

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Indonesia menempati posisi strategis namun rawan di kawasan Ring of Fire, sebagai zona pertemuan tiga lempeng tektonik utama (Eurasia, Indo-Australia, dan Pasifik), yang menjadikannya salah satu wilayah dengan aktivitas seismik tertinggi di dunia. Berdasarkan data historis dari United States Geological Survey (USGS) dan Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG), Indonesia telah mengalami lebih dari 160 kejadian gempa bumi dengan magnitudo ≥ 7.0 sejak tahun 1900 hingga saat ini. Aktivitas seismik yang tinggi ini mengakibatkan dampak signifikan terhadap bangunan dan infrastruktur, baik dari segi korban jiwa maupun kerugian material yang mencapai miliaran rupiah setiap tahunnya.

Salah satu peristiwa gempa yang memberikan pelajaran penting tentang kerentanan bangunan terhadap beban lateral adalah Gempa Yogyakarta yang terjadi pada 27 Mei 2006 pukul 05:53 WIB. Gempa dengan magnitudo momen Mw 6.4 dan kedalaman 10 km ini berpusat di Samudera Hindia sekitar 25 km sebelah selatan kota Yogyakarta (Walter et al., 2008). Meskipun magnitudonya relatif moderat, gempa ini menyebabkan dampak katastropik dengan lebih dari 6.000 korban jiwa dan sekitar 1 juta orang kehilangan tempat tinggal. Tingkat kerusakan yang masif ini disebabkan oleh kombinasi beberapa faktor: kedekatan episentrum dengan area pemukiman padat, kedalaman fokus yang dangkal (10

km), dan kondisi tanah lokal yang mengamplifikasi percepatan tanah. Hasil penelitian Pawirodikromo (2018) menunjukkan bahwa Peak Ground Acceleration (PGA) yang teramati pada wilayah terparah mencapai 0.50-0.51g, dengan pola distribusi PGA yang tidak membentuk lingkaran konsentris dari episentrum, melainkan memanjang mengikuti jejak Sesar Opak (Opak Fault). Nilai PGA maksimum terjadi pada endapan tanah lunak dengan klasifikasi Site Class D hingga E, yang terletak sekitar 2 km di sebelah barat Sungai Opak.

Amplifikasi percepatan tanah akibat efek site condition ini menjadi faktor kunci tingginya tingkat kerusakan struktural yang teramati, khususnya pada bangunan beton bertulang yang tidak dirancang dengan standar seismik memadai. Kerusakan struktural yang teramati pada bangunan-bangunan beton bertulang pasca Gempa 2006 meliputi: (1) kegagalan kolom pada lantai dasar (soft-story mechanism), (2) retak diagonal pada dinding pengisi dan sambungan balok-kolom, (3) spalling beton pada zona sendi plastis, dan (4) keruntuhan parsial pada bangunan dengan irregularitas struktural.

Evaluasi struktur gedung yang dilakukan oleh peneliti dari Universitas Gadjah Mada (UGM) menunjukkan bahwa banyak bangunan kampus mengalami tingkat kerusakan moderat hingga berat, dengan Interstory Drift Ratio (IDR) yang melebihi batas Life Safety sebesar 2.0% pada beberapa lokasi kritis. Gedung D Fakultas Geografi Universitas Gadjah Mada merupakan salah satu bangunan yang berlokasi dalam kawasan rawan gempa Yogyakarta.

Gedung ini merupakan struktur beton bertulang 4 lantai dengan denah persegi panjang dan total luas bangunan sekitar 5.600 m². Berdasarkan dokumen

perencanaan dan tahun pembangunan, gedung ini dirancang menggunakan SNI 03-1726:2002 untuk beban gempa, yang pada periode tersebut menetapkan parameter desain seismik untuk zona Yogyakarta dengan Spectral Design Acceleration $SDS = 0.6g$ dan Response Modification Factor R yang berkisar antara 3.5 hingga 8.5 tergantung pada sistem rangka yang digunakan.

