

STUDI *RETROFIT* DENGAN *BRACING* BAJA PADA BANGUNAN BERSEJARAH

Lady Zabrina Khangora^{1*} dan Roesdiman Soegiarso²

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

²Program Studi Doktor Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No. 1, Jakarta, Indonesia
lady.327232007@stu.untar.ac.id

Masuk: 24-07-2025, revisi: 31-10-2025, diterima untuk diterbitkan: 07-11-2025

ABSTRACT

Historic buildings are an important part of cultural heritage that must be preserved. However, most of these buildings were constructed before the implementation of modern seismic design codes, making them highly vulnerable to earthquake loads. This study aims to evaluate the structural capacity of a historic building located in Jakarta and to propose a retrofit strategy using steel bracing elements, based on a performance-based seismic evaluation approach in accordance with ASCE/SEI 41-17. Seismic loads were determined based on acceleration maps and response spectra provided by PuSGeN. Structural analysis was performed using MIDAS GEN software, incorporating material degradation due to the building's age. The analysis was conducted using MIDAS GEN software, with material properties in the structural model adjusted to account for degradation due to the building's age. The evaluation results indicate that the existing structure is unable to withstand the pseudo-seismic forces based on BSE-1E (capacity ratio greater than 1.0), and the maximum inter-story lateral displacement of 0.1655 m does not meet the allowable drift limit. Therefore, a retrofit strategy was implemented by adding diagonal and cross steel bracings with HB 300x300x10x15 profiles in specific structural zones. After retrofitting, the bracings carried approximately 31.25% of the total lateral force, demonstrating effective performance in resisting seismic loads. The retrofit significantly improved the seismic behavior of the structure, achieving a life safety performance level, with a maximum displacement of 0.0331 m, which remains below the allowable limit of 1%.

Keywords: Historic building; structural retrofit; steel bracing; seismic performance

ABSTRAK

Bangunan bersejarah merupakan bagian penting dari warisan budaya yang perlu dilestarikan. Namun, sebagian besar bangunan tersebut dibangun sebelum adanya peraturan ketahanan gempa modern, sehingga memiliki kerentanan tinggi terhadap beban gempa. Studi ini bertujuan untuk mengevaluasi kapasitas struktur eksisting dari salah satu bangunan cagar budaya di Jakarta dan merancang strategi *retrofit* menggunakan elemen baja sebagai pengaku tambahan, dengan pendekatan seismik berbasis kinerja sesuai standar ASCE/SEI 41-17. Beban gempa berdasarkan peta percepatan dan respon spektrum untuk bangunan eksisting dari PuSGeN. Analisis dilakukan menggunakan perangkat lunak MIDAS GEN dengan material yang digunakan dalam model struktur mempertimbangkan penurunan mutu akibat usia bangunan. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa struktur eksisting tidak mampu menahan gaya seismik pseudo berdasarkan BSE-1E (rasio kapasitas lebih dari 1,0) dan defleksi lateral antar tingkat maksimum yang terjadi adalah 0,1655 m sehingga tidak memenuhi batas simpangan antar tingkat yang ditentukan. Oleh karena itu, strategi *retrofit* dilakukan dengan menambahkan *bracing* baja dengan profil HB 300x300x10x15 secara diagonal dan melintang di zona struktural tertentu. Setelah *retrofit*, persentase gaya yang terjadi pada *bracing* sebesar 31,25% menunjukkan bahwa *bracing* sudah bekerja cukup efektif dalam menahan gaya lateral. *Retrofit* tersebut secara signifikan meningkatkan performa seismik struktur secara signifikan dan mampu mencapai tingkat kinerja *life safety*, di mana simpangan maksimum yang terjadi yaitu 0,0331 m dan masih berada di bawah batasan izin 1%.

Kata kunci: Bangunan bersejarah; retrofit struktural; pengaku tambahan baja; kinerja seismik

1. PENDAHULUAN

Bangunan bersejarah di Jakarta, memiliki nilai historis, budaya, dan arsitektur yang tinggi. Telah berdiri sejak masa kolonial, menjadikan gedung ini memiliki nilai historis yang cukup panjang. Namun, seiring berjalannya waktu, bangunan ini mengalami penurunan kondisi fisik dan struktur, bahkan saat ini dalam kondisi terbengkalai dan tidak difungsikan secara optimal.

Bangunan bersejarah, yang dibangun pada masa kolonial atau periode sebelumnya, dirancang dengan peraturan dan standar konstruksi yang berbeda dibandingkan dengan persyaratan bangunan modern. Peraturan yang digunakan pada

saat itu tidak mempertimbangkan banyak faktor keselamatan dan ketahanan yang sekarang menjadi perhatian utama, yaitu risiko gempa bumi. Akibatnya, banyak bangunan bersejarah yang kini rentan terhadap kerusakan baik struktural maupun nonstruktural.

Terletak di persimpangan tujuh lempeng tektonik, dengan banyak gunung berapi aktif di wilayah tersebut, Indonesia memiliki banyak aktivitas tektonik dan vulkanik yang memicu gempa bumi. Gempa bumi sebelumnya telah menunjukkan bahwa memiliki struktur tahan gempa menjadi suatu keharusan untuk menjamin keselamatan penghuninya (Kusumastuti et al., 2024). Oleh karena itu, penting untuk melakukan *retrofit* elemen struktur guna memastikan kestabilan dan keberlanjutan bangunan bersejarah, serta melindungi nilai sejarah yang terkandung di dalamnya.

Penelitian ini diharapkan dapat mengetahui kemampuan struktur eksisting bangunan bersejarah terhadap ketahanan gempa serta studi *retrofit* untuk meningkatkan kinerja seismik dalam rangka menjaga konservasi bangunan sebagai cagar budaya yang memiliki nilai bersejarah sekaligus memperpanjang masa layan struktur bangunan.

