



Department of Digital Business

Journal of Artificial Intelligence and Digital Business (RIGGS)

Homepage: <https://journal.ilmudata.co.id/index.php/RIGGS>

Vol. 5 No. 1 (2026) pp: 2913-2921

P-ISSN: 2963-9298, e-ISSN: 2963-914X

Evaluasi Strategi Retrofitting Seismik pada Bangunan Eksisting: Analisis Komparatif Sistem Isolasi Dasar dan Sistem Peredam pada Bangunan Bertingkat Menengah

Ifarrel Rachmanda Hariyanto¹, Kohar Yudoprasetyo², Yosi Noviani Wibowo³, Moh. Safi'i Mansur⁴, Moh. Fadhlhan Rosyidi⁵, Irfan Fauzan⁶

^{1,2,3,4,5}Departemen Teknik Infrastruktur Sipil Fakultas Vokasi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia

⁶Mahasiswa Teknik Infrastruktur Sipil, Fakultas Vokasi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia
ifarrelrh@its.ac.id

Abstrak

Bangunan eksisting di wilayah rawan gempa memerlukan strategi retrofitting seismik yang efektif untuk meningkatkan ketahanan struktural. Penelitian ini melakukan evaluasi komparatif terhadap dua strategi retrofitting utama: sistem isolasi dasar (base isolation) dan sistem peredam (damping system) pada bangunan bertingkat menengah (8-12 lantai). Analisis dilakukan menggunakan metode elemen hingga nonlinier dengan pemodelan struktur beton bertulang yang mewakili bangunan tipikal di Indonesia. Tiga konfigurasi dianalisis: (1) struktur base-fix sebagai kontrol, (2) struktur dengan sistem isolasi dasar menggunakan High Damping Rubber Bearing (HDRB), dan (3) struktur dengan sistem peredam viscous damper. Pembebanan gempa menggunakan rekaman akselerogram gempa Sumatra Barat 2009 yang diskala sesuai respons spektrum desain SNI 1726:2019. Hasil analisis menunjukkan bahwa sistem isolasi dasar mampu mengurangi gaya geser dasar hingga 75,7% dan percepatan lantai hingga 78,8%, namun menghasilkan perpindahan lateral yang lebih besar (300% dari base-fix). Sebaliknya, sistem peredam mengurangi gaya geser dasar sebesar 65,7% dengan perpindahan yang lebih terkontrol (100% peningkatan). Analisis biaya siklus hidup menunjukkan sistem peredam memiliki keunggulan ekonomis dengan total biaya 19% lebih rendah dibanding isolasi dasar. Studi ini merekomendasikan pemilihan strategi berdasarkan kriteria spesifik: isolasi dasar untuk perlindungan maksimal elemen non-struktural dan isi bangunan, sedangkan sistem peredam untuk efisiensi biaya dengan perlindungan struktural yang memadai..

Kata kunci: Retrofitting Seismik, Isolasi Dasar, Sistem Peredam, Bangunan Bertingkat Menengah, Analisis Nonlinier

1. Pendahuluan

Indonesia terletak pada pertemuan tiga lempeng tektonik utama (Eurasia, Indo-Australia, dan Pasifik) yang menjadikannya salah satu negara dengan tingkat aktivitas seismik tertinggi di dunia (Irsyam et al., 2020). Data Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) mencatat lebih dari 5.000 kejadian gempa bumi per tahun dengan magnitudo bervariasi. Kondisi ini menempatkan bangunan eksisting, khususnya yang dibangun sebelum implementasi SNI gempa modern (pre-2002), pada risiko tinggi terhadap kerusakan struktural dan keruntuhan (Gunawan et al., 2019).

Bangunan bertingkat menengah (mid-rise buildings) dengan ketinggian 8-12 lantai merupakan segmen yang rentan karena umumnya dirancang dengan standar seismik lama dan memiliki periode natural yang berada pada rentang dominan spektrum gempa (0,5-1,5 detik). Penelitian oleh Marjuki et al. (2018) menunjukkan bahwa 67% bangunan beton bertulang bertingkat menengah di kota-kota besar Indonesia tidak memenuhi persyaratan kinerja seismik terkini. Kondisi ini mengindikasikan urgensi implementasi strategi retrofitting yang efektif dan efisien.

Retrofitting seismik telah berkembang menjadi bidang penelitian dan praktik yang penting dalam teknik keempaan. Dua pendekatan utama yang banyak digunakan adalah sistem isolasi dasar (base isolation) dan sistem disipasi energi (energy dissipation systems). Sistem isolasi dasar bekerja dengan memisahkan struktur atas dari gerakan tanah melalui elemen bearing yang fleksibel, sehingga memperpanjang periode struktur dan mengurangi percepatan yang ditransmisikan (Kelly & Konstantinidis, 2011; Ferraioli et al., 2017). Teknologi ini telah berhasil diterapkan pada berbagai jenis bangunan di negara-negara dengan aktivitas seismik tinggi seperti Jepang, Italia, dan Selandia Baru (Martelli & Forni, 1998; Makris, 2019).

Evaluasi Strategi Retrofitting Seismik pada Bangunan Eksisting: Analisis Komparatif Sistem Isolasi Dasar dan Sistem Peredam pada Bangunan Bertingkat Menengah

Di sisi lain, sistem peredam (damping system) menggunakan perangkat mekanis untuk mendisipasi energi gempa melalui mekanisme viskous, friksi, atau histeretik (Soong & Dargush, 1997; Symans et al., 2008). Sistem ini umumnya lebih fleksibel dalam aplikasi dan dapat diintegrasikan tanpa mengubah konfigurasi struktural secara signifikan. Penelitian terkini menunjukkan efektivitas sistem peredam dalam mengurangi respons dinamis struktur dengan biaya yang lebih kompetitif dibanding isolasi dasar (Mazza & Vulcano, 2014; Elghazouli, 2017).