Struktur gedung menggunakan sistem rangka portal momen beton bertulang (Moment Resisting Frame) tanpa sistem pengaku lateral tambahan seperti dinding geser (shear wall) atau bracing. Konfigurasi struktural ini memberikan fleksibilitas arsitektural yang tinggi, namun di sisi lain memiliki keterbatasan dalam hal kekakuan lateral dan kapasitas disipasi energi gempa. Salah satu karakteristik struktural yang menjadi perhatian adalah keterbatasan kekakuan lateral sistem rangka momen beton bertulang tanpa elemen pengaku tambahan, sehingga kapasitas disipasi energi gempa dan margin keamanan terhadap simpangan antar lantai menjadi terbatas ketika dievaluasi dengan ketentuan SNI 1726:2019 yang lebih ketat.

Perkembangan pemahaman tentang bahaya gempa dan pembaruan peta hazard seismik Indonesia menghasilkan revisi signifikan dalam standar desain struktur. SNI 1726:2019 yang merupakan adaptasi dari ASCE 7-16 (American Society of Civil Engineers) secara substansial meningkatkan persyaratan desain seismik untuk wilayah Yogyakarta. Standar terbaru ini menetapkan nilai $SDS = 0.8g$ untuk wilayah Yogyakarta, yang berarti terjadi peningkatan sebesar 33% dibandingkan SNI 03-1726:2002, disertai dengan spektrum respons yang lebih ketat pada rentang periode fundamental gedung rendah hingga menengah ($T = 0.2$

- 1.0 detik). Konsekuensi dari peningkatan parameter seismik ini adalah peningkatan gaya geser dasar (base shear) dan Interstory Drift Ratio (IDR) dalam rentang 30-60% tergantung pada karakteristik dinamis struktur.

Studi komparatif yang dilakukan oleh Syarif et al. (2023) terhadap gedung di Yogyakarta menunjukkan bahwa penerapan SNI 1726:2019 menghasilkan peningkatan base shear yang cukup signifikan dibandingkan dengan SNI 1726:2012, dengan implikasi bahwa struktur-struktur eksisting yang dirancang berdasarkan standar generasi sebelumnya berpotensi tidak memenuhi kriteria keamanan minimum berdasarkan pemahaman seismik terkini.

Untuk mengidentifikasi tingkat kerentanan bangunan terhadap gempa, metode Rapid Visual Screening (RVS) berdasarkan FEMA P-154 telah banyak digunakan di Indonesia, termasuk di wilayah Yogyakarta (Wahyuni et al., 2017). RVS merupakan metode evaluasi cepat yang mengidentifikasi bangunan berpotensi rentan terhadap bahaya gempa berdasarkan observasi visual dari eksterior dan interior bangunan. Metode ini memberikan skor numerik yang berkorelasi dengan probabilitas keruntuhan bangunan pada level gempa rencana. Parameter yang dievaluasi dalam RVS meliputi: tipe sistem struktur, usia bangunan, jumlah lantai, irregularitas horizontal dan vertikal (termasuk soft-story), kondisi material, dan klasifikasi tanah. Bangunan dengan skor RVS di bawah nilai ambang batas (cut-off score ≤ 2.0 untuk zona seismik tinggi) dikategorikan sebagai prioritas tinggi yang memerlukan evaluasi detail lebih lanjut menggunakan metode analisis nonlinier seperti pushover analysis.

Faktor irregularitas vertikal, khususnya mekanisme soft-story, menjadi

salah satu parameter paling kritis dalam penilaian RVS karena dapat menurunkan skor hingga 2 poin. Soft-story terjadi ketika kekakuan lateral suatu lantai (biasanya lantai dasar) kurang dari 70% kekakuan lantai di atasnya, yang mengakibatkan konsentrasi deformasi pada lantai tersebut dan meningkatkan risiko kegagalan kolom secara simultan.

Dalam penelitian ini, mekanisme soft-story dibahas sebagai salah satu bentuk ketidakberaturan vertikal yang sering menimbulkan keruntuhan pada bangunan beton bertulang dan menjadi salah satu fokus evaluasi kinerja seismik Gedung D.

