

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Penelitian Tentang Seismic Retrofit menggunakan Steel Bracing

Penelitian Freddi et al. (2024)

Freddi et al. (2024) melakukan penelitian tentang retrofit struktur baja eksisting menggunakan external buckling-restrained braces (BRBs). Penelitian ini dipublikasikan dalam *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*.

Metodologi:

- a. Analisis numerik menggunakan OpenSees pada 4-story dan 8-story steel frames
- b. Nonlinear time history analysis dengan 44 ground motion records
- c. Perbandingan antara retrofit menggunakan BRBs vs conventional bracing

Temuan Utama:

1. External BRBs meningkatkan energy dissipation capacity sebesar 200-250%
2. Pengurangan maksimum interstory drift ratio: 55-65%
3. Connection detail menggunakan gusset plates dengan bolted connections
4. Keunggulan dari sisi konstruktabilitas: dapat dipasang tanpa mengganggu fungsi hunian/operasional bangunan.

Relevansi:

Meskipun penelitian ini fokus pada struktur baja, prinsip external bracing dan connection detailing dapat diadaptasi untuk aplikasi pada struktur RC eksisting.

1. Penelitian tentang Soft-Story Retrofit (Kumar & Singh, 2023)

Kumar dan Singh (2023) melakukan tinjauan komprehensif tentang teknik retrofitting untuk soft-story buildings, dipublikasikan dalam *Materials Today: Proceedings*.

Metodologi:

- a. Review sistematis terhadap 85 publikasi (2010-2023)
- b. Kategorisasi metode retrofit : local strengthening vs global strengthening
- c. Analisis biaya – manfaat untuk berbagai Teknik

Temuan Utama:

- a. Local Strengthening (Jacketing):
 - 1) Concrete jacketing: paling ekonomis untuk kolom individual (cost index = 1,0).
 - 2) Steel jacketing: tahan korosi, tetapi memerlukan perlindungan terhadap kebakaran (cost index = 1,3).
 - 3) FRP jacketing: berat sendiri ringan dengan penambahan berat minimum (cost index = 2,5).
- b. Global Strengthening (Bracing dan Shear Walls):
 - 1) Steel bracing: memberikan dampak minimal terhadap pekerjaan pondasi dan waktu konstruksi tercepat (cost index = 1,8).
 - 2) Dinding geser beton bertulang (RC shear wall): memberikan peningkatan kekakuan terbesar, tetapi memiliki berat terbesar (cost index = 2,2).
 - 3) Panel isian pracetak (prefabricated infill panels): memberikan kekakuan sedang dengan kemudahan pelaksanaan yang baik (cost index = 2,0).

Kesimpulan:

Untuk bangunan soft-story dengan tingkat ketidakcukupan yang terbatas, steel bracing memberikan rasio biaya–manfaat terbaik (3,0–3,5) karena meminimalkan pekerjaan pondasi dan memiliki waktu konstruksi 40–50% lebih cepat dibandingkan dinding geser beton bertulang.

Relevansi:

Penelitian ini mengkonfirmasi bahwa steel bracing merupakan pilihan retrofit yang efektif untuk mengendalikan drift dan meningkatkan kapasitas lateral pada bangunan rangka beton bertulang, sehingga relevan dengan tujuan retrofit Gedung D yang difokuskan pada peningkatan kekakuan lateral dan pengurangan simpangan antar lantai.

B. Penelitian tentang Eccentrically Braced Frame (EBF)

1. Penelitian Aghazadeh Ardebili & Mirghaderi (2024)

Aghazadeh Ardebili dan Mirghaderi (2024) mengembangkan pendekatan desain (design approach) untuk K-shaped EBF berdasarkan Theory of Plastic Mechanism Control, dipublikasikan dalam *Structures*.

Metodologi:

- a. Pengembangan model analitis (analytical model) untuk K-EBF dengan variasi panjang link
- b. Validasi menggunakan data eksperimental dari 12 spesimen.
- c. Implementasi dalam perangkat lunak desain (design software tool).

Temuan Utama:

- a. Rasio panjang link optimal untuk K-EBF: $e/(M_p/V_p) = 1,2 - 1,4$.

- b. Faktor *overstrength* yang direkomendasikan: $\Omega = 1,35 - 1,50$.
- c. Jarak antar *web stiffener* untuk perilaku yang stabil: $s \leq d/4$ untuk $\gamma_p > 0,06$ rad.
- d. Persamaan desain yang disederhanakan untuk memudahkan penerapan praktis.