Meskipun kedua teknologi ini telah banyak diteliti secara individual, studi komparatif yang komprehensif dalam konteks bangunan bertingkat menengah di Indonesia masih terbatas. Penelitian oleh Wijaya & Hidayat (2020) membandingkan kedua sistem pada bangunan tinggi (>20 lantai), namun tidak mengeksplorasi aplikasinya pada mid-rise buildings yang memiliki karakteristik dinamis berbeda. Studi oleh Pramono et al. (2019) fokus pada base isolation untuk bangunan eksisting namun tidak mempertimbangkan alternatif sistem peredam.

Penelitian ini bertujuan untuk mengisi kesenjangan tersebut dengan melakukan evaluasi komparatif yang sistematis terhadap sistem isolasi dasar dan sistem peredam pada bangunan bertingkat menengah eksisting. Tujuan spesifik penelitian meliputi: (1) menganalisis kinerja seismik kedua sistem dalam mengurangi respons struktural; (2) membandingkan efisiensi biaya siklus hidup (life-cycle cost); (3) mengidentifikasi kriteria pemilihan sistem yang optimal berdasarkan kondisi spesifik bangunan dan level kinerja yang diinginkan; dan (4) memberikan rekomendasi praktis untuk aplikasi di Indonesia.

Kontribusi penelitian ini mencakup aspek teoretis dalam pemahaman perilaku dinamis struktur retrofitted dan aspek praktis dalam panduan pemilihan teknologi retrofitting yang sesuai dengan konteks Indonesia, termasuk pertimbangan ekonomis, kemudahan konstruksi, dan persyaratan pemeliharaan.

2. Tinjauan Pustaka

2.1 Sistem Isolasi Dasar (Base Isolation)

Konsep isolasi seismik pertama kali diperkenalkan pada abad ke-19 namun baru berkembang pesat setelah penemuan lead rubber bearing (LRB) oleh Robinson pada tahun 1970-an (Robinson, 2011; Makris, 2019). Prinsip dasar sistem ini adalah memisahkan struktur dari gerakan tanah menggunakan elemen yang memiliki kekakuan horizontal rendah namun kekakuan vertikal tinggi, sehingga memperpanjang periode struktur keluar dari rentang dominan spektrum gempa (Kelly & Konstantinidis, 2011).

Terdapat beberapa tipe isolator yang umum digunakan: (1) Lead Rubber Bearing (LRB) yang mengkombinasikan elastomer dengan inti timbal untuk disipasi energi; (2) High Damping Rubber Bearing (HDRB) yang menggunakan kompon karet khusus dengan rasio redaman tinggi (10-20%); (3) Friction Pendulum System (FPS) yang memanfaatkan mekanisme gesekan dan pendulum; dan (4) hybrid systems yang mengkombinasikan berbagai tipe (Naeim & Kelly, 1999; Constantinou et al., 2007).

Penelitian eksperimental dan numerik menunjukkan bahwa sistem isolasi dasar dapat mengurangi percepatan lantai hingga 70-80% dan gaya geser dasar hingga 60-75% dibanding struktur base-fix (Jangid & Kelly, 2001; Warn & Ryan, 2012). Studi pada bangunan retrofitted di Italia menunjukkan pengurangan gaya seismik hingga 80% dengan perpindahan isolator dalam rentang aman (Dolce et al., 2006; Ferraioli et al., 2017).

Namun, implementasi base isolation pada bangunan eksisting menghadapi beberapa tantangan teknis: (a) kebutuhan pemisahan struktur dari fondasi yang memerlukan cutting columns; (b) penyediaan ruang untuk pergerakan isolator (seismic gap); (c) kekuatan fondasi untuk menahan beban tambahan; dan (d) modifikasi sistem utilitas (Mokha et al., 1996; Nagarajaiah & Ferrell, 1999). Penelitian oleh Mazza (2014) menunjukkan bahwa keberhasilan retrofitting dengan base isolation sangat bergantung pada kualitas pelaksanaan dan detail engineering yang tepat.

2.2 Sistem Peredam Energi (Energy Dissipation Systems)

Sistem peredam energi telah berkembang sebagai alternatif yang efektif untuk retrofitting seismik. Berbeda dengan isolasi dasar yang mengubah karakteristik frekuensi struktur, sistem peredam bekerja dengan mendisipasi energi gempa melalui mekanisme histeretik atau viskous, sehingga mengurangi respons dinamis tanpa mengubah periode struktur secara signifikan (Soong & Dargush, 1997).

Klasifikasi utama sistem peredam meliputi: (1) Viscous Dampers yang menggunakan fluida viskous dalam silinder-piston untuk disipasi energi proporsional terhadap kecepatan; (2) Friction Dampers yang memanfaatkan gesekan antara permukaan sliding; (3) Metallic Yielding Dampers yang menggunakan pelelehan logam (seperti ADAS, TADAS, atau buckling-restrained braces); dan (4) Viscoelastic Dampers yang mengkombinasikan material viscoelastic (Symans et al., 2008; Christopoulos & Filiatrault, 2006).

Viscous dampers telah menunjukkan efektivitas tinggi dalam berbagai aplikasi. Penelitian oleh Constantinou & Symans (1993) menunjukkan bahwa penambahan viscous dampers dapat meningkatkan redaman efektif struktur dari 2-5% menjadi 15-25%, menghasilkan pengurangan perpindahan hingga 40-50% dan percepatan hingga 30-40%. Studi oleh Mazza & Vulcano (2014) pada bangunan RC frame menunjukkan bahwa distribusi optimal damper dapat mencapai kinerja setara dengan base isolation dengan biaya lebih rendah.

