa, dengan mempertimbangkan aspek teknis, efisiensi biaya, dan keberlanjutan. Diagram alir dari keseluruhan proses penelitian ini disajikan pada Gambar 1.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil analisis menggunakan checklist Tier 1 ASCE 41-17 pada Tabel 17-3 dan Tabel 17-23, teridentifikasi sejumlah kerentanan struktural pada bangunan yang tidak memenuhi kriteria evaluasi. Kerentanan tersebut mencakup kurangnya sistem redundansi pada elemen penahan gaya lateral, potensi kegagalan akibat torsi, kelemahan pada kapasitas geser kolom, serta ketiadaan dokumen teknis penting seperti laporan teknis bangunan dan As Built Drawing yang menjadi salah satu persyaratan dalam penerbitan Sertifikat Laik Fungsi (SLF). Rincian data hasil inspeksi lapangan disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4 Hasil kerentanan yang ditemukan

Kode Bangunan	Tipe Kerentanan
BLDG-001	Ketidakseimbangan distribusi massa atau kekakuan pada bangunan dengan bentuk iregular, kekurangan jalur rangka momen alternatif penyalur gaya, kurangnya data teknis dan gambar as-built menghambat verifikasi detail penulangan dan penyambungan struktur, terjadinya gaya geser berlebih terhadap kolom.
BLDG-002	Ketidakseimbangan distribusi massa atau kekakuan pada bangunan dengan bentuk iregular, kurangnya data teknis dan gambar as-built menghambat verifikasi detail penulangan dan penyambungan struktur, terjadinya gaya geser berlebih terhadap kolom.
BLDG-003	Ketidakseimbangan distribusi massa atau kekakuan pada bangunan dengan bentuk iregular, kurangnya data teknis dan gambar as-built menghambat verifikasi detail penulangan dan penyambungan struktur, terjadinya gaya geser berlebih terhadap kolom.
BLDG-004	Ketidakseimbangan distribusi massa atau kekakuan pada bangunan dengan bentuk iregular, kekurangan jalur rangka momen alternatif penyalur gaya, kurangnya data teknis dan gambar as-built menghambat verifikasi detail penulangan dan penyambungan struktur.
BLDG-005	Ketidakseimbangan distribusi massa atau kekakuan pada bangunan dengan bentuk iregular, kekurangan jalur rangka momen alternatif penyalur gaya, kurangnya data teknis dan gambar as-built menghambat verifikasi detail penulangan dan penyambungan struktur.
BLDG-006	Ketidakseimbangan distribusi massa atau kekakuan pada bangunan dengan bentuk iregular, kurangnya data teknis dan gambar as-built menghambat verifikasi detail penulangan dan penyambungan struktur.
BLDG-007	kurangnya data teknis dan gambar as-built menghambat verifikasi detail penulangan dan penyambungan struktur.
BLDG-008	Kurangnya data teknis dan gambar as-built menghambat verifikasi detail penulangan dan penyambungan struktur, terjadinya gaya geser berlebih terhadap kolom.

Setelah mendapatkan tipe kerentanan bangunan, dilakukan penerapan solusi retrofit pada setiap kasus bangunan. Untuk hasil solusi retrofit dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5 Solusi retrofit untuk tipe kerentanan bangunan