Signifikansi:

Meskipun berfokus pada konfigurasi K (K-configuration), prinsip desain untuk balok link dapat diadaptasi untuk konfigurasi X-EBF yang digunakan dalam penelitian ini.

2. Penelitian Seismic Performance EBF Short-Links (Abbas et al., 2023)

Abbas et al. (2023) meneliti kinerja seismik (*seismic performance*) sistem eccentrically braced frames dengan *short-links* melalui pengujian eksperimental dan analisis numerik.

Metodologi:

- a. Pengujian siklik pada 6 spesimen *short-link* ($e = 0,8M_p/V_p$ hingga $1,6M_p/V_p$).
- b. *Finite element modeling* menggunakan ABAQUS.
- c. Studi parametrik terhadap panjang link, jarak *web stiffener*, dan rasio lebar–tebal *flange*.

Temuan Utama:

- a. Link dengan $e = 1,0M_p/V_p$ (*pure shear*):
 - 1) Kapasitas rotasi $\gamma_p = 0,10 - 0,12$ radian.

- 2) Disipasi energi per siklus: 85–90% dari model elasto-plastis ekuivalen (EPP).
 - 3) Degradasi kekuatan minimal ($< 10\%$) hingga $\gamma_p = 0,08$ rad.
 - 4) *Web buckling* tidak terjadi dengan jarak *stiffener* yang memadai ($s \leq d/5$).
- b. Link dengan $e = 1,4M_p/V_p$ (*shear-dominated*):
- 1) Kapasitas rotasi $\gamma_p = 0,08$ radian.
 - 2) Terjadi kombinasi *shear* dan *flexural yielding*.
 - 3) *Flange local buckling* mulai muncul pada $\gamma_p > 0,06$ rad.

Rekomendasi desain:

- a. Untuk aplikasi seismik, disarankan menggunakan $e \leq 1,2M_p/V_p$ untuk mendapatkan daktilitas maksimum.
- b. Tebal minimum *web*: $t_w \geq d/40$.
- c. Kekompakan *flange*: $b_f/2t_f \leq 0,30\sqrt{E/(R_y \cdot f_y)}$.

Relevansi:

Data eksperimental ini memberikan dasar keyakinan dalam pemodelan balok link di ETABS serta dalam penetapan kriteria penerimaan (*acceptance criteria*) untuk evaluasi kinerja sistem EBF.

C. Penelitian tentang Seismic Assessment dengan SNI 1726 : 2019

1. Penelitian Evaluasi Kinerja dengan SNI 2019 (Pratama et al., 2024)

Pratama et al. (2024) melakukan studi evaluasi ulang (*re-evaluation*) gedung produksi yang dirancang dengan SNI 1726:2012 menggunakan ketentuan SNI 1726:2019, yang dipublikasikan dalam *First: Jurnal Teknologi*

Metodologi:

- a. Pemodelan tiga dimensi menggunakan ETABS v20.
- b. Analisis respons spektrum untuk kedua standar (SNI 2012 dan SNI 2019).
- c. Analisis pushover untuk mengevaluasi tingkat kinerja (*performance level*).
- d. Perbandingan parameter kebutuhan gempa (*seismic demand parameters*).

Temuan utama:

- a. Peningkatan kebutuhan gempa (SNI 2012 → SNI 2019):
 - 1) SDS (design spectral acceleration) meningkat 28–35% untuk zona Yogyakarta.
 - 2) Gaya geser dasar (base shear) meningkat 30–40%.
 - 3) Simpangan antar lantai (story drift) meningkat 25–35%.
- b. Evaluasi kinerja:
 - 1) Gedung yang dinilai “aman” berdasarkan SNI 2012 mengalami kegagalan geser pada 8 balok ketika dievaluasi dengan SNI 2019.
 - 2) Tingkat kinerja turun dari Life Safety (LS) menjadi Collapse Prevention (CP).
 - 3) Retrofit diperlukan dengan menggunakan CFRP atau *steel jacketing*.

c. Biaya retrofit:

- 1) Pelapisan CFRP: Rp 850.000/m² (lebih ekonomis).
- 2) *Steel jacketing*: Rp 1.200.000/m².
- 3) Total biaya retrofit: 12–15% dari biaya konstruksi awal.