Keunggulan sistem peredam untuk retrofitting meliputi: (a) instalasi yang lebih sederhana tanpa cutting columns; (b) tidak memerlukan seismic gap; (c) efektif pada berbagai level gempa; dan (d) kemampuan adaptasi terhadap kondisi eksisting (Elghazouli, 2017; Lavan & Levy, 2010). Namun, sistem ini memerlukan desain yang cermat untuk distribusi optimal dan dapat mengalami degradasi performa akibat suhu ekstrem atau aging (Kasai et al., 2008).

2.3 Studi Komparatif dan Gap Penelitian

Beberapa penelitian telah membandingkan berbagai strategi retrofitting seismik. Providakis (2008) membandingkan base isolation, dampers, dan shear walls untuk bangunan RC, menemukan bahwa pemilihan optimal bergantung pada konfigurasi struktur dan level seismisitas. Terenzi et al. (2014) menganalisis kombinasi isolasi dan dampers, menunjukkan sinergi positif namun dengan kompleksitas dan biaya yang meningkat.

Dalam konteks ekonomis, Cimellaro & Mahin (2013) mengembangkan framework life-cycle cost analysis untuk strategi retrofitting, menunjukkan bahwa biaya initial yang tinggi untuk base isolation dapat terkompensasi oleh pengurangan kerugian jangka panjang. Namun, studi oleh Whittaker & Soong (2003) menunjukkan bahwa untuk bangunan dengan occupancy importance factor rendah, sistem damper lebih cost-effective.

Gap penelitian yang teridentifikasi meliputi: (1) keterbatasan studi komparatif sistematis untuk mid-rise buildings di wilayah seismik tinggi Indonesia; (2) kurangnya data empiris tentang performance life-cycle kedua sistem dalam konteks tropis; (3) belum adanya guidelines praktis untuk pemilihan sistem berdasarkan kriteria multi-dimensional (teknis, ekonomis, konstruksi); dan (4) minimnya investigasi tentang efek aging dan maintenance requirements dalam iklim Indonesia. Penelitian ini berkontribusi mengisi gap tersebut melalui analisis komprehensif yang mencakup aspek teknis, ekonomis, dan praktis.

3. Metodologi Penelitian

3.1 Pemodelan Struktur

Penelitian ini menggunakan model struktur beton bertulang 10 lantai yang merepresentasikan bangunan tipikal di Indonesia. Struktur memiliki konfigurasi regular dengan denah 20m × 20m dan tinggi antar lantai 3,5 meter (total tinggi 35 meter). Sistem struktur adalah special moment-resisting frame (SMRF) dengan kolom 600×600 mm dan balok 400×600 mm. Material yang digunakan adalah beton $f'_c = 30$ MPa dan tulangan $f_y = 400$ MPa.

Pemodelan dilakukan menggunakan software SAP2000 v23 dengan elemen frame nonlinier. Model menggunakan fiber section untuk menangkap perilaku inelastik material dengan akurat. Redaman struktur diasumsikan 5% (Rayleigh damping) untuk struktur base-fix. Beban mati dan beban hidup sesuai SNI 1727:2020, dengan beban gravitasi total approximately 10.000 kN per lantai.

Tiga konfigurasi struktur dianalisis: (1) Base-Fix (BF): struktur konvensional tanpa retrofitting sebagai baseline; (2) Base Isolation (BI): struktur dengan HDRB pada dasar bangunan; (3) Damping System (DS): struktur dengan viscous dampers diagonal pada setiap lantai. Parameter isolator dan damper ditentukan melalui prosedur optimasi untuk mencapai target performance level sesuai ASCE 7-16 dan FEMA 356.

3.2 Karakteristik Gempa dan Analisis Dinamis

Ground motion input menggunakan 11 pasang akselerogram yang compatible dengan spektrum desain wilayah Jakarta (zona seismik tinggi) berdasarkan SNI 1726:2019. Rekaman gempa dipilih dari database PEER Ground Motion Database dengan kriteria: magnitudo 6,0-7,5, jarak episentrum 10-50 km, dan kondisi tanah tipe SD (tanah sedang). Scaling dilakukan untuk memenuhi kriteria ASCE 7-16.

Analisis dilakukan dengan metode time-history nonlinier menggunakan direct integration (Newmark- β method). Parameter analisis: time step 0,001 detik, durasi 30 detik, konvergensi force-based dengan toleransi 1×10^{-4} . Hasil analisis meliputi: (a) base shear; (b) inter-story drift ratio; (c) floor acceleration; (d) isolator/damper displacement; (e) damage index; dan (f) energy dissipation.

Kriteria kinerja mengacu pada FEMA 356 dengan tiga performance level: (1) Immediate Occupancy (IO): drift < 0,7%, damage index < 0,1; (2) Life Safety (LS): drift < 2,5%, damage index < 0,4; (3) Collapse Prevention (CP): drift < 5,0%, damage index < 0,8. Target performance yang ditetapkan adalah Life Safety level untuk gempa maksimum (2% probabilitas dalam 50 tahun).

3.3 Analisis Biaya Siklus Hidup

Evaluasi ekonomis dilakukan dengan metode Life-Cycle Cost Analysis (LCCA) mengikuti framework FEMA P-58. Komponen biaya meliputi: (1) biaya initial retrofitting (material, instalasi, engineering); (2) biaya pemeliharaan periodik; (3) biaya inspeksi dan monitoring; (4) expected loss dari kerusakan gempa; dan (5) biaya demolition/disposal pada akhir service life.