Kode Bangunan	Tipe Kerentanan	Solusi <i>Retrofit</i>
BLDG-001	Ketidakseimbangan distribusi massa atau kekakuan pada bangunan dengan bentuk iregular, kekurangan jalur rangka momen alternatif penyalur gaya, kurangnya data teknis dan gambar as-built menghambat verifikasi detail penulangan dan penyambungan struktur, terjadinya gaya geser berlebih terhadap kolom.	Penambahan komponen struktural (balok dan kolom), Penambahan dilatasi pada bangunan, <i>Jacketing</i> kolom, Survey Detail Struktur
BLDG-002	Ketidakseimbangan distribusi massa atau kekakuan pada bangunan dengan bentuk iregular, kurangnya data teknis dan gambar as-built menghambat verifikasi detail penulangan dan penyambungan struktur, terjadinya gaya geser berlebih terhadap kolom.	Penambahan dilatasi pada bangunan, <i>Jacketing</i> kolom, Survey Detail Struktur
BLDG-003	Ketidakseimbangan distribusi massa atau kekakuan pada bangunan dengan bentuk iregular, kurangnya data teknis dan gambar as-built menghambat verifikasi detail penulangan dan penyambungan struktur, terjadinya gaya geser berlebih terhadap kolom.	Penambahan dilatasi pada bangunan, Survey Detail Struktur, <i>Jacketing</i> kolom
BLDG-004	Ketidakseimbangan distribusi massa atau kekakuan pada bangunan dengan bentuk iregular, kekurangan jalur rangka momen alternatif penyalur gaya, kurangnya data teknis dan gambar as-built menghambat verifikasi detail penulangan dan penyambungan struktur.	Penambahan komponen struktural (balok dan kolom), Penambahan dilatasi pada bangunan, Survey Detail Struktur
BLDG-005	Ketidakseimbangan distribusi massa atau kekakuan pada bangunan dengan bentuk iregular, kekurangan jalur rangka momen alternatif penyalur gaya, kurangnya data teknis dan gambar as-built menghambat verifikasi detail penulangan dan penyambungan struktur.	Penambahan komponen struktural (balok dan kolom), Penambahan dilatasi pada bangunan, Survey Detail Struktur
BLDG-006	Ketidakseimbangan distribusi massa atau kekakuan pada bangunan dengan bentuk iregular, kekurangan jalur rangka momen alternatif penyalur gaya, kurangnya data teknis dan gambar as-built menghambat verifikasi detail penulangan dan penyambungan struktur, terjadinya gaya geser berlebih terhadap kolom.	Penambahan komponen struktural (balok dan kolom), Penambahan dilatasi pada bangunan, <i>Jacketing</i> kolom, Survey Detail Struktur
BLDG-007	Ketidakseimbangan distribusi massa atau kekakuan pada bangunan dengan bentuk iregular, kurangnya data teknis dan gambar as-built menghambat verifikasi detail penulangan dan penyambungan struktur, terjadinya gaya geser berlebih terhadap kolom.	Penambahan dilatasi pada bangunan, <i>Jacketing</i> kolom, Survey Detail Struktur
BLDG-008	Ketidakseimbangan distribusi massa atau kekakuan pada bangunan dengan bentuk iregular, kurangnya data teknis dan gambar as-built menghambat verifikasi detail penulangan dan penyambungan struktur, terjadinya gaya geser berlebih terhadap kolom.	Penambahan dilatasi pada bangunan, Survey Detail Struktur, <i>Jacketing</i> kolom

Setelah melakukan perumusan solusi, dilakukan estimasi biaya yang dibutuhkan dalam penyelenggaraan retrofit terhadap bangunan eksisting. Untuk hasil estimasi biaya dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6 Hasil estimasi biaya *Retrofitting* bangunan eksisting

Kode Bangunan	Solusi <i>Retrofit</i>	Estimasi Biaya
BLDG-001	Penambahan elemen struktur, Penambahan Dilatasi, <i>Jacketing</i> kolom, Survey Detail Struktur	Rp789.092.032,00
BLDG-002	Penambahan Dilatasi, <i>Jacketing</i> kolom, Survey Detail Struktur	Rp1.040.239.539,00
BLDG-003	Penambahan Dilatasi, Survey Detail Struktur, <i>Jacketing</i> kolom	Rp1.517.254.326,00
BLDG-004	Penambahan elemen struktur, Penambahan Dilatasi, Survey Detail Struktur	Rp1.291.536.754,00
BLDG-005	Penambahan elemen struktur, Penambahan Dilatasi, Survey Detail Struktur	Rp1.401.369.348,00
BLDG-006	Penambahan Dilatasi, Rebar Scanning	Rp1.591.360.086,00
BLDG-007	Survey Detail Struktur	Rp715.817.500,00
BLDG-008	Survey Detail Struktur, <i>Jacketing</i> Kolom	Rp729.353.196,00

Setelah estimasi biaya pelaksanaan retrofit diperoleh melalui pendekatan Rencana Anggaran Biaya (RAB) konvensional yang mencakup komponen bahan, upah tenaga kerja, dan alat, dilakukan analisis biaya-manfaat (Benefit-Cost Analysis) untuk mengevaluasi kelayakan ekonomi dari setiap intervensi retrofit pada bangunan eksisting. Analisis ini membandingkan total biaya retrofit dengan potensi kerugian ekonomi akibat keruntuhan bangunan dan risiko fatalitas jiwa. Nilai kerugian bangunan dihitung berdasarkan harga awal bangunan yang dikalikan dengan Indeks Harga Perdagangan Besar Konstruksi Indonesia (Badan Pusat Statistik, 2025) dan persentase kerusakan total (FEMA, 2024). Sementara itu, nilai kerugian jiwa diperoleh dari perhitungan jumlah penghuni bangunan yang dikalikan dengan persentase fatalitas (dan harga pertanggungan jiwa (BCA Life, 2025).