Retrofit pada bangunan bersejarah

Menurut Rivera (2024), salah satu teknik *retrofit* pada bangunan bersejarah adalah dengan sistem penyangga baja (*steel bracing system*). Sistem penyangga baja dapat menambahkan kekakuan lateral dan ketahanan terhadap beban gempa dengan memasukkan penyangga diagonal ke dalam kerangka bangunan. Penyangga ini dirancang untuk menyerap dan mendisipasi energi gempa, mengurangi deformasi struktural, dan meningkatkan stabilitas (Furtado, 2023). Dasar teori dari metode ini terletak pada peningkatan jalur beban lateral bangunan serta distribusi gaya gempa yang lebih merata ke seluruh struktur.

Sistem penyangga baja bekerja dengan menciptakan kerangka kaku yang membatasi pergerakan lateral dan mendistribusikan gaya gempa lebih merata ke seluruh struktur. Hal ini dicapai melalui pemasangan penyangga baja diagonal, yang dapat dikonfigurasi dalam berbagai pola seperti *X-bracing*, *K-bracing*, atau *chevron bracing* (Caruso et al., 2023). Penyangga ini ditempatkan secara strategis dalam rangka bangunan untuk memberikan dukungan maksimum serta menyerap dan mendisipasi energi gempa, sehingga mengurangi tegangan pada elemen dan mencegah deformasi berlebihan.

Salah satu keunggulan utama dari sistem penyangga baja adalah kemampuannya untuk secara signifikan meningkatkan stabilitas keseluruhan bangunan bersejarah dalam kondisi seismik. Selain itu, sistem penyangga baja menawarkan fleksibilitas tinggi dalam desain dan pemasangannya. Sistem ini dapat disesuaikan agar sesuai dengan kerangka struktural yang sudah ada pada bangunan bersejarah tanpa memerlukan perubahan besar pada arsitektur aslinya (Aghabeigi et al., 2020). Penyangga baja dapat disembunyikan di dalam dinding atau diintegrasikan ke dalam desain bangunan dengan cara yang meminimalkan dampak visualnya dan memastikan karakter historis bangunan tetap terjaga (Binda & Cardani, 2019).

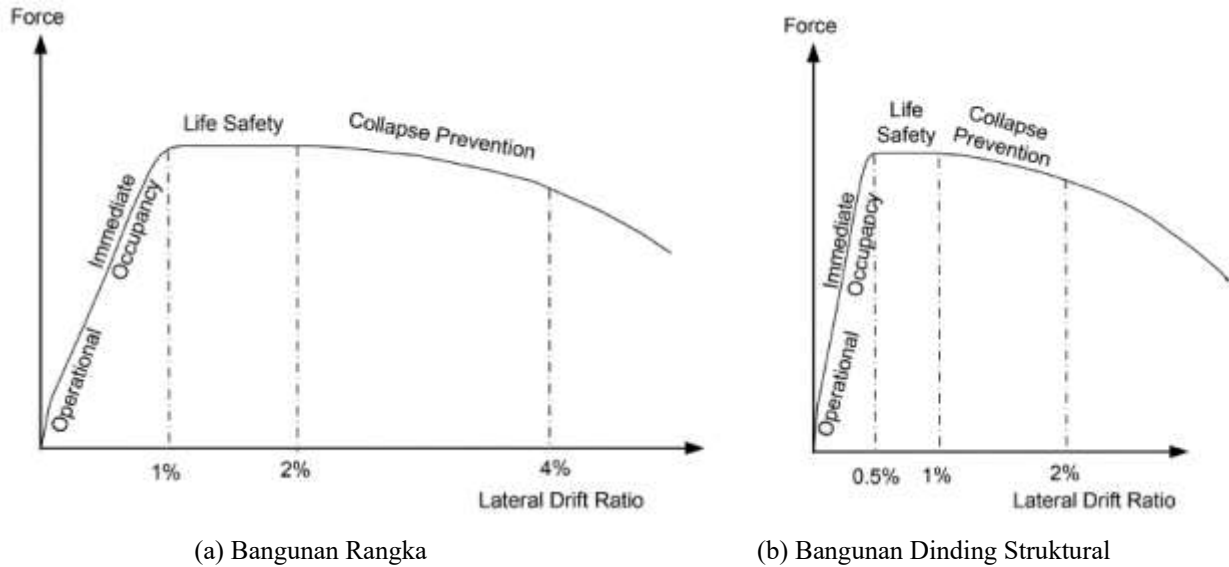
Pendekatan seismik berbasis kinerja

Pendekatan berbasis kinerja paling relevan dalam kondisi di mana penting untuk memastikan kinerja bangunan yang diharapkan saat terjadi gempa bumi. Hal ini dapat diaplikasikan salah satunya pada bangunan yang memiliki nilai sejarah atau budaya (FEMA P-58-7). Analisis dengan pendekatan berbasis kinerja diadopsi dari ASCE/SEI 41-17, di mana melakukan evaluasi seismik dan *retrofit* bangunan eksisting untuk menunjukkan kesesuaian atau pencapaian Sasaran Kinerja yang dipilih. Tujuan kinerja dasar untuk bangunan gedung eksisting (TKDBGE) adalah tujuan kinerja khusus yang bervariasi berdasarkan kategori risiko seperti ditunjukkan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Tujuan kinerja dasar untuk bangunan gedung eksisting (ASCE/SEI 41-17)

Kategori Risiko	BSE-1E	BSE-2E
I dan II	Kinerja Struktural <i>Life Safety</i>	Kinerja Struktural <i>Collapse Prevention</i>
III	Kinerja Struktural <i>Damage Control</i>	Kinerja Struktural <i>Limited Safety</i>
IV	Kinerja Struktural <i>Immediate Occupancy</i>	Kinerja Struktural <i>Life Safety</i>

Kinerja struktural secara global ditentukan oleh simpangan lateral struktur. Batasan untuk rasio simpangan lateral struktur yang diizinkan terdapat pada Gambar 1. Penilaian dilakukan dengan membandingkan perpindahan ultimit yang terjadi dengan batasan izin, di mana jika batasan izin tidak terlampaui, maka dapat disimpulkan tujuan kinerja struktural tercapai.