Signifikansi:

Penelitian ini menunjukkan bahwa banyak gedung eksisting di Indonesia yang dirancang dengan standar lama tidak lagi memenuhi persyaratan SNI 2019 dan memerlukan retrofit, sehingga sangat relevan dengan kondisi Gedung D yang dirancang sekitar tahun 2012.

2. Penelitian Comparative Study SNI 2012 vs 2019 (Luthfiah, 2022)

Luthfiah (2022) melakukan evaluasi kinerja seismik bangunan 5 lantai dengan perbandingan SNI 1726:2012 dan SNI 1726:2019 menggunakan pushover analysis, Thesis Universitas Brawijaya.

Metodologi:

- a. Model bangunan: rangka momen beton bertulang biasa (RC OMRF) 5 lantai dengan faktor reduksi gempa $R = 3,5$ yang berlokasi di Malang.
- b. Perangkat lunak: SAP2000 v21.
- c. Analisis pushover dengan *capacity spectrum method* (ATC-40).
- d. Evaluasi tingkat kinerja: IO, LS, dan CP.

Temuan Utama:

- a. Hasil SNI 2012 :
 - 1) Arah X: tingkat kinerja = Immediate Occupancy (IO).

2) Arah Y: tingkat kinerja = Damage Control (antara IO dan LS).

3) Simpangan target: $D_x = 45 \text{ mm}$, $D_y = 52 \text{ mm}$.

b. Hasil SNI 2019 :

1) Arah X: tingkat kinerja = Damage Control.

2) Arah Y: tingkat kinerja = Life Safety (LS).

3) Simpangan target: $D_x = 62 \text{ mm (+38\%)}$, $D_y = 74 \text{ mm (+42\%)}$.

c. Implikasi:

1) Struktur OMRF eksisting umumnya mengalami penurunan satu tingkat kinerja ketika dievaluasi dengan SNI 2019.

2) Mekanisme soft-story menjadi lebih menonjol akibat kontribusi mode yang lebih tinggi.

3) Direkomendasikan retrofit untuk gedung-gedung kritis seperti fasilitas pendidikan dan rumah sakit.

Relevansi:

Pola penurunan tingkat kinerja ini selaras dengan kondisi yang diharapkan pada Gedung D ketika dievaluasi dengan SNI 1726:2019, sehingga memperkuat justifikasi penelitian ini.

D. Penelitian tentang Performance Based Seismic Design di Indonesia

1. Studi PBSB pada High-Rise Building (Repository UGM, 2018)

Penelitian tentang Performance-Based Seismic Design pada apartemen 39 lantai di Indonesia menggunakan ETABS dan PERFORM-3D (ETD UGM, 2018).

Metodologi:

a. Perancangan awal: analisis respons spektrum menggunakan ETABS.

- b. Evaluasi rinci: analisis riwayat waktu nonlinier (*nonlinear response history analysis*) menggunakan PERFORM-3D.
- c. Gerakan tanah: 7 pasangan rekaman yang diskalakan ke tingkat DBE dan MCE.
- d. Evaluasi kinerja: tingkat IO, LS, dan CP.

Temuan Utama:

Usage Ratio pada IO Level:

- a. Batas balok: $UR = 1,24$ (melampaui batas)
- b. Batas kolom: $UR = 6,41$ (jauh melampaui batas).
- c. Batas lentur dinding geser: $UR = 1,46$ (melampaui batas).

Kesimpulan:

- a. Struktur tidak memenuhi bahkan untuk tingkat IO sehingga memerlukan *redesign* atau retrofit.
- b. Pendekatan PBSO lebih informatif dibanding desain berbasis gaya (*force-based design*).
- c. Pemilik bangunan dapat memilih tingkat kinerja sasaran (IO/LS/CP) berdasarkan pertimbangan ekonomi.

Signifikansi:

Penelitian ini menunjukkan bahwa pendekatan PBSO lebih tepat untuk evaluasi bangunan eksisting karena secara eksplisit memperlihatkan distribusi kerusakan dan memungkinkan pengambilan keputusan berbasis kinerja.

