

ANALISIS RESPON STRUKTUR UNTUK MITIGASI KEGAGALAN AKIBAT POUNDING PADA BANGUNAN (STUDI KASUS: GEDUNG E INSTITUT TEKNOLOGI SUMATERA)

Structural Response Analysis for Pounding Failure Mitigation: A Case Study of Building E, Institut Teknologi Sumatera

**Nugraha Bintang Wirawan¹, M. Hannan Ya Mannan², Ahmad Yudi³,
Kirtinanda P.⁴**

^{1,2,3,4}**Institut Teknologi Sumatera, Indonesia**

Email: bintangwirawan@si.itera.ac.id

Abstract

Structural pounding may occur when adjacent buildings experience earthquake-induced lateral displacement without an adequate separation gap, potentially causing structural damage. This study aims to evaluate the structural condition of Building E at Institut Teknologi Sumatera, identify the potential for structural pounding, and propose appropriate mitigation strategies. The research employed the Schmidt rebound hammer test, collection of existing structural data, structural modelling, and response spectrum analysis in accordance with SNI 1726:2019 by evaluating the structural period, inter-story drift, P-Delta effects, and separation distance. The results show that the P-Delta stability coefficients remain within the allowable limits and that the existing separation gap of 50 mm exceeds the minimum required distance of 30.195 mm, indicating no potential for pounding under the analysed seismic loading conditions. To improve seismic performance, a bracing system is recommended to increase structural stiffness and reduce lateral displacement. Based on these evaluations, Building E at Institut Teknologi Sumatera meets the structural performance requirements under the analysed seismic parameters.

Keywords: pounding, response spectrum, P-Delta, bracing, structural mitigation

Abstrak

Fenomena pounding dapat terjadi ketika bangunan yang berdekatan mengalami simpangan lateral akibat gempa dan tidak memiliki jarak pemisah yang memadai, sehingga berpotensi menimbulkan kerusakan struktur. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kondisi struktur Gedung E Institut Teknologi Sumatera berdasarkan hasil assessment, mengidentifikasi potensi pounding, dan merumuskan strategi mitigasi yang sesuai. Penelitian dilakukan melalui Schmidt rebound hammer test, pengumpulan data struktur eksisting, pemodelan struktur, dan analisis respons spektrum sesuai SNI 1726:2019 dengan mengevaluasi periode struktur, simpangan antar lantai, pengaruh P-Delta, serta kecukupan jarak dilatasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa koefisien stabilitas P-Delta berada di bawah batas yang diizinkan dan jarak dilatasi eksisting sebesar 50 mm lebih besar daripada kebutuhan minimum 30,195 mm, sehingga tidak menunjukkan potensi terjadinya pounding berdasarkan parameter gempa yang dianalisis. Sebagai upaya peningkatan kinerja seismik, direkomendasikan penerapan sistem bracing untuk meningkatkan kekakuan struktur dan mengurangi simpangan lateral. Berdasarkan hasil evaluasi tersebut, Gedung E Institut Teknologi Sumatera memenuhi persyaratan kinerja struktur terhadap beban gempa sesuai parameter yang dianalisis.

Kata Kunci: pounding, respons spektrum, P-Delta, bracing, mitigasi struktur

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara yang berada pada jalur cincin api (*Ring of Fire*) sehingga memiliki tingkat aktivitas seismik yang tinggi. Kondisi tersebut mengharuskan bangunan gedung dirancang dan dievaluasi agar mampu mempertahankan kinerja struktur selama terjadi gempa bumi. SNI 1726:2019 menjadi acuan utama dalam perencanaan ketahanan gempa bangunan di Indonesia, namun evaluasi terhadap bangunan eksisting tetap diperlukan untuk mengidentifikasi potensi kegagalan struktur yang dapat memengaruhi keselamatan dan keandalan bangunan (SNI 1726, 2019).