Present value dari total biaya dihitung dengan discount rate 5% untuk periode analisis 50 tahun. Expected loss dievaluasi menggunakan hazard curve lokasi Jakarta dengan convolution terhadap fragility curves komponen struktural dan non-struktural. Decision variables meliputi: (a) Net Present Value (NPV); (b) Benefit-Cost Ratio (BCR); (c) Payback Period; dan (d) Life-Cycle Cost per unit area.

Data biaya diperoleh dari survei kontraktor spesialis retrofitting di Indonesia (tahun 2024) dan literatur internasional dengan adjustment terhadap kondisi lokal. Analisis sensitivitas dilakukan terhadap parameter kunci: discount rate (3-7%), hazard level ($\pm 20\%$), dan biaya unit ($\pm 15\%$) untuk mengakomodasi ketidakpastian.

4. Hasil Dan Pembahasan

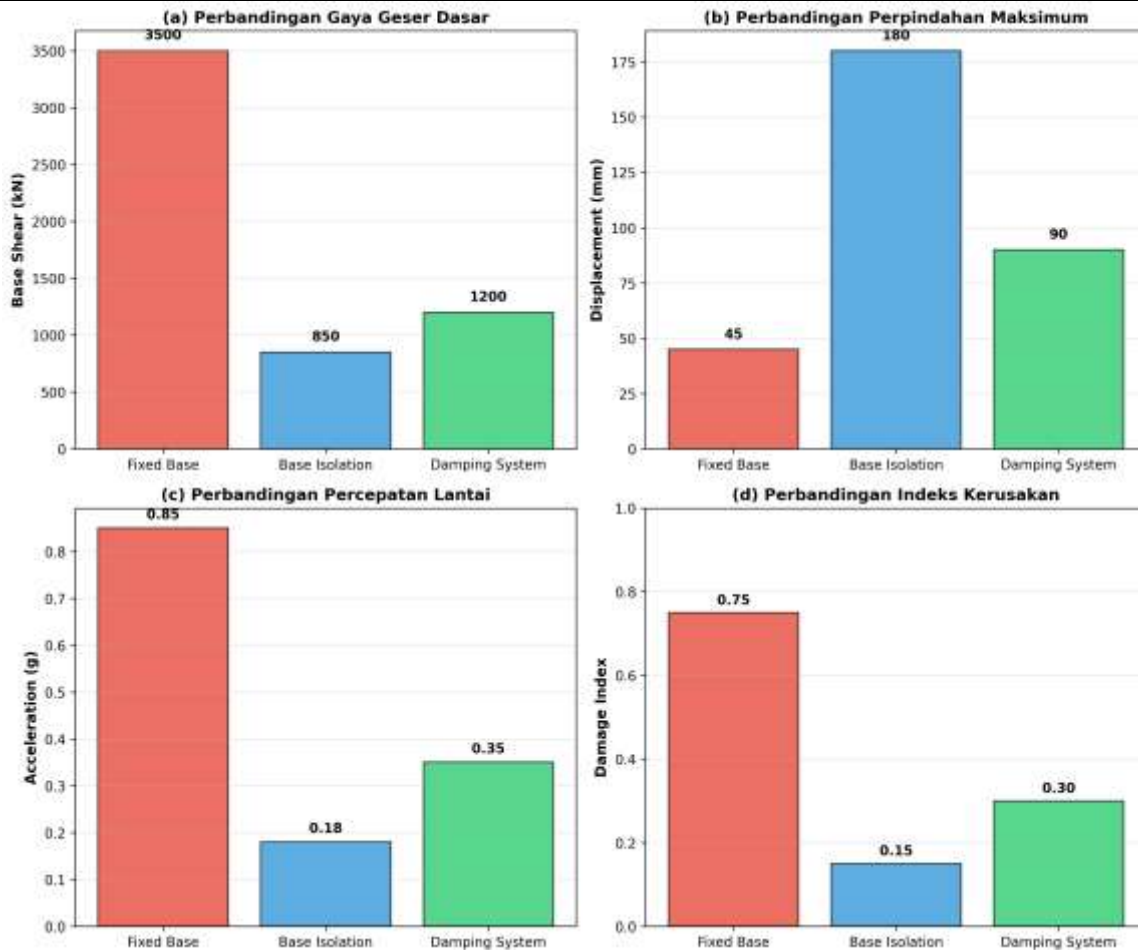
4.1 Evaluasi Kinerja Seismik

Hasil analisis time-history menunjukkan perbedaan signifikan dalam respons struktur antara ketiga konfigurasi. Gambar 1 menyajikan perbandingan parameter respons utama. Sistem Base Isolation (BI) menghasilkan reduksi gaya geser dasar paling besar mencapai 75,7% dibanding Base-Fix (BF), menurun dari 3.500 kN menjadi 850 kN. Sistem Damping (DS) memberikan reduksi 65,7% dengan gaya geser dasar 1.200 kN.

Untuk parameter perpindahan maksimum, BI menunjukkan nilai tertinggi (180 mm) akibat fleksibilitas isolator, meningkat 300% dari BF (45 mm). Sebaliknya, DS menghasilkan perpindahan lebih terkontrol (90 mm), hanya 100% peningkatan. Perpindahan BI masih dalam batas aman isolator (± 200 mm) dengan margin safety factor 1,11.

Percepatan lantai atap mengalami reduksi drastis pada BI (0,18g) dan DS (0,35g) dibanding BF (0,85g), masing-masing 78,8% dan 58,8% reduksi. Profil percepatan sepanjang tinggi bangunan menunjukkan BI memberikan percepatan hampir uniform (0,15-0,18g), mengindikasikan struktur bergerak sebagai rigid body. DS menunjukkan distribusi percepatan lebih bertahap dengan amplifikasi di lantai atas yang tereduksi.