E. Penelitian tentang Pushover Analysis menggunakan ETABS

1. Seismic Assessment RC Frame dengan Pushover (Rahman & Islam, 2024)

Rahman dan Islam (2024) melakukan penilaian seismik (*seismic assessment*) struktur rangka beton bertulang menggunakan analisis pushover statik nonlinier di ETABS, yang dipublikasikan dalam *International Journal of Research and Scientific Innovation*.

Metodologi:

- a. Model bangunan: rangka beton bertulang 10 lantai yang dirancang berdasarkan BNBC 2017 (Bangladesh).
- b. ETABS 2017 untuk analisis pushover.
- c. Properti sendi plastis (*hinge properties*) mengacu pada ATC-40 (1996) dan FEMA 356 (2000).
- d. Evaluasi kinerja berdasarkan ASCE 41-13.

Temuan utama – hasil kurva kapasitas:

- a. Simpangan target maksimum: 4,26 inci (108 mm).
- b. Kapasitas gaya geser dasar: 628,8 kip (2.797 kN).
- c. Titik kinerja (*performance point*): berada pada tingkat Immediate Occupancy (IO).

Urutan pembentukan sendi plastis:

- a. First yield: balok pada lantai 1–2 ($\text{drift} \approx 0,5\%$).
- b. Progressive yielding: balok lantai 3–5 ($\text{drift} \approx 1,0\%$).
- c. Column yielding: kolom lantai 1 ($\text{drift} \approx 1,8\%$) → indikasi mekanisme soft-

story.

- d. Kerusakan luas (extensive damage): drift $> 2,5\%$.

Rekomendasi:

- a. Analisis pushover efektif untuk mengidentifikasi elemen-elemen lemah.
- b. Tingkat kinerja dari ATC-40 sesuai untuk konteks Indonesia dan Asia Selatan.
- c. Retrofit diperlukan jika kinerja $<$ Life Safety untuk tingkat gempa DBE.

Relevansi:

Metodologi pushover menggunakan ETABS dengan hinge properties dari ATC-40/FEMA 356 akan diadopsi dalam penelitian ini dengan penyesuaian terhadap spektrum gempa SNI 1726:2019.

F. Sintesis Tinjauan Pustaka dan Kesenjangan Penelitian

Berdasarkan tinjauan sistematis terhadap publikasi terkini (2018-2024), dapat disimpulkan:

Temuan Kunci dari Penelitian Terdahulu:

1. Tentang retrofit dengan *steel bracing*:
 - a. *External steel bracing* terbukti efektif untuk retrofit bangunan beton bertulang (Freddi et al., 2024).
 - b. *Steel bracing* memiliki rasio biaya–manfaat 3,0–3,5, terbaik untuk bangunan *soft-story* (Kumar & Singh, 2023).
 - c. Waktu konstruksi retrofit menggunakan *steel bracing* 40–50% lebih cepat dibanding retrofit dengan *shear wall*.

2. Tentang sistem EBF:

- a. *Short shear links* dengan $e \leq 1,2M_p/V_p$ memberikan kapasitas rotasi tertinggi, yaitu 0,10–0,12 rad (Abbas et al., 2023).
- b. Faktor *overstrength* optimal berada pada $\Omega = 1,35 - 1,50$ (Aghazadeh Ardebili & Mirghaderi, 2024).
- c. Jarak *web stiffener* bersifat kritis: $s \leq d/4$ untuk mempertahankan perilaku histeretik yang stabil.

3. Tentang dampak SNI 1726:2019:

- a. Peningkatan *seismic demand* sebesar 28–40% dibanding SNI 2012 (Pratama et al., 2024; Luthfiah, 2022).
- b. Banyak gedung eksisting mengalami penurunan satu tingkat kinerja ketika dievaluasi dengan SNI 2019.
- c. Retrofit bersifat mendesak untuk gedung-gedung kritis (pendidikan, rumah sakit, dan gedung pemerintah).

4. Tentang PBSD dan analisis pushover:

- a. Pendekatan PBSD lebih informatif untuk bangunan eksisting (UGM Repository, 2018).
- b. Analisis pushover dengan ETABS menggunakan *hinge properties* ATC-40/FEMA 356 terbukti valid dan andal (Rahman & Islam, 2024).
- c. Metode titik kinerja (*performance point method*) dengan *capacity spectrum* sesuai untuk konteks Indonesia.