Salah satu bentuk kegagalan sekunder yang dapat terjadi akibat gempa adalah pounding atau tubrukan antar struktur. Fenomena ini terjadi ketika dua bangunan atau dua bagian struktur yang dipisahkan oleh sambungan dilatasi mengalami simpangan lateral yang berbeda sehingga saling bertumbukan selama gempa. Pounding berpotensi menyebabkan kerusakan lokal pada elemen struktur hingga meningkatkan risiko keruntuhan apabila jarak pemisah tidak mampu mengakomodasi simpangan yang terjadi (Arrasyid dkk., 2023). Oleh karena itu, evaluasi terhadap kecukupan jarak dilatasi menjadi bagian penting dalam asesmen kinerja struktur bangunan tahan gempa.

Gedung E Institut Teknologi Sumatera memiliki sambungan dilatasi yang perlu dievaluasi untuk mengetahui apakah jarak pemisah yang tersedia mampu mengakomodasi simpangan struktur akibat beban gempa. Evaluasi ini penting sebagai dasar pengambilan keputusan dalam upaya mitigasi apabila ditemukan potensi pounding atau kinerja struktur yang belum memenuhi persyaratan. Pendekatan berbasis respons struktur dipilih karena mampu menggambarkan perilaku dinamik bangunan melalui evaluasi periode struktur, simpangan antar lantai, pengaruh P-Delta, serta kecukupan jarak dilatasi berdasarkan analisis respons spektrum.

Penelitian ini menggunakan Schmidt *rebound hammer test*, pengumpulan data struktur eksisting, pemodelan struktur tiga dimensi, dan analisis respons spektrum sesuai SNI 1726:2019 sebagai dasar evaluasi kinerja struktur. Hasil evaluasi diharapkan mampu mengidentifikasi potensi pounding serta menjadi dasar dalam penyusunan strategi mitigasi struktural. Apabila hasil analisis menunjukkan adanya potensi pounding atau kinerja struktur yang belum memenuhi persyaratan, maka penerapan sistem bracing dipertimbangkan sebagai alternatif mitigasi untuk meningkatkan kekakuan struktur dan mengurangi simpangan lateral.

Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kondisi struktur Gedung E Institut Teknologi Sumatera, mengidentifikasi potensi pounding, serta merumuskan strategi mitigasi struktural berdasarkan hasil asesmen respons struktur. Hipotesis penelitian adalah bahwa evaluasi berbasis respons struktur mampu mengidentifikasi potensi pounding secara akurat dan menjadi dasar dalam penentuan strategi mitigasi yang efektif untuk meningkatkan kinerja seismik bangunan.

METODE

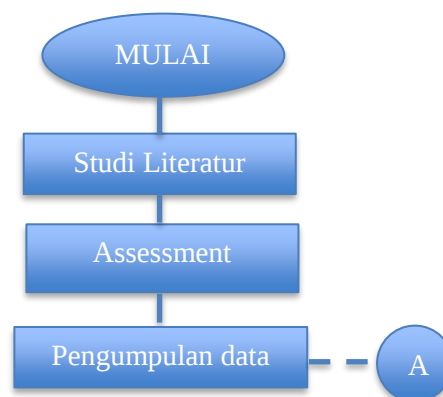
Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif melalui asesmen dan analisis struktural numerik untuk mengevaluasi potensi pounding pada Gedung E Institut Teknologi Sumatera. Objek penelitian adalah Gedung E yang berlokasi di Jalan Terusan Ryacudu, Way Huwi, Kecamatan Jati Agung, Kabupaten Lampung

Selatan. Fokus penelitian meliputi evaluasi kondisi struktur, identifikasi potensi pounding, serta penyusunan rekomendasi mitigasi struktural berdasarkan respons struktur terhadap beban gempa. Variabel yang dianalisis meliputi periode struktur, gaya geser dasar (*base shear*), simpangan antar lantai (*inter-story drift*), koefisien stabilitas P-Delta, dan kecukupan jarak dilatasi sebagai indikator potensi pounding.