Gambar 1. Batasan izin rasio simpangan lateral (ACI 374.2R-13)

Gaya seismik pseudo dan gaya geser tingkat

Berdasarkan ASCE/SEI 41-17, gaya seismik pseudo yang digunakan dihitung sesuai dengan Persamaan 1 dan didistribusikan sesuai dengan Persamaan 2-3. Untuk bangunan enam tingkat atau kurang, nilai k diizinkan diambil sebesar 1,0.

$$V = C S_a W \quad (1)$$

$$F_x = \frac{w_x h_x^k}{\sum_{i=1}^n w_i h_i^k} V \quad (2)$$

$$V_j = \sum_{x=j}^n F_x \quad (3)$$

dengan V = gaya seismik pseudo, C = faktor modifikasi untuk menghubungkan perpindahan inelastik maksimum yang diharapkan terhadap perpindahan yang dihitung untuk respons elastik, S_a = akselerasi spektral respons pada periode fundamental di arah yang ditinjau, W = bobot seismik total bangunan, termasuk beban mati total (kN), V_j = geser pada tingkat j (kN), n = jumlah tingkat total di atas level tanah, j = nomor tingkat yang ditinjau, w_i = bagian bobot bangunan total W yang berlokasi atau didesain untuk tingkat i (kN), w_x = bagian bobot bangunan total W yang berlokasi atau didesain untuk tingkat x (kN), h_i = tinggi (m) dari dasar ke level lantai i , h_x = tinggi (m) dari dasar ke level lantai x .

2. METODE PENELITIAN

Prosedur penelitian

Penelitian dimulai dengan pengumpulan data eksisting untuk gedung bersejarah yang berlokasi di Kota Jakarta. Kemudian dilakukan pemodelan struktur menggunakan program MIDAS GEN. Pembebanan yang diberikan berdasarkan fungsi bangunan sesuai SNI 1727:2020, dapat dilihat pada Tabel 2. Setelah itu, dilakukan pengecekan simpangan lateral dan kekuatan struktur eksisting terhadap gaya seismik pseudo. Kemudian dilanjutkan dengan studi *retrofit* dengan *bracing* baja. Hasil analisis akan dievaluasi menggunakan kriteria dan tujuan kinerja struktur setelah dilakukan *retrofit*.

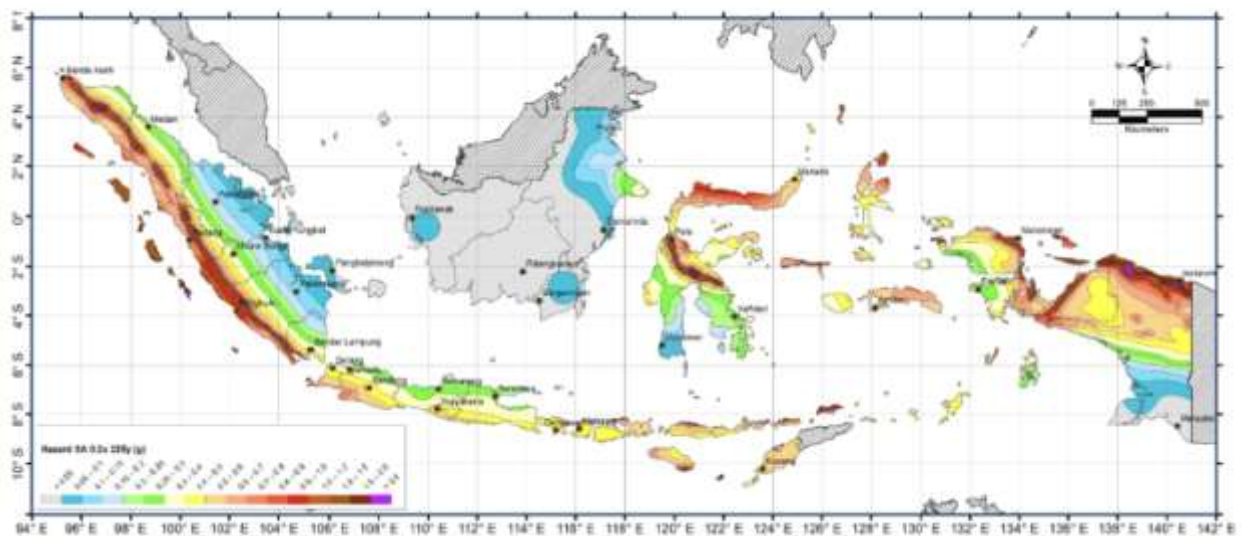
Tabel 2. Beban mati tambahan dan beban hidup

Penggunaan	Beban Mati Tambahan (kN/m ²)	Beban Hidup (kN/m ²)
Kantor	1,50	2,40
Lobi	1,35	4,79
Tangga	3,60	4,79
Toilet	1,50	2,87
Atap Dak	1,35	1,92
Atap	0,35	0,96