Menghadapi tantangan kerentanan seismik bangunan eksisting, berbagai metode retrofitting struktur telah dikembangkan dan diteliti dalam dua dekade terakhir. Metode retrofit yang umum digunakan antara lain: (1) penambahan dinding geser beton bertulang (shear wall), (2) perkuatan kolom dan balok menggunakan Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) atau steel jacketing, (3) isolasi dasar (base isolation), (4) penambahan damper, dan (5) penambahan sistem bracing baja. Setiap metode memiliki keunggulan dan keterbatasan masing-masing dalam hal efektivitas struktural, biaya, waktu konstruksi, dan dampak terhadap fungsi operasional gedung.

Salah satu metode yang menunjukkan keunggulan signifikan untuk aplikasi retrofit adalah penggunaan sistem bracing baja, khususnya Eccentrically Braced Frame (EBF). Sistem EBF merupakan pengembangan dari sistem Concentrically Braced Frame (CBF) dan Moment Resisting Frame (MRF), yang menggabungkan keunggulan kekakuan tinggi dari CBF dengan kapasitas

daktilitas dari MRF. Dalam sistem EBF, elemen bracing diagonal dihubungkan dengan balok melalui segmen pendek yang disebut link beam, yang berfungsi sebagai fuse element—elemen yang dirancang untuk terlebih dahulu mengalami plastifikasi terkontrol (yielding) saat terjadi gempa besar, sementara elemen struktur lainnya (kolom, bracing, dan balok di luar link) tetap dalam kondisi elastis.

Penelitian mengenai aplikasi EBF untuk retrofit struktur beton bertulang menunjukkan hasil yang menjanjikan. Sistem EBF dengan konfigurasi X (X-EBF) memiliki beberapa keunggulan untuk aplikasi retrofit gedung eksisting: (1) dapat dipasang pada sisi eksterior fasad sehingga meminimalkan interferensi dengan tata ruang interior dan aktivitas operasional gedung, (2) waktu konstruksi relatif singkat (6-12 bulan) dibandingkan dengan metode shear wall beton yang memerlukan pekerjaan pembongkaran, bekisting, pengecoran, dan curing, (3) sistem link beam bertindak sebagai elemen fuse yang terlebih dahulu mengalami plastifikasi terkontrol sehingga kerusakan terkonsentrasi dan mudah diperbaiki pasca-gempa, dan (4) kombinasi kekakuan tinggi dari bracing dengan daktilitas dari link memberikan performa seismik yang superior dengan kemampuan mengurangi drift ratio secara signifikan.

Studi numerik dan eksperimental menunjukkan bahwa retrofit menggunakan sistem EBF mampu meningkatkan base shear capacity sebesar 40-65%, mengurangi Interstory Drift Ratio (IDR) sebesar 50-70%, dan meningkatkan kapasitas disipasi energi struktur secara keseluruhan. Konfigurasi link beam dalam EBF dapat didesain dalam dua mode: (1) shear-dominated link

dengan panjang pendek ($e \leq 1.6 \text{ Mp/Vp}$), yang memberikan daktilitas tinggi dan rotasi plastis hingga 0.08-0.10 radian, atau (2) flexure-dominated link dengan panjang lebih panjang ($e \geq 2.6 \text{ Mp/Vp}$), yang memberikan kekakuan lebih tinggi namun daktilitas lebih rendah.

Untuk aplikasi retrofit pada gedung eksisting, shear-dominated link umumnya lebih disukai karena kemampuan disipasi energi yang superior dan konfigurasi yang lebih kompak. Berdasarkan seluruh latar belakang yang telah diuraikan, penelitian ini difokuskan pada evaluasi kinerja seismik menyeluruh terhadap Gedung D Fakultas Geografi UGM dalam dua kondisi: (1) kondisi eksisting tanpa perkuatan tambahan, dan (2) kondisi pasca-perkuatan (retrofit) menggunakan sistem bracing baja eksentris tipe X (X-EBF). Evaluasi dilakukan melalui pemodelan tiga dimensi (3D) dan analisis numerik menggunakan software ETABS v23 student version, dengan menerapkan dua metode analisis utama sesuai SNI 1726:2019: Analisis Respons Spektrum Linier untuk mengevaluasi respons struktur terhadap spektrum desain gempa Yogyakarta berdasarkan SNI 1726:2019 dan menghitung gaya-gaya internal, displacement, dan base shear. Analisis Pushover Nonlinier berdasarkan FEMA 356 (2000), ATC-40 (1996), dan ASCE 41-17 untuk memperoleh kurva kapasitas (capacity curve), performance point, dan level kinerja struktur pada berbagai tingkat intensitas gempa: Immediate Occupancy (IO), Life Safety (LS), dan Collapse Prevention (CP).