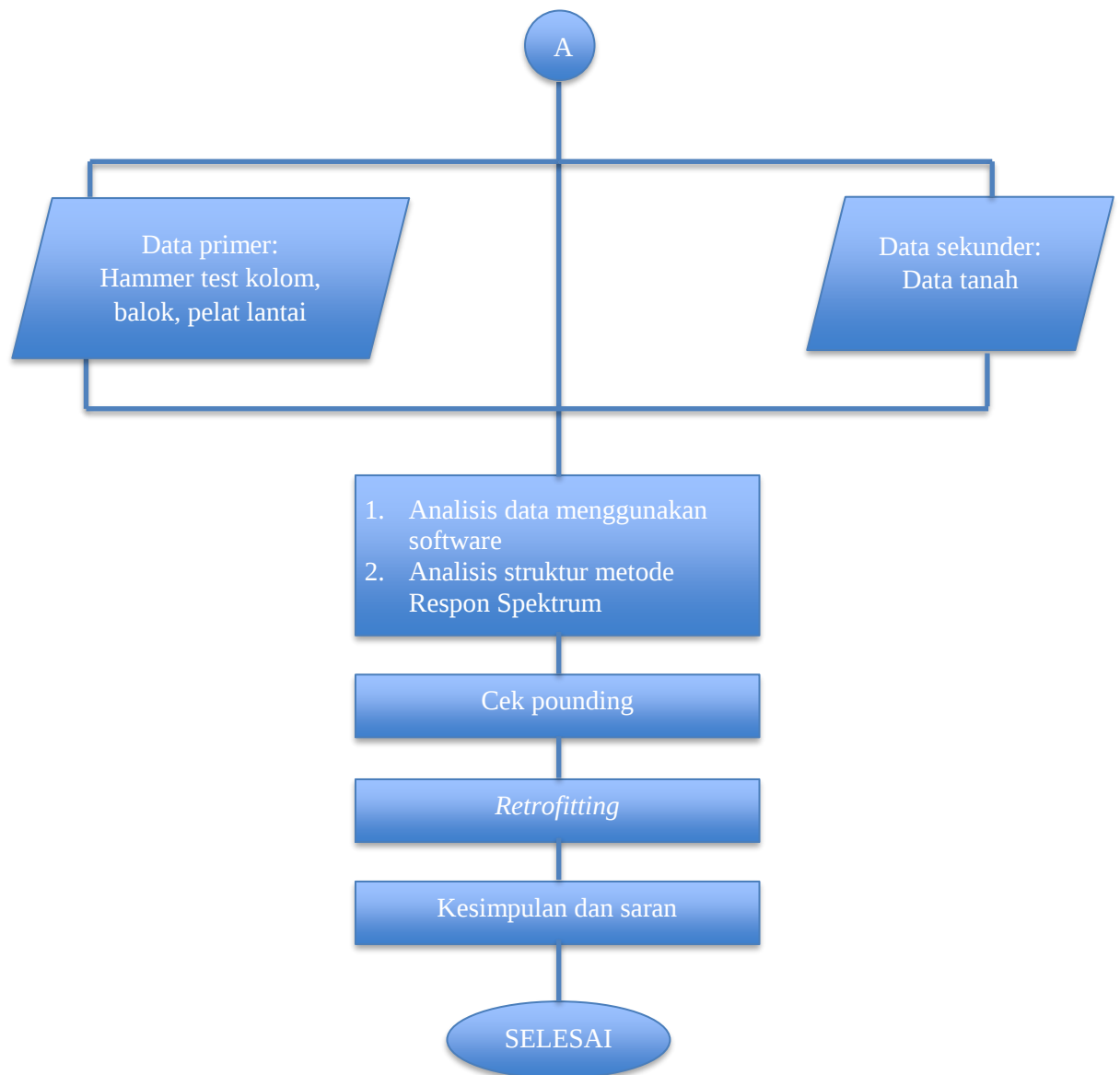
Data penelitian terdiri atas data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh melalui Schmidt rebound hammer test untuk menentukan mutu beton eksisting pada kolom, balok, dan pelat lantai. Data sekunder meliputi gambar as-built drawing, dimensi elemen struktur, mutu material, data tanah, parameter gempa, serta data pembebanan berdasarkan SNI 1726:2019 dan dokumen teknis bangunan. Instrumen utama yang digunakan adalah Schmidt rebound hammer dan perangkat lunak ETABS untuk pemodelan serta analisis struktur tiga dimensi.