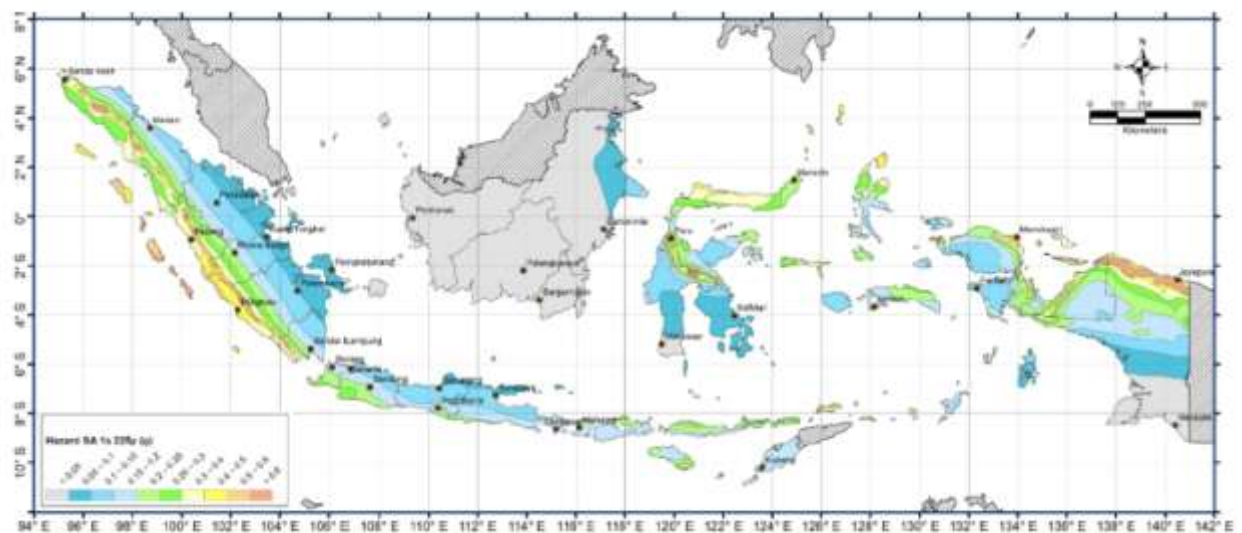
Deskripsi dan data bangunan eksisting

Bangunan eksisting bersejarah terdiri dari 4 (empat) lantai dan akan digunakan sebagai perkantoran. Lokasi bangunan berada di Kota Jakarta. Pada bangunan eksisting bersejarah, dari hasil pemeriksaan elemen struktur di lapangan, sistem struktur penahan lateral yang digunakan merupakan sistem dinding penumpu dinding geser batu bata polos biasa dengan R (koefisien modifikasi respons) = 1,5, Ω_0 (faktor kuat lebih sistem) = 2,5, dan C_d (faktor pembesaran defleksi) = 1,25.

Berdasarkan fungsi bangunan sebagai perkantoran (kategori risiko II) dengan tujuan kinerja dasar *life safety*, maka tingkat bahaya gempa yang digunakan adalah BSE-1E. Respon spektrum target yang digunakan, diambil dari peta gempa dengan periode ulang 225 tahun (probabilitas terlampaui 20% dalam 50 tahun) pada Gambar 2-3. Nilai parameter dapat dilihat pada Tabel 3 dan kriteria material yang digunakan untuk bangunan bersejarah eksisting dapat dilihat pada Tabel 4.



Gambar 2. Peta percepatan spektrum respon 1,0 detik untuk probabilitas terlampaui 20% dalam 50 tahun (Pusat Studi Gempa Nasional, 2021)



Gambar 3. Peta percepatan spektrum respon 0,2 detik untuk probabilitas terlampaui 20% dalam 50 tahun (Pusat Studi Gempa Nasional, 2021)

Tabel 3. Parameter analisis respon spektrum

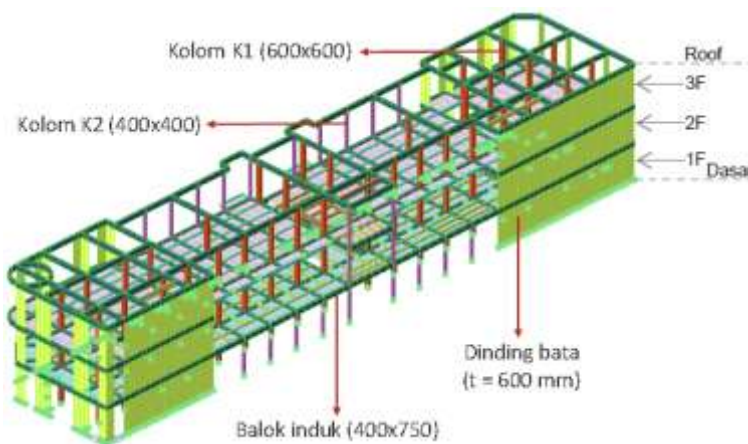
Parameter	Nilai
Kategori Risiko	II
Faktor keutamaan	1,00
Kategori desain seismik	D
Kelas dan koefisien situs	SE, $F_a = 2,26$, $F_v = 3,75$
MCE_r	$S_S = 0,30$, $S_I = 0,15$
DBE ($2/3 MCE_r$)	$S_{DS} = 0,45$, $S_{DI} = 0,38$

Tabel 4. Kriteria material yang digunakan

Beton (berat jenis = 2400 kg/m^3)	Kuat tekan silinder, f'_c
Pelat lantai	$f'_c = 30 \text{ MPa}$ ($E = 17396 \text{ MPa}$)
Balok	$f'_c = 30 \text{ MPa}$ ($E = 17396 \text{ MPa}$)
Kolom	$f'_c = 30 \text{ MPa}$ ($E = 17396 \text{ MPa}$)
Baja tulangan (berat jenis = 7850 kg/m^3)	Mutu dan kuat leleh, f_y
Tulangan longitudinal dan geser	$f_y = 227,5 \text{ MPa}$
Dinding bata (berat jenis = 1800 kg/m^3)	Modulus elastisitas, E dan kuat tekan, f'_m
Dinding geser batu bata polos	$E = 7000 \text{ MPa}$ $f'_m = 7 \text{ MPa}$
Baja struktural (berat jenis = 7850 kg/m^3)	Mutu dan kuat leleh, f_y
Bracing tambahan	SS400, $f_y = 245 \text{ MPa}$, $f_u = 370 \text{ MPa}$