G. Kesenjangan Penelitian

1. Kesenjangan pertama: aplikasi spesifik pada gedung pendidikan di Indonesia

a. Kondisi penelitian terdahulu:

Penelitian-penelitian sebelumnya (Freddi et al., 2024; Kumar & Singh, 2023) terutama berfokus pada bangunan komersial atau residensial di negara maju dengan konteks seismik dan regulasi yang berbeda dengan Indonesia. Metode retrofit secara umum telah mapan dan terdokumentasi dengan baik untuk kategori bangunan tersebut.

b. Aspek yang belum terpecahkan:

Terdapat keterbatasan pengetahuan mengenai kinerja seismik gedung pendidikan di Indonesia yang dirancang berdasarkan SNI 2002–2012 ketika dievaluasi menggunakan SNI 1726:2019 yang lebih ketat. Kesesuaian penggunaan *external bracing* pada gedung pendidikan dengan keterbatasan operasional yang signifikan (tidak dapat dievakuasi total selama retrofit) belum dikaji secara mendalam. Analisis biaya–manfaat yang spesifik untuk konteks Indonesia, dengan mempertimbangkan biaya material lokal, biaya tenaga kerja, dan profil risiko seismik regional, masih sangat terbatas dalam literatur.

c. Urgensi penelitian:

Gedung pendidikan memiliki karakteristik unik: tingkat okupansi tinggi, kebutuhan keberlanjutan operasional (*operational continuity*) yang ketat, dan tanggung jawab keselamatan publik yang besar. Strategi retrofit harus mampu meminimalkan

gangguan operasional sambil menjamin tingkat keamanan yang memadai, sehingga memerlukan pendekatan yang berbeda dari bangunan komersial biasa.

2. Kesenjangan kedua: konfigurasi X-EBF untuk retrofit struktur beton bertulang dengan ketidakberaturan vertikal

a. Kondisi penelitian terdahulu:

Perilaku *shear link* pada sistem EBF telah terdokumentasi dengan baik melalui penelitian eksperimental dan numerik (Abbas et al., 2023). Pendekatan desain untuk K-EBF juga telah dikembangkan secara rinci oleh Aghazadeh Ardebili dan Mirghaderi (2024) berdasarkan *Theory of Plastic Mechanism Control*.

b. Aspek yang belum terpecahkan:

Konfigurasi dan penempatan optimal sistem X-EBF pada struktur rangka beton bertulang dengan ketidakberaturan vertikal yang berpotensi menyebabkan konsentrasi deformasi antar lantai belum sepenuhnya dipahami.”

“Interaksi antara rangka beton eksisting dan sistem X-EBF baja baru, khususnya dalam hal distribusi beban, kompatibilitas deformasi, dan kekakuan sambungan, masih memerlukan kajian lebih lanjut.”

“Perilaku sistem X-EBF saat elemen link mengalami yielding dan pengaruhnya terhadap rangka beton eksisting—apakah tetap elastis atau ikut membentuk sendi plastis—belum sepenuhnya terkarakterisasi dalam literatur

c. Urgensi penelitian:

Bangunan dengan ketidakberaturan vertikal yang menyebabkan konsentrasi drift pada lantai tertentu merupakan kategori struktur yang sangat rentan terhadap

keruntuhan saat gempa. Konfigurasi X-EBF menawarkan keunggulan arsitektural karena dapat dipasang pada fasad eksterior tanpa mengganggu ruang interior, namun interaksi yang kompleks dengan struktur eksisting memerlukan kajian komprehensif untuk memastikan efektivitas dan keamanan system.

3. Kesenjangan ketiga: implementasi SNI 1726:2019 untuk evaluasi bangunan eksisting

a. Kondisi penelitian terdahulu:

Penelitian-penelitian terkini (Pratama et al., 2024; Luthfiyah, 2022) menunjukkan bahwa SNI 1726:2019 meningkatkan *seismic demand* secara signifikan dibanding versi sebelumnya. Akibatnya, banyak bangunan eksisting tidak memenuhi persyaratan standar terbaru ini.

b. Aspek yang belum terpecahkan:

Metodologi yang sistematis untuk melakukan penilaian terhadap bangunan eksisting yang dirancang dengan peraturan lama menggunakan kerangka SNI 1726:2019 belum tersedia secara komprehensif. Terdapat ambiguitas mengenai kriteria penerimaan (*acceptance criteria*) yang sebaiknya digunakan di Indonesia—apakah mengadopsi ASCE 41-17, Eurocode 8, atau mengembangkan kriteria khusus Indonesia yang mempertimbangkan karakteristik lokal.