Pengumpulan data diawali dengan studi literatur mengenai rekayasa gempa, respons struktur, fenomena pounding, dan strategi mitigasinya, kemudian dilanjutkan dengan asesmen kondisi bangunan, pengumpulan data teknis, pengujian mutu beton, serta pengumpulan data tanah dan pembebanan. Seluruh data digunakan sebagai masukan dalam pemodelan struktur tiga dimensi menggunakan ETABS. Tahapan penelitian secara umum ditunjukkan pada Gambar 1, sedangkan lokasi penelitian ditunjukkan pada Gambar 2.

Analisis data dilakukan menggunakan metode Analisis Dinamik Respons Spektrum sesuai SNI 1726:2019. Evaluasi meliputi periode fundamental struktur, gaya geser dasar, simpangan antar lantai, pengaruh P-Delta, dan kecukupan jarak dilatasi terhadap simpangan maksimum struktur. Hasil analisis digunakan untuk mengidentifikasi potensi pounding dan mengevaluasi kinerja struktur. Apabila hasil evaluasi menunjukkan adanya potensi pounding atau kinerja struktur yang belum memenuhi persyaratan, maka dipertimbangkan penerapan sistem bracing sebagai alternatif mitigasi untuk meningkatkan kekakuan struktur dan mengurangi simpangan lateral.



Gambar 1a. Diagram alir



Gambar 1. Diagram alir penelitian.



Gambar 2. Lokasi Penelitian di Gedung E Institut Teknologi Sumatera

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pemodelan struktur Gedung E Institut Teknologi Sumatera dilakukan menggunakan perangkat lunak ETABS berdasarkan gambar as-built drawing, dimensi elemen struktur, spesifikasi material, serta pembebanan sesuai kondisi eksisting. Parameter model meliputi mutu tulangan sebesar 390 MPa untuk tulangan berdiameter lebih dari 12 mm dan 240 MPa untuk tulangan berdiameter kurang dari atau sama dengan 12 mm. Dimensi elemen struktur terdiri atas kolom berukuran 200×450 mm hingga 600×1200 mm, balok berukuran 250×500 mm dan 350×700 mm, serta pelat lantai dengan ketebalan 100–150 mm.

Pembebanan struktur mencakup beban mati dan beban hidup sesuai dengan SNI 1727:2020, serta dan beban gempa sesuai SNI 1726:2019. Beban mati meliputi berat sendiri struktur, finishing lantai, dinding, partisi, curtain wall, instalasi mekanikal-elektrikal, plafon, dan finishing atap, sedangkan beban hidup disesuaikan dengan fungsi ruangan. Analisis gempa menggunakan parameter lokasi Lampung Selatan dengan kelas situs SD, kategori risiko IV, faktor keutamaan bangunan sebesar 1,5, serta parameter percepatan spektral yang diperoleh dari RSA Cipta Karya. Seluruh parameter tersebut digunakan sebagai data masukan dalam analisis respons spektrum untuk merepresentasikan kondisi aktual bangunan.