Pemodelan bangunan eksisting

Bangunan eksisting dimodelkan menggunakan perangkat lunak MIDAS GEN. Dalam model ini, struktur diasumsikan terjepit pada lantai dasar, terlihat pada Gambar 4. Sistem struktur menggunakan sistem dinding geser batu bata polos biasa. Balok dan kolom dimodelkan sebagai elemen *frame*. Sedangkan dinding batu bata dan pelat lantai dimodelkan sebagai elemen *plate*.



Gambar 4. Bentuk 3D pemodelan struktur

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Evaluasi bangunan eksisting

Evaluasi menggunakan pendekatan statik ekuivalen. Elemen struktur bangunan eksisting dievaluasi ketahanannya terhadap gaya seismik pseudo akibat gempa BSE-1E dengan perhitungan pada Tabel 5, di mana gaya seismik pseudo didistribusikan secara langsung ke setiap nodal. Hasil evaluasi desain kolom dan balok induk dari kombinasi pembebanan dapat dilihat pada Tabel 6-7.

Tabel 5. Perhitungan gaya seismik pseudo

Lantai	Wx (kN)	hx (m)	C	k	Wx hx ^k	Fx (kN)
Roof	9206,84	18,10	1	1	166643,73	6450,00
3F	26284,60	11,52	1	1	302798,62	11719,92
2F	31643,63	5,72	1	1	181001,58	7005,73

Tabel 6. Hasil evaluasi balok induk terhadap gaya seismik

Posisi	Kekuatan Momen Negatif			Kekuatan Momen Positif			Kekuatan Geser		
	N(-) Mu (kN.m)	N(-) ϕ Mn (kN.m)	Rasio-N	P(+) Mu (kN.m)	P(+) ϕ Mn (kN.m)	Rasio-P	Vu (kN)	ϕ Vc (kN)	Rasio-V
I	704,23	558,33	1,26	650,49	558,33	1,17	687,12	168,11	1,48
M	1024,69	558,33	1,84	1059,70	558,33	1,90	978,17	174,32	2,08
J	750,82	558,33	1,34	707,33	558,33	1,27	985,91	174,32	2,10

Tabel 7. Hasil evaluasi kolom terhadap gaya seismik

Profil		ϕ Pn-max	Pu (kN)	Mcy (kN.m)	McZ (kN.m)	Vu.end (kN)	Rasio-V.end
Bc (m)	Hc (m)	(kN)	Rasio-P	Rasio-My	Rasio-Mz	Vu.mid (kN)	Rasio-V.mid
K2		2441,03	31,47	12,13	231,09	59,85	0,60
0,4	0,4		2,24	2,24	2,24	59,85	0,59
K1		5412,47	-643,68	28,12	617,98	149,80	2,08
0,6	0,6		2,42	2,42	2,42	149,80	2,08

Dari hasil evaluasi kolom dan balok induk, dapat disimpulkan bahwa bangunan eksisting tidak mampu menahan gaya seismik pseudo BSE-1E, di mana terdapat kolom dan balok induk yang melewati kapasitas momen dan/ atau geser.

Simpangan antar tingkat izin (Δ_a) didapatkan dari SNI 1726:2019, di mana bangunan ini termasuk ke dalam tipe struktur dinding geser kantilever batu bata (dinding bata tidak diperhitungkan untuk memikul gempa) dengan kategori risiko I atau II, sehingga didapatkan batasan 0,010 h_{sx} (tinggi tingkat di bawah tingkat). Pengecekan simpangan antar tingkat dapat dilihat pada Tabel 8 dan grafik evaluasi simpangan antar tingkat dapat dilihat pada Gambar 5.

Tabel 8. Pengecekan simpangan antar tingkat bangunan eksisting

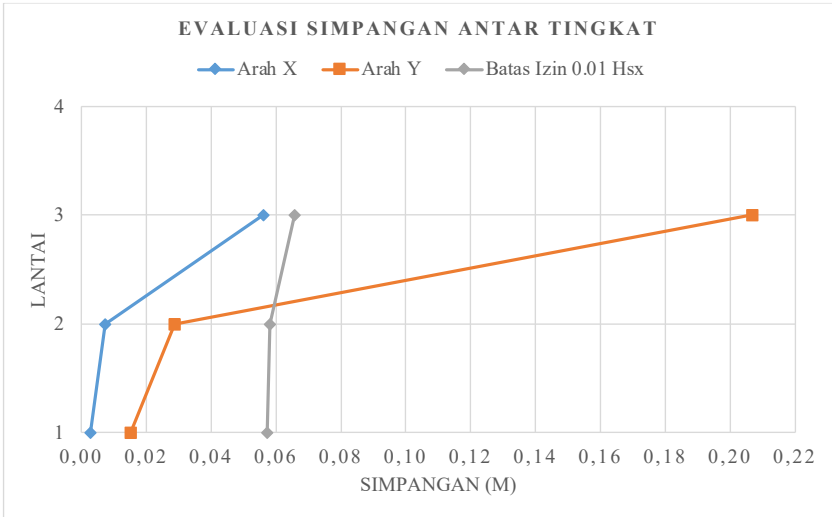
Load Case	Lantai	Ketinggian antar lantai (m)	Simpangan maksimum pada seluruh elemen vertikal		
			Simpangan (m)	Modifikasi simpangan (m)	Rasio simpangan antar lantai
EQX(RS)	3F	6,58	0,0448	0,0560	0,0085
EQX(RS)	2F	5,80	0,0058	0,0072	0,0012
EQX(RS)	1F	5,72	0,0021	0,0027	0,0005
EQY(RS)	3F	6,58	0,1655	0,2068	0,0314
EQY(RS)	2F	5,80	0,0231	0,0289	0,0050
EQY(RS)	1F	5,72	0,0122	0,0153	0,0027

Dari hasil evaluasi defleksi lateral antar tingkat di atas, pada struktur eksisting terdapat simpangan maksimum antar tingkat yang terjadi telah melewati batasan izinnnya.