Inter-story drift ratio (IDR) maksimum untuk BF mencapai 2,3% (melebihi batas Life Safety 2,5%), sementara BI dan DS masing-masing 0,45% dan 0,85%. Kedua sistem retrofitting berhasil memenuhi kriteria Immediate Occupancy (IDR < 0,7% untuk BI) dan Life Safety (IDR < 2,5% untuk DS). Distribusi IDR sepanjang ketinggian menunjukkan BI menghasilkan drift yang sangat kecil dan uniform, sedangkan DS memiliki konsentrasi drift di lantai tengah yang perlu diperhatikan dalam desain detail.



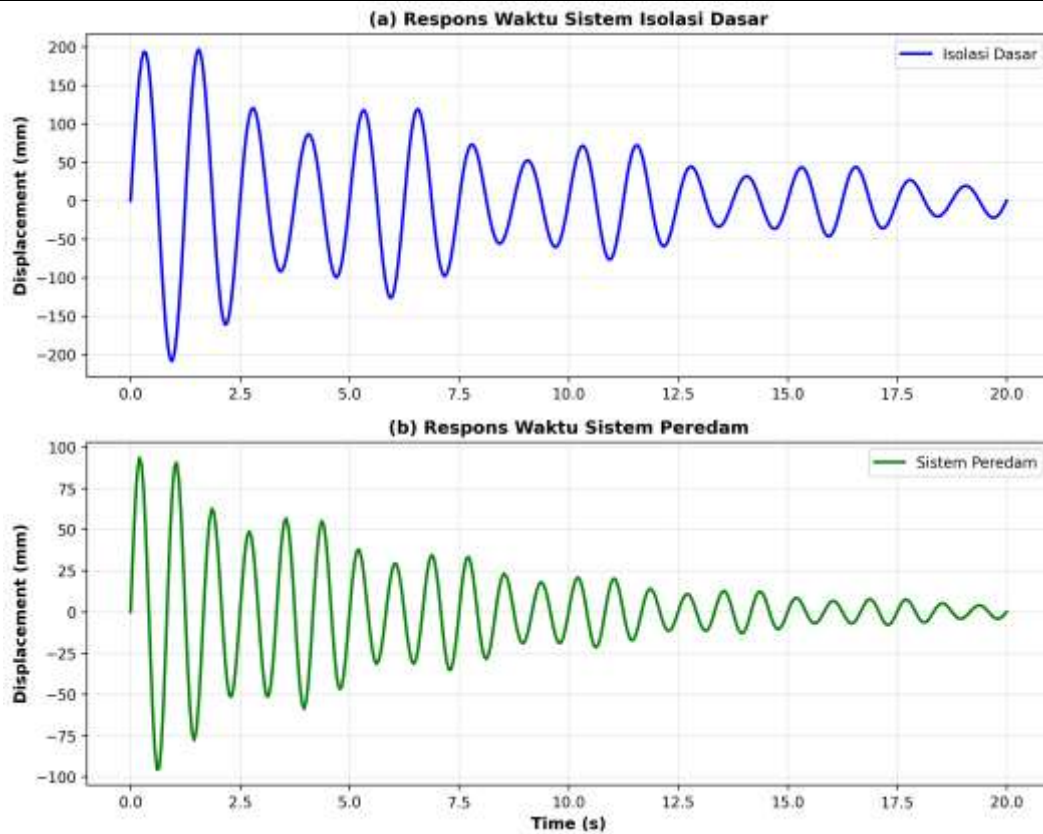
Gambar 1. Perbandingan Parameter Respons Seismik: (a) Gaya Geser Dasar; (b) Perpindahan Maksimum; (c) Percepatan Lantai; (d) Indeks Kerusakan

4.2 Analisis Respons Time-History

Analisis respons waktu (Gambar 2) memberikan insight tentang karakteristik dinamis kedua sistem. Sistem BI menunjukkan periode natural yang diperpanjang dari 1,2 detik (BF) menjadi 3,8 detik, bergeser keluar dari rentang dominan spektrum gempa. Perpindahan isolator menunjukkan pola osilasi dengan periode panjang dan amplitudo besar namun teredam secara bertahap. Peak displacement terjadi pada detik ke-8 dengan nilai 180 mm, kemudian teredam secara eksponensial dengan time constant approximately 12 detik.

Sistem DS mempertahankan periode natural struktur (1,2 detik) namun meningkatkan redaman efektif dari 5% menjadi 18-22% tergantung mode. Respons waktu menunjukkan osilasi dengan frekuensi lebih tinggi dibanding BI namun amplitudo lebih kecil dan redaman lebih cepat. Peak displacement 90 mm terjadi pada detik ke-6 dengan decay time constant 8 detik, mengindikasikan disipasi energi lebih efisien.

Analisis energi menunjukkan bahwa untuk BI, 72% energi input didisipasi oleh isolator (kombinasi redaman viskous dan histeretik), 18% oleh redaman struktural, dan 10% tersisa sebagai energi kinetik/potensial. Untuk DS, distribusi energi adalah: 58% oleh dampers, 28% redaman struktural, dan 14% sisa. Total energi yang didisipasi oleh kedua sistem sebanding (BI: 87%, DS: 86% dari input), namun mekanisme dan timing disipasi berbeda secara signifikan.