Hasil Assessment Struktur

Pengujian Schmidt *rebound hammer* dilakukan untuk memperoleh estimasi kuat tekan beton eksisting sebagai dasar pemodelan struktur. Pengujian dilaksanakan sesuai SNI ASTM C805:2012 menggunakan Schmidt Hammer tipe N pada posisi mendatar dengan seluruh data memenuhi kriteria validitas pengujian. Hasil pengujian menunjukkan bahwa mutu beton rata-rata pada kolom *underground*, kolom lantai 1, kolom lantai 2, kolom lantai 3, balok lantai 1, dan pelat lantai berturut-turut sebesar 22,85 MPa, 19,91 MPa, 18,59 MPa, 17,65 MPa, 15,53 MPa, dan 23,07 MPa.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa mutu beton eksisting masih memenuhi kategori beton struktural, meskipun terdapat variasi kekuatan antar elemen. Variasi tersebut mengindikasikan adanya ketidakhomogenan mutu beton yang kemungkinan dipengaruhi oleh proses konstruksi maupun kondisi selama masa layan bangunan. Oleh karena itu, penggunaan hasil *assessment* sebagai data input analisis dianggap lebih representatif dibandingkan menggunakan mutu beton rencana.

Analisis Respons Spektrum Struktur Eksisting

Analisis respons spektrum dilakukan berdasarkan parameter gempa sesuai SNI 1726:2019. Hasil perhitungan menghasilkan nilai S_{DS} sebesar 0,67 g dan S_{D1} sebesar 0,54 g yang digunakan sebagai dasar pembentukan spektrum respons untuk analisis dinamik struktur. Hasil analisis modal menunjukkan bahwa periode fundamental struktur sebesar sekitar 1,30 detik, sedangkan periode yang digunakan dalam analisis setelah pembatasan sesuai SNI adalah 0,787 detik pada arah X dan 0,824 detik pada arah Y. Partisipasi massa kumulatif pada mode pertama telah melebihi 80% seperti yang terlihat pada Tabel 1 sehingga model memenuhi persyaratan analisis dinamik.

Tabel 1. Modal Participating Mass Ratios Struktur Eksisting

Case	Mode	Periode sec	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ	RK	RY	RZ	SumRK	SumRY	SumRZ
Modal 1	1	1,30	0,0062	0,0002	0	0,0062	0,0002	0	0,000	0,2415	0,000700	2,3649	0,2415	0,0007
Modal 2	2	1,06	0,0002	0,8371	0	0,0004	0,837	0	0,217	0,0002	0,019900	0,2172	0,2414	0,0168
Modal 3	3	1,03	0,0004	0,0159	0	0,0008	0,033	0	0,016	0,0004	0,010900	0,2336	0,262	0,0374
Modal 4	4	0,33	0,1343	0,0127	0	0,9412	0,046	0	0,074	0,5317	0,010700	0,3074	0,7936	0,8481
Modal 5	5	0,31	0,0424	0,0679	0	0,0936	0,14	0	0,053	0,1611	0,017400	0,4602	0,9558	0,8735
Modal 6	6	0,38	0,0012	0,9435	0	0,0048	0,977	0	0,383	0,0044	0,055500	0,943	0,9601	0,9705
Modal 7	7	0,17	0,0016	0,0165	0	0,0065	0,094	0	0,034	0,0039	0,012500	0,9772	0,964	0,9934
Modal 8	8	0,14	0,0121	0,0011	0	0,9985	0,095	0	0,003	0,0296	0,000200	0,9739	0,9936	0,9936
Modal 9	9	0,13	0,0003	0,0028	0	0,9988	0,098	0	0,015	0,0012	0,000400	0,9943	0,9943	0,9961
Modal 10	10	0,11	0,0000	0,0000	0	0,9988	0,098	0	0,000	0,0000	0,000000	0,9943	0,9943	0,9961
Modal 11	11	0,12	0,0000	0,0000	0	0,9988	0,098	0	0,000	0,0000	0,000000	0,9943	0,9943	0,9961
Modal 12	12	0,12	0,0000	0,0000	0	0,9988	0,098	0	0,000	0,0000	0,000000	0,9943	0,9943	0,9961
Modal 13	13	0,12	0,0000	0,0000	0	0,9988	0,098	0	0,000	0,0000	0,000001	0,9943	0,9943	0,9961
Modal 14	14	0,12	0,0000	0,0000	0	0,9988	0,098	0	0,000	0,0000	0,000000	0,9943	0,9943	0,9961
Modal 15	15	0,12	0,0000	0,0000	0	0,9988	0,098	0	0,000	0,0000	0,000000	0,9943	0,9943	0,9961
Modal 16	16	0,12	0,0000	0,0000	0	0,9988	0,098	0	0,000	0,0000	0,000017	0,9943	0,9943	0,9961
Modal 17	17	0,11	0,0004	0,0001	0	0,9992	0,098	0	0,000	0,0012	0,000100	0,9944	0,996	0,9963
Modal 18	18	0,11	0,0000	0,0008	0	0,9993	0,099	0	0,000	0,0001	0,001700	0,996	0,996	0,996
Modal 19	19	0,11	0,0000	0,0000	0	0,9993	0,099	0	0,000	0,0000	0,000003	0,996	0,996	0,996
Modal 20	20	0,11	0,0001	0,0012	0	0,9993	1,000	0	0,003	0,0001	0,001800	0,9968	0,9962	0,9998
Modal 21	21	0,09	0,0007	0,0000	0	1	1,000	0	0,000	0,0008	0,000001	0,9992	0,9999	0,9998
Modal 22	22	0,07	0,0000	0,0001	0	1	1,000	0	0,001	0,0001	0,000200	1	1	1
Modal 23	23	0,04	0,0000	0,0000	0	1	1,000	0	0,000	0,0000	0,000000	1	1	1