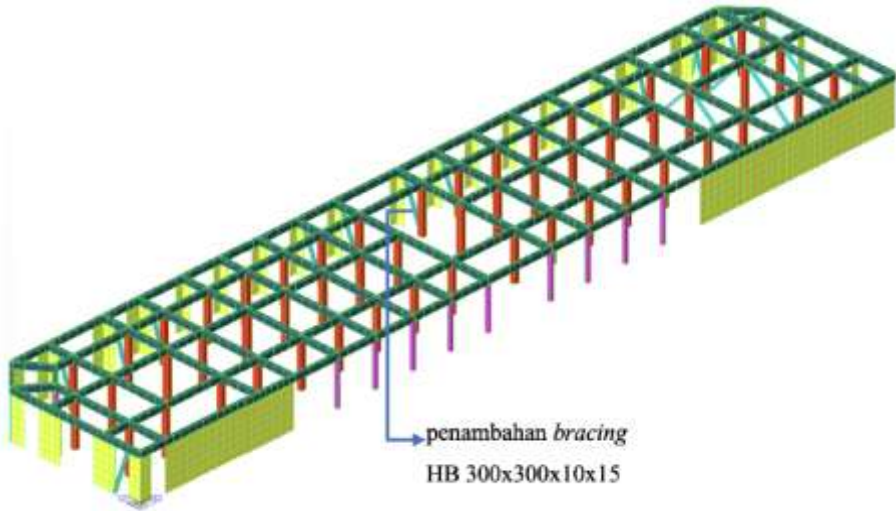
Analisis *retrofit* dengan penambahan *bracing* baja

Metode *retrofit* yang digunakan adalah dengan penambahan *bracing*. *Bracing* menggunakan material baja dengan profil HB 300x300x10x15. Lokasi *bracing* distudi hingga didapatkan keseluruhan elemen struktur penahan beban lateral yaitu kolom dan balok induk memenuhi kapasitas momen dan geser masing-masing elemennya. Lokasi penambahan *bracing* dapat dilihat pada Gambar 6 untuk lantai 1F, Gambar 7 untuk lantai 2F, dan Gambar 8 untuk lantai 3F dan Roof.

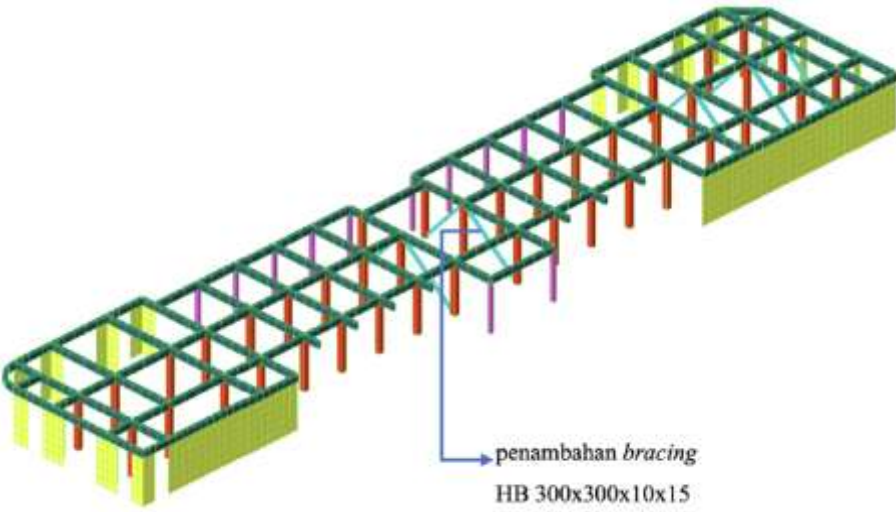
Hasil analisis kapasitas balok induk dan kolom setelah dilakukan *retrofit* dapat dilihat pada Tabel 9-10. Sedangkan hasil analisis kapasitas *bracing* HB 300x300x10x15 dapat dilihat pada Tabel 11.



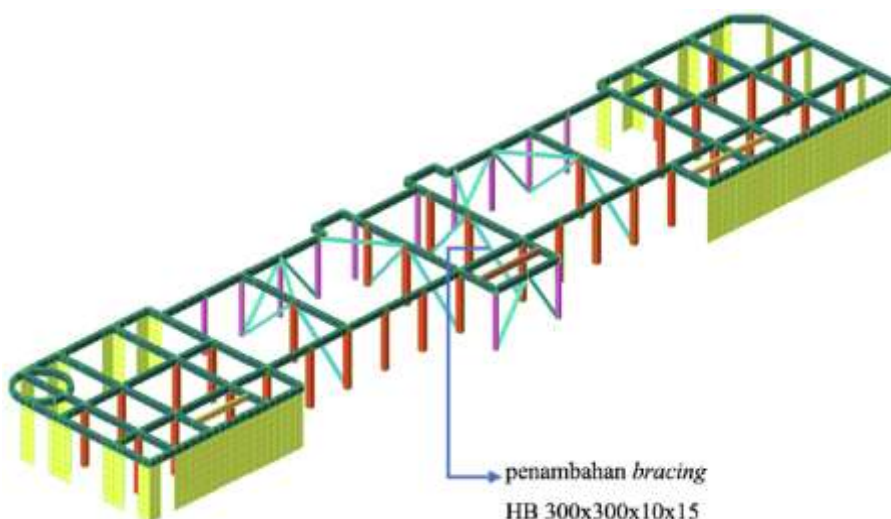
Gambar 5. Grafik evaluasi simpangan antar tingkat bangunan eksisting