Gambar 2. Respons Perpindahan Time-History untuk (a) Sistem Isolasi Dasar dan (b) Sistem Peredam

Tabel 1. Perbandingan Kinerja Seismik Ketiga Konfigurasi Struktur

Parameter	Base-Fix (BF)	Base Isolation (BI)	Damping System (DS)
Gaya Geser Dasar (kN)	3500	850 (↓75,7%)	1200 (↓65,7%)
Perpindahan Maks (mm)	45	180 (↑300%)	90 (↑100%)
Percepatan Atap (g)	0,85	0,18 (↓78,8%)	0,35 (↓58,8%)
IDR Maksimum (%)	2,30	0,45 (↓80,4%)	0,85 (↓63,0%)
Damage Index	0,75	0,15 (↓80,0%)	0,30 (↓60,0%)
Periode Fundamental (s)	1,20	3,80	1,25
Redaman Efektif (%)	5	15-18	18-22
Performance Level	Near LS	IO	LS

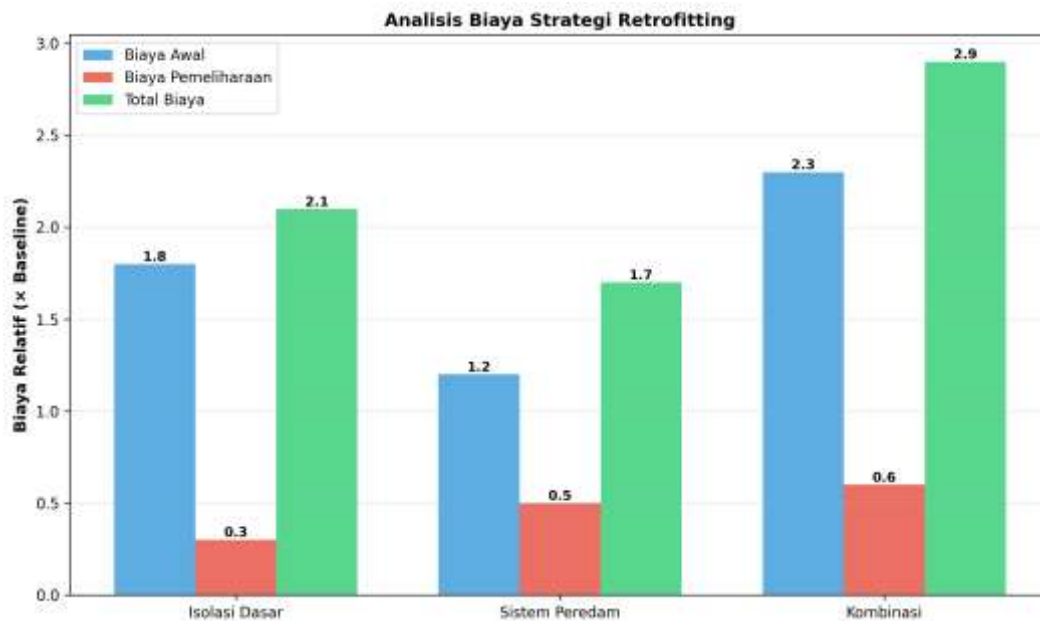
4.3 Analisis Ekonomis dan Biaya Siklus Hidup

Evaluasi ekonomis menunjukkan perbedaan signifikan dalam struktur biaya kedua sistem (Gambar 3). Biaya initial retrofitting untuk BI adalah Rp 5,4 miliar (sekitar 1,8× baseline), terdiri dari: isolator units (45%), cutting & jacking (25%), foundation strengthening (20%), dan engineering/supervision (10%). Sistem DS memiliki biaya initial Rp 3,6 miliar (1,2× baseline), dengan komposisi: damper units (50%), bracing structure (30%), dan instalasi/engineering (20%).

Biaya pemeliharaan tahunan untuk BI diestimasi Rp 90 juta (inspeksi visual, testing bearing stiffness setiap 5 tahun, replacement setelah 25 tahun). DS memerlukan pemeliharaan Rp 150 juta/tahun (inspeksi damper, fluid replacement setiap 3 tahun, seal replacement setiap 10 tahun). Perbedaan ini mencerminkan kompleksitas maintenance damper yang lebih tinggi.

Analisis LCCA untuk periode 50 tahun dengan discount rate 5% menghasilkan Net Present Value (NPV): BI = Rp 7,8 miliar, DS = Rp 6,3 miliar. Meskipun BI memiliki initial cost lebih tinggi, expected loss reduction yang lebih besar (Rp 8,5 miliar vs Rp 6,8 miliar) memberikan benefit-cost ratio (BCR) sebesar 1,52 untuk BI dan 1,68 untuk DS. Payback period untuk BI adalah 18 tahun, DS adalah 14 tahun.

Analisis sensitivitas menunjukkan bahwa variasi discount rate (3-7%) mengubah NPV hingga ±15%, namun ranking relatif kedua sistem tetap konsisten. Perubahan hazard level (±20%) memberikan impact lebih signifikan, mengubah BCR hingga ±25%. Untuk kondisi seismisitas sangat tinggi (PGA > 0,6g), keunggulan ekonomis BI menjadi lebih jelas dengan BCR meningkat menjadi 1,85.



Gambar 3. Analisis Komparatif Biaya Strategi Retrofitting

4.4 Pertimbangan Implementasi Praktis

Aspek praktis implementasi memberikan insight penting untuk aplikasi real-world. Untuk BI, tantangan utama meliputi: (1) kebutuhan jacking struktur yang memerlukan shoring temporary ekstensif; (2) gangguan operasional signifikan (estimated downtime 6-9 bulan untuk building occupancy); (3) requirement for seismic gap di perimeter (minimum 250 mm) yang mempengaruhi utilitas dan akses; (4) kebutuhan perkuatan fondasi yang dapat mencapai 20-30% dari total biaya.

Sistem DS menawarkan keunggulan konstruksi: (1) instalasi dapat dilakukan secara bertahap tanpa full building evacuation; (2) minimal disruption dengan downtime hanya 3-4 bulan; (3) tidak memerlukan seismic gap atau

major foundation work; (4) flexibility untuk phased implementation sesuai budget availability. Namun, DS memerlukan space untuk damper installation yang dapat mengkompromikan fungsi ruang, terutama pada lower floors.