Nilai BCA kemudian dihitung dengan membagi jumlah kerugian tersebut terhadap total biaya retrofit, sebagaimana ditampilkan pada Tabel 7.

Tabel 7 Hasil nilai analisa biaya-manfaat

Kode Bangunan	Nilai Potensi Kerugian Bangunan	Nilai Potensi Kerugian jiwa	Estimasi Biaya <i>Retrofitting</i>	Analisa Biaya-Manfaat
BLDG-001	Rp809,238,914.67	Rp81,000,000,000.00	Rp789,092,031.59	103.68
BLDG-002	Rp1,212,805,144.83	Rp119,000,000,000.00	Rp1,040,239,539.32	115.56
BLDG-003	Rp2,837,066,074.72	Rp119,400,000,000.00	Rp1,517,254,325.83	80.56
BLDG-004	Rp1,067,268,527.45	Rp73,400,000,000.00	Rp1,291,536,754.06	57.66
BLDG-005	Rp1,363,390,605.06	Rp160,600,000,000.00	Rp1,401,369,347.92	115.58
BLDG-006	Rp4,072,515,958.99	Rp161,600,000,000.00	Rp1,591,360,086.08	104.11
BLDG-007	Rp894,669,390.51	Rp22,800,000,000.00	Rp715,817,500.00	33.10
BLDG-008	Rp283,266,730.87	Rp56,000,000,000.00	Rp729,353,195.59	77.17

Hasil Analisis Biaya-Manfaat pada delapan bangunan eksisting menunjukkan variasi nilai yang mencerminkan perbedaan tingkat kerentanan struktural serta efektivitas ekonomi dari tindakan retrofitting yang diusulkan. Seluruh nilai BCA pada sampel berada di atas nilai satu ($BCA > 1$), yang menandakan bahwa tindakan retrofit secara umum layak secara ekonomi karena manfaat yang diperoleh (dalam bentuk mitigasi potensi kerugian) lebih besar dibandingkan dengan biaya pelaksanaannya.

Nilai BCA tertinggi ditunjukkan oleh bangunan BLDG-005 sebesar 115,58, diikuti oleh BLDG-002 sebesar 115,56, serta BLDG-006 dan BLDG-001 yang masing-masing memiliki nilai sebesar 104,11 dan 103,68. Hal ini mengindikasikan bahwa pada bangunan-bangunan tersebut, potensi kerugian ekonomi akibat gempa—baik dari sisi kerusakan struktural maupun korban jiwa—relatif tinggi apabila tidak dilakukan retrofit, sehingga intervensi struktural memberikan manfaat yang signifikan.

Sebaliknya, nilai BCA terendah ditemukan pada BLDG-007, yaitu sebesar 33,10, yang menunjukkan tingkat kelayakan ekonomi retrofit yang lebih rendah dibandingkan sampel lainnya. Meskipun demikian, nilai tersebut masih menunjukkan bahwa retrofit tetap memberikan manfaat, meskipun efisiensi biaya-manfaatnya lebih terbatas. Nilai rendah ini dapat disebabkan oleh beberapa kemungkinan, seperti jumlah penghuni yang lebih sedikit atau nilai kerusakan struktural yang tidak terlalu besar.

Secara keseluruhan, hasil ini menguatkan argumen bahwa tindakan retrofit pada bangunan eksisting tidak hanya penting dari sisi teknis dan keselamatan, tetapi juga memberikan justifikasi kuat dari sisi ekonomi, terutama pada bangunan dengan potensi risiko kerusakan tinggi akibat gempa.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

1. Mayoritas bangunan eksisting yang dievaluasi menggunakan metode Tier 1 ASCE 41-17 menunjukkan tingkat kerentanan struktural yang tinggi terhadap beban gempa, terutama pada aspek ketidakberaturan bentuk bangunan, kapasitas geser kolom yang rendah, serta ketidaklengkapan data teknis.
2. Metode retrofit yang diterapkan, seperti penambahan elemen struktur, dilatasi, dan jacketing kolom, dinilai efektif mengatasi permasalahan struktural yang ada serta didukung dengan penggunaan teknologi seperti rebar scanning untuk memverifikasi kondisi aktual elemen struktur.
3. Analisis ekonomi menggunakan pendekatan Benefit-Cost Analysis menunjukkan bahwa seluruh bangunan memiliki nilai BCA > 30, yang mengindikasikan bahwa tindakan retrofit sangat layak secara ekonomis karena memberikan manfaat yang melebihi potensi kerugian akibat keruntuhan.