Gambar 6. Lokasi penambahan *bracing* pada lantai 1F



Gambar 7. Lokasi penambahan *bracing* pada lantai 2F



Gambar 8. Lokasi penambahan *bracing* pada lantai 3F dan Roof

Tabel 9. Hasil analisis kapasitas balok induk setelah dilakukan *retrofit*

Posisi	Kekuatan Momen Negatif			Kekuatan Momen Positif			Kekuatan Geser		
	N(-) Mu (kN.m)	N(-) ϕ Mn (kN.m)	Rasio-N	P(+) Mu (kN.m)	P(+) ϕ Mn (kN.m)	Rasio-P	Vu (kN)	ϕ Vc (kN)	Rasio-V
I	397,26	558,33	0,71	399,92	558,33	0,72	440,34	162,13	0,96
M	403,03	558,33	0,72	433,28	558,33	0,78	435,62	159,86	0,96
J	415,96	558,33	0,75	412,74	558,33	0,74	436,79	170,10	0,94

Tabel 10. Hasil analisis kapasitas kolom setelah dilakukan *retrofit*

Profil		ϕ Pn-max	Pu (kN)	Mcy (kN.m)	Mcz (kN.m)	Vu.end (kN)	Rasio-V.end
Bc (m)	Hc (m)	(kN)	Rasio-P	Rasio-My	Rasio-Mz	Vu.mid (kN)	Rasio-V.mid
K2		2441,03	-36,57	6,11	68,67	22,04	0,19
0,4	0,4		0,74	0,74	0,74	22,04	0,19
K1		5412,47	-338,70	15,35	235,30	75,38	0,44
0,6	0,6		1,00	1,00	1,00	75,38	0,44

Tabel 11. Hasil analisis kapasitas *bracing* HB 300x300x10x15

Rasio	Profil	Len	Ly	Cb	Ky	B1y	B2y	Pr (kN)	Mry (kN.m)	Mrz (kN.m)
	Fy (kN/m ²)	Lb	Lz	Cb	Kz	B1z	B2z	Pc (kN)	Mcy (kN.m)	Mcz (kN.m)
	H300, H 300x300x10/15	9,32	9,32	1	1	1,32	1	-1159,20	0	0
0,97	235000	9,32	9,32	1	1	3,80	1	1197,71	256,40	144,67

Rasio gaya aksial terhadap kapasitas aksial pada *bracing* HB 300x300x10x15 didapatkan 0,97 (lebih kecil dari batasan rasio 1,00). Sehingga dimensi *bracing* yang digunakan sudah cukup mampu menahan gaya aksial yang terjadi.

Efektivitas penggunaan *bracing* dalam *retrofit* bangunan ini perlu dievaluasi dengan melakukan pengecekan terhadap persentase gaya yang ditahan oleh *bracing* tersebut. Pengecekan persentase gaya yang terjadi pada struktur yang telah dilakukan *retrofit* dapat dilihat pada Tabel 12.

Tabel 12. Pengecekan persentase gaya yang terjadi

	Gaya-I (kN)	Gaya-J (kN)	Rata-rata (kN)	Persentase
<i>Bracing</i>	-29139,97	-29784,16	-29462,07	31,25%
<i>Frame</i>	-59969,77	-69646,92	-64808,35	68,75%
Total			-94270,42	

Dari hasil pengecekan persentase gaya yang terjadi pada *bracing* sebesar 31,25% menunjukkan bahwa *bracing* sudah bekerja cukup efektif dalam menahan gaya lateral.

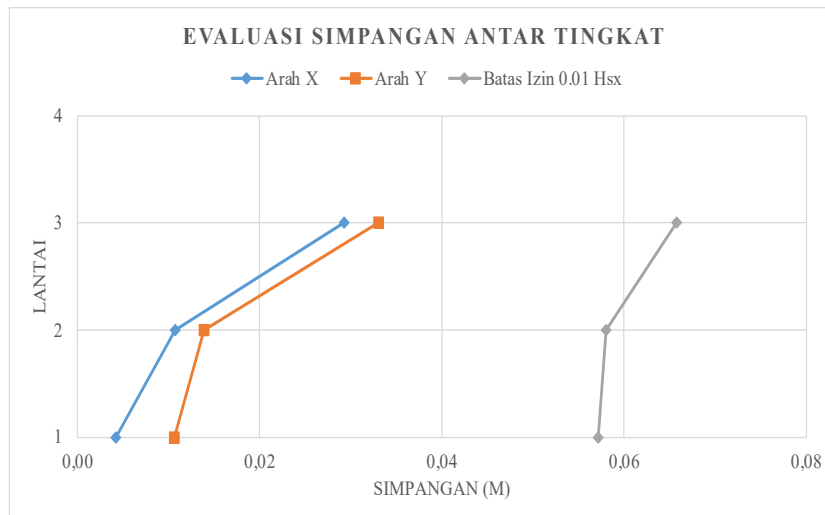
Analisis kinerja struktur setelah dilakukan *retrofit*

Tujuan kinerja dasar untuk bangunan gedung eksisting ini menurut ASCE/SEI 41-17 pada Tabel 1 adalah level kinerja struktural *life safety*. Berdasarkan grafik batasan izin rasio simpangan lateral sesuai ACI 374.2R-13 pada Gambar 1, untuk sistem struktur dinding dan level kinerja struktural *life safety*, batas rasio simpangan lateral yang diizinkan adalah sebesar 1%.