Evaluasi gaya geser dasar pada Tabel 2 menunjukkan bahwa nilai *base shear* hasil ETABS sebesar 5193 kN telah memenuhi nilai minimum yang dipersyaratkan SNI, dengan selisih kurang dari 1% terhadap hasil perhitungan manual. Hal ini menunjukkan bahwa model numerik telah mampu merepresentasikan respons gempa sesuai ketentuan sehingga tidak memerlukan penskalaan.

Tabel 2. Gaya Geser Seismik Struktur Eksisting

Simbol	Arah X		Arah Y		Referensi Pasal SNI 1726:2019
	Kuantitas	Satuan	Kuantitas	Satuan	
Cs	0,1257		0,1257		Pasal 7.8.1.1 Pers 31
Csmax	0,1279		0,1221		Pasal 7.8.1.1 Pers 32
Csmin	0,0442		0,0442		Pasal 7.8.1.1 Pers 34
Csmin2	0,0404		0,0404		Pasal 7.8.1.1 Pers 35
Cs digunakan	0,1257		0,1221		
W	41037	kN	41037	kN	Output ETABS
V (SNI)	5157,19	kN	5009,83	kN	Gaya Geser Statik
V (ETABS)	5193	kN	5193	kN	Gaya Geser Statik
Perbedaan	-0.70%		perbedaan V (SNI) & V (software) di bawah atau sama dengan 1%, dapat dikategorikan konsisten		

Pemeriksaan simpangan antar lantai pada Tabel 3 dan 4 menunjukkan bahwa seluruh nilai *inter-story drift* pada arah X maupun Y masih berada di bawah batas yang diizinkan. Simpangan maksimum terjadi pada lantai dua, namun nilainya masih lebih kecil daripada batas simpangan yang dipersyaratkan sehingga struktur memenuhi persyaratan kinerja layan terhadap beban gempa. Evaluasi efek P-Delta arah X dan Y yang terlihat pada Tabel 5 dan Tabel 6 juga menunjukkan nilai koefisien stabilitas (θ) jauh di bawah batas 0,10 sehingga pengaruh orde kedua

tidak signifikan terhadap perilaku struktur.