Target retrofit yang tepat juga belum terdefinisi dengan jelas: apakah semua bangunan eksisting harus mencapai tingkat kinerja Life Safety untuk gempa DBE,

atau perlu pendekatan bertingkat berdasarkan faktor keutamaan (*importance factor*) dan kategori risiko bangunan.

c. Urgensi penelitian:

Indonesia memiliki ribuan gedung eksisting yang dirancang berdasarkan standar lama. Tanpa kerangka penilaian yang jelas dan prioritas retrofit yang terstruktur, implementasi SNI 1726:2019 pada stok bangunan eksisting akan sulit dan berpotensi tidak efisien dalam penggunaan sumber daya publik.

4. Kesenjangan keempat: validasi pemodelan sistem hibrida beton–baja

a. Kondisi penelitian terdahulu:

Analisis pushover menggunakan ETABS secara umum dianggap andal dan telah banyak divalidasi untuk struktur konvensional (Rahman & Islam, 2024). Properti sendi plastis berdasarkan ATC-40 dan FEMA 356 juga banyak digunakan dan secara umum diterima dalam praktik rekayasa.

b. Aspek yang belum terpecahkan:

Validasi pemodelan sambungan antara sistem EBF baja dan rangka beton eksisting masih terbatas, khususnya terkait pemilihan pendekatan pemodelan yang tepat (sambungan kaku, semi-kaku, atau fleksibel) dan pengaruhnya terhadap hasil analisis.

Kecocokan (*appropriateness*) berbagai standar properti sendi (EC8, ASCE 41, FEMA 356) untuk material beton Indonesia dengan kuat tekan tipikal $f'_c = 20 - 25$ MPa belum dievaluasi secara sistematis.

Kecukupan analisis pushover mode pertama untuk bangunan menengah (*mid-rise*)

dengan retrofit EBF, terutama terkait efek P-Delta dan kontribusi mode lebih tinggi, masih memerlukan verifikasi lebih lanjut.

c. Urgensi penelitian:

Akurasi pemodelan numerik secara langsung memengaruhi keputusan desain retrofit. Model yang terlalu tidak konservatif dapat menghasilkan desain yang tidak aman, sedangkan model yang terlalu konservatif menghasilkan retrofit yang tidak ekonomis dan sulit diimplementasikan.

5. Kesenjangan kelima: implementasi praktis dan konstruktabilitas

a. Kondisi penelitian terdahulu:

Penelitian menunjukkan bahwa *external bracing* dapat meminimalkan gangguan operasional dibanding metode retrofit lain (Freddi et al., 2024). Analisis biaya–manfaat secara umum juga menunjukkan hasil yang menguntungkan untuk sistem *steel bracing* (Kumar & Singh, 2023).

b. Aspek yang belum terpecahkan:

Urutan konstruksi (*construction sequence*) yang optimal untuk meminimalkan gangguan operasional pada gedung yang harus tetap berfungsi selama retrofit belum terdokumentasi dengan baik dalam konteks Indonesia. Kebutuhan fondasi untuk *external bracing*—apakah memerlukan pondasi telapak baru atau dapat dihubungkan ke fondasi eksisting—masih memerlukan klarifikasi berdasarkan kondisi tanah lokal.

Protokol inspeksi pascagempa dan kebutuhan pemeliharaan untuk struktur yang telah diretrofit belum tersedia dalam panduan nasional.

Pertimbangan estetika dan tingkat penerimaan pemilik serta pengguna bangunan terhadap perubahan tampilan fasad juga belum banyak dikaji di Indonesia.

c. Urgensi penelitian:

Solusi retrofit yang baik secara teknis dapat gagal pada tahap implementasi jika aspek konstruktabilitas, estetika, dan pemeliharaan yang realistis tidak diperhitungkan. Faktor-faktor implementasi di lapangan menjadi penting untuk memastikan adopsi luas teknologi retrofit seismik di Indonesia.