Analisis simpangan lateral antar tingkat yang terjadi pada struktur setelah dilakukan *retrofit* terhadap batas yang diizinkan sebesar 1% dapat dilihat pada Tabel 13. Grafik evaluasi simpangan antar tingkat setelah dilakukan *retrofit* terlihat pada Gambar 9.

Tabel 13. Analisis simpangan antar tingkat setelah dilakukan *retrofit*

Load Case	Lantai	Ketinggian antar lantai (m)	Simpangan maksimum pada seluruh elemen vertikal		
			Simpangan (m)	Modifikasi simpangan (m)	Rasio simpangan antar lantai
StatX	3F	6,58	0,0234	0,0293	0,0045
StatX	2F	5,80	0,0086	0,0107	0,0019
StatX	1F	5,72	0,0033	0,0042	0,0007
StatY	3F	6,58	0,0265	0,0331	0,0050
StatY	2F	5,80	0,0111	0,0139	0,0024
StatY	1F	5,72	0,0085	0,0106	0,0019



Gambar 9. Grafik analisis simpangan antar tingkat setelah dilakukan *retrofit*

Dari hasil analisis simpangan antar tingkat, di mana simpangan yang terjadi masih berada di bawah batasan izinnya, maka dapat dinyatakan bahwa tujuan kinerja dasar level kinerja struktural *life safety* telah tercapai.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil studi, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Berdasarkan hasil evaluasi kapasitas kolom dan balok induk pada bangunan eksisting, dapat disimpulkan bahwa bangunan eksisting tidak mampu menahan gaya seismik pseudo berdasarkan BSE-1E.
2. Berdasarkan hasil evaluasi defleksi lateral antar tingkat pada struktur eksisting, simpangan maksimum yang terjadi adalah 0,1655 m dan telah melewati batasan izin 0,010 h_{sx} .
3. Metode *retrofit* yang digunakan adalah dengan penambahan *bracing* menggunakan material baja dengan profil HB 300x300x10x15 hingga didapatkan keseluruhan elemen struktur penahan beban lateral yaitu kolom dan balok induk memenuhi kapasitas momen dan geser masing-masing elemennya.
4. Berdasarkan hasil pengecekan persentase gaya yang terjadi pada *bracing* sebesar 31,25% menunjukkan bahwa *bracing* sudah bekerja cukup efektif dalam menahan gaya lateral.

5. Berdasarkan hasil analisis simpangan antar tingkat pada struktur setelah dilakukan *retrofit*, di mana simpangan maksimum yang terjadi yaitu 0,0331 m masih berada di bawah batasan izin 1%, maka dapat dinyatakan bahwa tujuan kinerja dasar level kinerja struktural *Life Safety* telah tercapai.

DAFTAR PUSTAKA

- Aghabeigi, P., Mahmoudi, R., Ahani, E., & Ahangarnazhad, B. H. (2020). Seismic assessment and retrofitting of the masonry building of Mozaffarieh Timche in Tabriz historic bazaar. *International Journal of Architectural Heritage*, 15, 1816–1841.
- American Society of Civil Engineers. (2017). *Seismic evaluation and retrofit of existing buildings* (ASCE/SEI 41-17). <https://doi.org/10.1061/9780784414859>
- Applied Technology Council. (2018). *Building the Performance You Need: A Guide to State-of-the-Art Tools for Seismic Design and Assessment* (FEMA P-58-7). Federal Emergency Management Agency.
- ACI Committee 374. (2013). *Guide for testing reinforced concrete structural elements under slowly applied simulated seismic loads* (ACI 374.2R-13). American Concrete Institute.
- Badan Standardisasi Nasional. (2019). *Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan nongedung* (SNI 1726:2019).
- Badan Standardisasi Nasional. (2020). *Beban desain minimum dan kriteria terkait untuk bangunan gedung dan struktur lain* (SNI 1727:2020).
- Binda, L., & Cardani, G. (2019). Seismic vulnerability of historic centers: A methodology to study the vulnerability assessment of masonry building typologies in seismic area. *Architecture and Design: Breakthroughs in Research and Practice*, 1114-1141.
- Caruso, M., Couto, R., Pinho, R., & Monteiro, R. (2023). Decision-making approaches for optimal seismic/energy integrated retrofitting of existing buildings. *Frontiers in Built Environment*, 9, 1176515.
- Furtado, A. F. (2023). Final conclusions and future works. *Seismic Vulnerability Assessment and Retrofitting Strategies for Masonry Infilled Frame Building*, 347–352. https://doi.org/10.1007/978-3-031-20372-5_8
- Kusumastuti, D., Lim, E., & Suarjana, M. (2024). Retrofit of existing confined masonry structures case study: School building in Cimahi, Indonesia. *18th World Conference on Earthquake Engineering (WCEE 2024)*.
- Pusat Studi Gempa Nasional. (2021). Peta percepatan puncak dan spektrum respons untuk probabilitas terlampaui 20% dalam 50 tahun (periode ulang gempa 225 tahun) dan 5% dalam 50 tahun (periode ulang gempa 975 tahun). Dalam Direktorat Bina Teknik Permukiman dan Perumahan, *Surat ketua PuSGeN kepada Direktur Bina Teknik Permukiman dan Perumahan* (lampiran). Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- Rivera, J. P. M. (2024). A comparative analysis of retrofitting techniques for seismically vulnerable historical building. *Preprints.org*. DOI: 10.20944/preprints202405.1772.v1