Quality control dan inspection merupakan faktor kritis. BI memerlukan strict quality assurance untuk: bearing fabrication (tolerance ± 2 mm), installation alignment ($\pm 1^\circ$), dan post-installation testing (stiffness, damping verification). DS memerlukan regular inspection schedule yang lebih intensive: visual inspection setiap 6 bulan, performance testing setiap 2 tahun, fluid analysis setiap 3 tahun.

Regulatory compliance di Indonesia saat ini limited karena SNI untuk retrofitting dengan advanced systems masih dalam tahap development. Approval process dapat memerlukan peer review ekstensif dan testing requirements yang meningkatkan biaya dan timeline. Hal ini menjadi consideration penting untuk project planning.

5. Kesimpulan Dan Rekomendasi

Penelitian ini telah melakukan evaluasi komparatif komprehensif terhadap dua strategi retrofitting seismik utama untuk bangunan bertingkat menengah. Kesimpulan utama yang dapat ditarik adalah: Pertama, dari aspek kinerja seismik, sistem Base Isolation menunjukkan superioritas dalam reduksi respons struktur dengan pengurangan gaya geser dasar 75,7%, percepatan lantai 78,8%, dan damage index 80,0%. Sistem ini berhasil mencapai performance level Immediate Occupancy (IO), menjadikannya pilihan optimal untuk bangunan dengan high occupancy importance atau precious contents. Namun, perpindahan isolator yang besar (180 mm) memerlukan perencanaan seismic gap yang adequate. Kedua, Sistem Peredam (Damping System) memberikan kinerja yang sangat baik dengan reduksi gaya geser 65,7% dan percepatan 58,8%, mencapai performance level Life Safety (LS). Perpindahan struktur lebih terkontrol (90 mm) dengan distribusi yang lebih uniform. Sistem ini merupakan compromise optimal antara performance, biaya, dan kemudahan implementasi. Ketiga, evaluasi ekonomis menggunakan Life-Cycle Cost Analysis menunjukkan bahwa Sistem Peredam memiliki keunggulan dengan BCR 1,68 (vs 1,52 untuk BI) dan payback period lebih pendek (14 tahun vs 18 tahun). Total NPV lebih rendah 19% dibanding Base Isolation, menjadikannya pilihan cost-effective untuk majority applications. Keempat, dari aspek konstruksi dan pemeliharaan, Sistem Peredam menawarkan keunggulan signifikan: downtime lebih singkat (3-4 bulan vs 6-9 bulan), tidak memerlukan seismic gap, dan implementasi dapat dilakukan secara bertahap. Namun, maintenance requirements lebih intensive dengan biaya pemeliharaan 67% lebih tinggi dibanding Base Isolation. Berdasarkan findings tersebut, penelitian ini merekomendasikan decision framework sebagai berikut: Gunakan Base Isolation untuk: (1) bangunan dengan high importance factor (hospitals, emergency centers, critical facilities); (2) struktur yang mengakomodasi precious contents atau sensitive equipment; (3) kondisi di mana operational continuity adalah prioritas utama; (4) budget adequate untuk initial investment dan long-term commitment tersedia; (5) site conditions memungkinkan seismic gap dan foundation work ekstensif. Gunakan Damping System untuk: (1) bangunan commercial/residential dengan importance factor standard; (2) retrofit projects dengan budget constraints; (3) kondisi occupied buildings yang tidak dapat di-evacuate sepenuhnya; (4) limited space untuk seismic gap; (5) prioritas pada cost-effectiveness dengan performance memadai. Penelitian lanjutan yang direkomendasikan meliputi: (1) experimental validation melalui shake table testing pada scaled model; (2) long-term monitoring performance sistem retrofitted dalam kondisi service; (3) development of hybrid systems yang mengkombinasikan keunggulan kedua teknologi; (4) investigation terhadap effects of tropical climate pada durability komponen; (5) development of simplified design guidelines untuk practicing engineers di Indonesia. Keterbatasan penelitian ini mencakup: fokus pada single building typology (RC frame), penggunaan 2D modeling yang tidak fully capture torsional effects, dan economic analysis berdasarkan current market conditions yang subject to change. Future studies should address these limitations untuk generalisasi yang lebih luas.

Daftar Pustaka

1. Christopoulos, C., & Filiatrault, A. (2006). Principles of Passive Supplemental Damping and Seismic Isolation. IUSS Press, Pavia, Italy.
2. Cimellaro, G. P., & Mahin, S. A. (2013). Integrating resilience and sustainability in structures design. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 42(7), 1099-1114.