Parameter kinerja yang dievaluasi meliputi: periode fundamental struktur (T_1), base shear capacity (V_b), Interstory Drift Ratio (IDR), rotasi plastis elemen

(khususnya link beam pada sistem EBF), distribusi sendi plastis pada elemen struktur, displacement target, dan mekanisme keruntuhan struktur. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi konkret mengenai kebutuhan dan efektivitas retrofit X-EBF untuk meningkatkan keselamatan seismik Gedung D, sekaligus menjadi referensi bagi evaluasi dan perkuatan gedung-gedung pendidikan sejenis di wilayah rawan gempa Indonesia.

B. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

- 1) Bagaimana kinerja seismik struktur eksisting Gedung D Fakultas Geografi UGM terhadap gempa desain (Design Basis Earthquake/DBE) berdasarkan SNI 1726:2019 dalam hal kapasitas lateral (base shear), interstory drift ratio (IDR), dan performance levels?
- 2) Bagaimana pengaruh retrofit menggunakan sistem Eccentrically Braced Frame tipe X (EBF-X) terhadap peningkatan kinerja seismik struktur dalam hal kapasitas lateral, pengurangan drift ratio, dan pencapaian performance levels yang lebih baik?
- 3) Bagaimana perbandingan kuantitatif parameter kinerja antara kondisi eksisting dan pasca-retrofit, meliputi base shear (V_b), interstory drift ratio (IDR), rotasi plastis link EBF, dan performance levels (Immediate Occupancy/IO, Life Safety/LS, Collapse Prevention/CP) berdasarkan analisis pushover dan respon spektrum?

C. Batasan Masalah

Untuk memfokuskan arah penelitian, ditetapkan batasan masalah sebagai berikut:

1. Objek Penelitian: Gedung D Fakultas Geografi UGM, struktur beton bertulang 4 lantai dengan sistem rangka portal momen tanpa sistem pengaku lateral.
2. Fungsi Bangunan: Gedung pendidikan dengan kategori risiko IV dan Importance Factor $I_e = 1.5$ sesuai SNI 1727:2020.
3. Strategi Retrofit: Penambahan sistem Eccentrically Braced Frame tipe X (EBF-X) pada eksterior fasad dengan link shear-dominated dan profil baja HWF 200.200.8.12 mm.
4. Tujuan perencanaan sistem X-EBF pada penelitian ini adalah meningkatkan kapasitas geser dasar dan mengurangi interstory drift ratio sehingga kinerja seismik Gedung D yang pada kondisi eksisting berada pada rentang Immediate Occupancy–Life Safety bergeser menuju Immediate Occupancy dengan margin keamanan yang lebih besar pada kondisi pasca-retrofit.
5. Software Analisis: Pemodelan dan analisis menggunakan ETABS versi 23 dengan fiber PMM hinges untuk elemen beton dan hinges bilinear untuk elemen baja, termasuk P-Delta effects dan rigid diaphragm floors.
6. Metode Analisis:

Analisis linier: Modal analysis, analisis statik ekuivalen, dan analisis respon spektrum untuk struktur eksisting dan pasca-retrofit sesuai SNI 1726:2019.

Analisis nonlinier: Static pushover analysis berdasarkan FEMA 356 untuk

memperoleh kurva kapasitas, performance point, dan level kinerja struktur.