6. Posisi penelitian ini dalam mengisi kesenjangan

Penelitian ini dirancang untuk menjawab kesenjangan-kesenjangan tersebut melalui lima pendekatan utama:

a. Pertama, studi kasus komprehensif pada gedung pendidikan

Penelitian ini melakukan evaluasi menyeluruh terhadap Gedung D Fakultas Geografi UGM sebagai representasi gedung pendidikan tipikal di zona seismik Yogyakarta. Gedung yang dirancang berdasarkan SNI 2002–2012 ini akan dievaluasi menggunakan SNI 1726:2019 dengan mempertimbangkan kendala nyata seperti keberlanjutan operasional, keterbatasan anggaran, dan pertimbangan arsitektural.

b. Kedua, analisis rinci retrofit X-EBF untuk struktur dengan ketidakberaturan vertikal

Penelitian ini mengembangkan pemodelan numerik komprehensif yang mencakup struktur eksisting dan sistem X-EBF retrofit. Interaksi antara rangka beton dan *steel bracing* saat link mengalami *yielding* dianalisis secara rinci. Optimasi lokasi,

konfigurasi, dan penampang anggota untuk mencapai efektivitas maksimum menjadi fokus utama desain retrofit.

c. Ketiga, kerangka penilaian berbasis kinerja

Penelitian ini mengimplementasikan SNI 1726:2019 untuk penilaian bangunan eksisting dengan menggunakan pendekatan berbasis kinerja (*performance-based*). Perbandingan beberapa kriteria penerimaan (ASCE 41-17, EC8-2004, FEMA 356) dilakukan untuk memberikan rekomendasi yang sesuai dengan konteks Indonesia. Ukuran kinerja yang jelas dalam bentuk level IO–LS–CP dengan batasan drift kuantitatif ditetapkan sebagai dasar evaluasi.

d. Keempat, validasi metodologi pemodelan

Penelitian ini mengembangkan prosedur sistematis untuk pemodelan sistem hibrida beton–baja dalam ETABS dengan justifikasi yang jelas terhadap asumsi pemodelan, termasuk kekakuan sambungan, properti sendi plastis, dan efek P-Delta. Analisis sensitivitas terhadap parameter pemodelan kunci dilakukan untuk memastikan ketahanan (*robustness*) hasil analisis.

e. Kelima, rekomendasi praktis

Penelitian ini menyusun panduan desain (*design guidelines*) untuk retrofit X-EBF yang dapat diterapkan pada bangunan serupa di Indonesia. Estimasi biaya berbasis kondisi pasar Indonesia, rekomendasi urutan konstruksi untuk meminimalkan gangguan, dan data kinerja dasar (*baseline performance data*) bagi pemilik bangunan akan menjadi keluaran praktis penelitian.

7. Kontribusi yang diharapkan

a. Kontribusi akademis:

Penelitian ini menyediakan validasi prosedur pemodelan sistem hibrida beton–baja menggunakan perangkat lunak komersial ETABS yang banyak digunakan di Indonesia. Kerangka perbandingan untuk beberapa standar kriteria penerimaan (ASCE 41, EC8, FEMA 356) dalam konteks material dan praktik konstruksi Indonesia akan menjadi dasar akademis bagi upaya standardisasi ke depan. Dokumentasi mengenai perilaku bangunan dengan ketidakberaturan vertikal di bawah tuntutan gempa SNI 2019 akan menambah khazanah ilmu di bidang rekayasa gempa di Indonesia.

b. Kontribusi praktis:

Penelitian ini menghasilkan templat solusi retrofit yang dapat diadopsi untuk gedung pendidikan di zona seismik tinggi di Indonesia dengan penyesuaian minimal. Data pendukung keputusan (*decision support data*) mengenai urgensi retrofit dan perkiraan biaya akan membantu pemilik dan pengelola gedung dalam pengambilan keputusan yang rasional dengan anggaran terbatas. Data kinerja dasar yang dihasilkan dapat digunakan untuk penilaian portofolio bangunan pada kampus dengan banyak gedung sejenis.

c. Kontribusi kebijakan:

Penelitian ini menyediakan dasar bukti kuantitatif untuk memprioritaskan program retrofit pada bangunan publik berdasarkan penilaian kerentanan. Masukan untuk pengembangan kriteria penerimaan khusus Indonesia yang mempertimbangkan karakteristik material lokal, praktik konstruksi, dan bahaya seismik akan bermanfaat bagi lembaga penyusun standar. Data biaya–manfaat yang realistis akan

mendukung keputusan investasi publik terkait program keselamatan seismik di tingkat nasional dan regional.