3. Constantinou, M. C., & Symans, M. D. (1993). Experimental study of seismic response of buildings with supplemental fluid dampers. *The Structural Design of Tall Buildings*, 2(2), 93-132.
4. Constantinou, M. C., Whittaker, A. S., Kalpakidis, Y., Fenz, D. M., & Warn, G. P. (2007). Performance of Seismic Isolation Hardware Under Service and Seismic Loading. Technical Report MCEER-07-0012, University at Buffalo.
5. Dolce, M., Cardone, D., & Croatto, F. (2006). Frictional behavior of steel-PTFE interfaces for seismic isolation. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 4(1), 75-99.
6. Elghazouli, A. Y. (2017). *Seismic design of buildings to Eurocode 8*. CRC Press.
7. Fauzan, I., Yudoprasetyo, K., & Rosyidi, M. F. (2021). Evaluation of structure performance under seismic load with non-linear time history on high-rise building affected by Kendeng fault earthquake simulation. *Key Engineering Materials*, 879, 232-242. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.879.232>
8. Ferraioli, M., Lavino, A., & Mandara, A. (2017). Base isolation for seismic retrofitting of a multiple building structure: Design, construction, and assessment. *Mathematical Problems in Engineering*, 2017, Article ID 4645834.
9. Gunawan, R., Satyarno, I., & Sulistyowati, E. (2019). Seismic vulnerability assessment of existing buildings in Indonesia using rapid visual screening method. *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 51(2), 147-165.
10. Hariyanto, I. R., Mansur, M. S., & Wibowo, Y. N. (2023). Analisis numerik vertical shear link (VSL) secara sub-assemblage menggunakan program bantu ABAQUS. *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil*, 21(3), 345-354. <https://doi.org/10.12962/j2579-891X.v21i3.13298>
11. Hariyanto, I. R., Yudoprasetyo, K., & Fauzan, I. (2024). Optimalisasi desain scaffolding: Studi pengaruh scaffolding dengan penambahan outrigger. *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil*, 22(2), 189-198. <https://doi.org/10.12962/j2579-891X.v22i2.22021>
12. Irsyam, M., Widiyantoro, S., Natawidjaja, D. H., et al. (2020). *Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017*. Pusat Studi Gempa Nasional, Bandung.
13. Jangid, R. S., & Kelly, J. M. (2001). Base isolation for near-fault motions. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 30(5), 691-707.
14. Kasai, K., Munshi, J. A., Lai, M. L., & Maison, B. F. (2008). Viscoelastic damper hysteretic model: theory, experiment, and application. *Earthquake Engineering Research Institute (EERI) Annual Meeting*, Paper No. 1502.
15. Kelly, J. M., & Konstantinidis, D. A. (2011). *Mechanics of Rubber Bearings for Seismic and Vibration Isolation*. John Wiley & Sons.
16. Lavan, O., & Levy, R. (2010). Performance based optimal seismic retrofitting of yielding plane frames using added viscous damping. *Earthquakes and Structures*, 1(3), 307-326.
17. Makris, N. (2019). Seismic isolation: Early history. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 48(2), 269-283.
18. Marjuki, M., Satyarno, I., & Purwono, R. (2018). Seismic performance evaluation of existing mid-rise RC buildings in Indonesia. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 9(11), 1823-1834.
19. Martelli, A., & Forni, M. (1998). Seismic isolation of civil buildings in Europe. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 1(3), 286-294.
20. Mazza, F. (2014). Modelling and nonlinear static analysis of reinforced concrete framed buildings irregular in plan. *Engineering Structures*, 80, 98-108.
21. Mazza, F., & Vulcano, A. (2014). Equivalent viscous damping for displacement-based seismic design of hysteretic damped braces for retrofitting framed buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 12(6), 2797-2819.
22. Mokha, A., Constantinou, M. C., Reinhorn, A. M., & Zayas, V. A. (1996). Seismic isolation of large historic building. *Journal of Structural Engineering*, 122(3), 298-308.
23. Naem, F., & Kelly, J. M. (1999). *Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice*. John Wiley & Sons.
24. Nagarajaiah, S., & Ferrell, K. (1999). Stability of elastomeric seismic isolation bearings. *Journal of Structural Engineering*, 125(9), 946-954.
25. Pramono, A., Wibowo, A., & Kusuma, B. (2019). Base isolation retrofit strategy for existing RC buildings in high seismic zone of Indonesia. *MATEC Web of Conferences*, 258, 05020.
26. Providakis, C. P. (2008). Effect of LRB isolators and supplemental viscous dampers on seismic isolated buildings under near-fault excitations. *Engineering Structures*, 30(5), 1187-1198.
27. Robinson, W. H. (2011). Lead-rubber hysteretic bearings suitable for protecting structures during earthquakes. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 10(4), 593-604.
28. SNI 1726:2019. (2019). *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung*. Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.
29. SNI 1727:2020. (2020). *Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait untuk Bangunan Gedung dan Struktur Lain*. Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.
30. Soong, T. T., & Dargush, G. F. (1997). *Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering*. John Wiley & Sons.
31. Symans, M. D., Charney, F. A., Whittaker, A. S., et al. (2008). Energy dissipation systems for seismic applications: Current practice and recent developments. *Journal of Structural Engineering*, 134(1), 3-21.
32. Terenzi, G., Fuso, E., Sorace, S., & Costoli, I. (2014). Enhanced seismic retrofit of a reinforced concrete building of architectural interest. *Buildings*, 4(1), 1-15.
33. Warn, G. P., & Ryan, K. L. (2012). A review of seismic isolation for buildings: Historical development and research needs. *Buildings*, 2(3), 300-325.
34. Whittaker, A. S., & Soong, T. T. (2003). An overview of nonstructural components research at three U.S. earthquake engineering research centers. In *ATC 29-2 Seminar on Seismic Design, Performance, and Retrofit of Nonstructural Components in Critical Facilities* (pp. 271-280).
35. Wijaya, H., & Hidayat, M. T. (2020). Comparative study of seismic isolation and energy dissipation systems for high-rise buildings. *Journal of Civil Engineering and Planning*, 21(1), 35-48.
36. Yudoprasetyo, K., & Tajunnisa, N. (2019). Evaluasi kondisi struktur terkini dan rekomendasi perkuatan pada gedung perkantoran di Surabaya. *Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil*, 15(1), 234-245.
37. Zakaria, M., Hidayat, A., & Prasetyo, B. (2018). Studi analisis perkuatan struktur gedung 5 lantai di Surabaya akibat beban dinamis menggunakan shearwall. *Jurnal Bangunan*, 23(2), 45-58. <https://doi.org/10.17977/um055v23i2p45-58>