Saran

1. Diperlukan perluasan evaluasi kerentanan menggunakan pendekatan Tier 1 pada bangunan eksisting lainnya yang memiliki kesamaan usia dan karakteristik struktur untuk memperoleh pemetaan risiko yang lebih komprehensif.
2. Diperlukan tindakan retrofit segera terhadap bangunan eksisting yang memiliki kelemahan pada elemen kritis seperti kolom dan sambungan, karena sangat berpengaruh terhadap kestabilan struktur saat gempa.
3. Diperlukan tindak lanjut dengan evaluasi Tier 2 dan Tier 3 pada bangunan dengan kerentanan ekstrem, serta kebijakan audit struktural berkala yang melibatkan kerja sama antara sektor pendidikan, konstruksi, dan kebencanaan guna mendukung ketahanan bangunan secara berkelanjutan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan apresiasi dan terima kasih kepada PT Miyamoto International Indonesia dan Badan Penanggulangan Bencana Daerah (BPBD) atas dukungan dan kerja samanya dalam proses validasi data pada penelitian ini. Kontribusi yang diberikan, baik berupa konsultasi teknis, penyediaan informasi, maupun verifikasi lapangan, sangat membantu dalam meningkatkan ketepatan analisis dan kualitas hasil penelitian. Penulis juga menghargai segala bentuk bantuan dari pihak-pihak yang terlibat, baik secara langsung maupun tidak langsung, dalam kelancaran pelaksanaan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Amri, R., Yulianti, G., Yunus, R., Wiguna, S., Adi, A. W., Ichwana, A. N., Randongkir, R. E., & Septian, R. T. (2016). *RBI Risiko Bencana Indonesia*. BNPB.
- ASCE. (2017). *ASCE 41-17: Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings*. American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/9780784414859>
- Badan Pusat Statistik. (2025). *Indeks harga perdagangan besar (IHPB) bahan bangunan/konstruksi Indonesia*. Diakses pada 13 Juni 2025, dari: <https://www.bps.go.id/id/statistics-table/2/MTAxOCMy/indeks-harga-perdagangan-besar--ihpb--bahan-bangunan-konstruksi-indonesia.html>.
- BCA Life. (2025). *Perlindungan jiwa berkala*. Diakses pada 11 Juni 2025, dari <https://www.bcalife.co.id/produk/asuransi-perorangan/perlindungan-jiwa-berkala>
- Damayanti, C., Yamko, A. K., Souisa, C. J., Barends, W., & Naroly, I. L. P. T. (2020). Pemodelan segmentasi Mentawai-Pagai: Studi kasus gempa megathrust di Indonesia. *Jurnal Geosains dan Remote Sensing*, 1(2), 105–110. <https://doi.org/10.23960/jgrs.2020.v1i2.56>
- Fajari, M. A., & Sumarsono, R. A. (2018). Review of seismic assessment for high rise building isolated by dilatation to minimize irregularity. *E3S Web of Conferences*, 65, 08003. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186508003>
- FEMA. (2024). *Hazus Earthquake Model Technical Manual*. Federal Emergency Management Agency.
- KRB BNPB. (2021). *KRB – Kajian Risiko Bencana Indonesia 2021*. Badan Nasional Penanggulangan Bencana.
- Liel, A. B., & Deierlein, G. G. (2013). Cost-benefit evaluation of seismic risk mitigation alternatives for older concrete frame buildings. *Earthquake Spectra*, 29(4), 1391–1411. <https://doi.org/10.1193/030911EQS040M>
- Natawidjaja, D. H. (2021). *Orasi pengukuhan profesor riset bidang ilmu kebumihan: Riset sesar aktif Indonesia dan peranannya dalam mitigasi bencana gempa dan tsunami*. LIPI Press.