7. Parameter Seismik: Analisis menggunakan parameter gempa untuk lokasi Yogyakarta berdasarkan SNI 1726:2019 dengan Site Class D (tanah sedang).
8. Evaluasi Kinerja: Penilaian kinerja struktur menggunakan kriteria interstory drift ratio (IDR) dan performance levels berdasarkan ASCE 41-17 dan FEMA 356, dengan kategori:
Immediate Occupancy (IO): $IDR \leq 1.0\%$
Life Safety (LS): $IDR \leq 2.0\%$
Collapse Prevention (CP): $IDR \leq 4.0\%$
9. Batasan Analisis: Analisis pushover dilakukan pada arah utama struktur (arah dengan periode fundamental terbesar) dengan pola beban sesuai mode pertama struktur.

D. Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk:

1. Mengevaluasi kinerja seismik struktur eksisting Gedung D Fakultas Geografi UGM berdasarkan SNI 1726:2019 menggunakan analisis respon spektrum dan analisis pushover untuk mengidentifikasi defisiensi kapasitas terhadap gempa desain (Design Basis Earthquake/DBE).
2. Menganalisis efektivitas sistem retrofit Eccentrically Braced Frame tipe X (EBF-X) dalam meningkatkan kinerja seismik struktur melalui perbandingan kapasitas lateral (base shear), interstory drift ratio (IDR), dan performance levels antara kondisi eksisting dan pasca-retrofit.

3. Mengidentifikasi pola pembentukan sendi plastis dan mekanisme keruntuhan struktur pada kondisi eksisting dan pasca-retrofit untuk memahami perilaku inelastis struktur.
4. Memberikan rekomendasi teknis mengenai penerapan sistem EBF-X sebagai solusi retrofit untuk gedung-gedung pendidikan sejenis di wilayah Yogyakarta yang dirancang dengan standar seismik lama.
5. Memvalidasi prosedur pemodelan numerik struktur hybrid beton-baja menggunakan ETABS dengan kriteria kinerja ASCE 41-17 dan SNI 1726:2019 untuk bangunan beton bertulang dengan retrofit bracing baja.

E. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Manfaat Praktis
 - a. Bagi Pengelola Bangunan: Memberikan informasi teknis mengenai tingkat keamanan seismik Gedung D Fakultas Geografi UGM berdasarkan standar terkini (SNI 1726:2019) sebagai dasar pengambilan keputusan untuk perawatan dan perkuatan struktur.
 - b. Bagi Praktisi Engineering: Menyediakan referensi teknis mengenai prosedur evaluasi kinerja seismik bangunan eksisting dan desain retrofit menggunakan sistem Eccentrically Braced Frame (EBF) yang dapat diterapkan pada gedung-gedung sejenis.
 - c. Bagi Institusi Pendidikan: Mendukung pengelolaan aset bangunan kampus melalui penyediaan baseline data kinerja seismik dan rekomendasi perkuatan untuk memperpanjang masa layan bangunan dengan tetap memenuhi standar

keselamatan.

2. Manfaat Akademis

- a. Menambah literatur ilmiah dalam bidang rekayasa struktur, khususnya terkait evaluasi kinerja seismik bangunan beton bertulang eksisting dan teknologi retrofit menggunakan sistem bracing baja eksentris (EBF).
- b. Memberikan contoh penerapan analisis pushover nonlinier dan analisis respon spektrum berdasarkan SNI 1726:2019 dan ASCE 41-17 pada kasus nyata gedung pendidikan di zona seismik tinggi.
- c. Menjadi referensi untuk penelitian lanjutan mengenai retrofit seismik bangunan eksisting, khususnya dalam konteks adaptasi dari standar seismik lama (SNI 2002) ke standar baru (SNI 2019).

3. Manfaat Kebijakan

- a. Memberikan masukan kepada pembuat kebijakan terkait pentingnya evaluasi ulang dan perkuatan bangunan-bangunan publik yang dirancang dengan standar seismik lama, terutama di wilayah rawan gempa seperti Yogyakarta.
- b. Mendukung implementasi SNI 1726:2019 dalam praktik evaluasi dan retrofit bangunan eksisting, sehingga meningkatkan kesiapsiagaan infrastruktur pendidikan terhadap ancaman gempa bumi.