Tabel 3. Simpangan Antar Tingkat Arah X

Arah X	Ie = 1,50		Cd = 5,50			$\rho =$ 1,30
Lantai	h (mm)	Perpindahan δ (mm)	Story Drift $\delta_e X$ (mm)	Ratio Δx (mm)	Yang Diizinkan Δa (mm)	Cek
Roof Top	3350	32,0180	6,1220	10,2033	25,7692	OK
Lantai 3	4200	25,8960	9,0480	15,0800	32,3077	OK
Lantai 2	4200	16,8480	9,9520	16,5867	32,3077	OK
Lantai 1	4150	6,8960	6,8960	11,4933	31,9231	OK
Lower Ground	0,00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	OK

Tabel 4. Simpangan Antar Tingkat Arah Y

Arah Y	Ie = 1,50		Cd = 5,50			$\rho =$ 1,30
Lantai	h (mm)	Perpindahan δ (mm)	Story Drift $\delta_e Y$ (mm)	Ratio Δy (mm)	Yang Diizinkan Δa (mm)	Cek
Roof Top	3350	26,0550	4,4330	7,3883	25,7692	OK
Lantai 3	4200	21,6220	6,6960	11,1600	32,3077	OK
Lantai 2	4200	14,9260	8,5050	14,1750	32,3077	OK
Lantai 1	4150	6,4210	6,4210	10,7017	31,9231	OK
Lower Ground	0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	OK

Tabel 5. Pemeriksaan P-delta arah X

Arah X	Ie = 1,50		Cd = 5,50						
Lantai	hx	Px	Vx	Δx	b (Beta)	θx	q max	Batas Pengaruh P-Delta	P- Δ
	mm	kN	kN	mm					
Roof Top	3350	21,2346	39,376	10,20	1	0,001	0,200	0,10	OK
Lantai 3	4200	12,7086	90,8172	15,08	1	0,000	0,200	0,10	OK
Lantai 2	4200	7,2735	40,0915	16,59	1	0,000	0,200	0,10	OK

Tabel 6. Pemeriksaan P-delta arah Y

Arah Y	Ie	1,50	Cd =	5,50					
Lantai	hx	Px	Vy	Δx	b (Beta)	θx	q max	Batas Pengaruh P-Delta	P-Δ
	mm	kN	kN	mm					
Roof Top	3350	21,23	353,736	7,39	1	0,000	0,200	0,10	OK
Lantai 3	4200	12,71	1252,7763	11,16	1	0,000	0,200	0,10	OK
Lantai 2	4200	7,27	1893,8798	14,18	1	0,000	0,200	0,10	OK

Evaluasi Mitigasi Menggunakan Bracing

Penerapan sistem *bracing* bertujuan meningkatkan kekakuan struktur sehingga deformasi akibat gempa dapat dikurangi. Hasil analisis yang terlihat pada Tabel 7 menunjukkan bahwa periode fundamental struktur menurun menjadi sekitar 1,06 detik, yang mengindikasikan peningkatan kekakuan setelah dilakukan pemasangan *bracing*. Selain itu, gaya geser dasar hasil ETABS yang terlihat pada Tabel 8 tetap memenuhi persyaratan minimum SNI sehingga model retrofit dapat digunakan tanpa penskalaan.

Tabel 7. Modal Participating Mass Ratios Struktur Menggunakan Bracing

Case	Mode	Periode sec	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ	RX	RY	RZ	SumRX	SumRY	SumRZ
Modal 1	1	1,07	0,0002	0,0293	0	0,000	0,029	0	0,226	0,000	0,004	0,226	-4E-05	0,0015
Modal 2	2	0,96	0,0034	0,0036	0	0,004	0,033	0	0,009	0,0007	0,033	0,235	7E-04	0,0369
Modal 3	3	0,88	0,0290	0,0001	0	0,033	0,033	0	0,000	0,2316	0,003	0,235	-2E-01	0,0403
Modal 4	4	0,53	0,0006	0,3509	0	0,034	0,934	0	0,533	0,0039	0,021	0,753	2E-01	0,0614
Modal 5	5	0,27	0,0044	0,0443	0	0,038	0,970	0	0,192	0,0229	0,304	0,945	3E-01	0,0642
Modal 6	6	0,26	0,1463	0,0001	0	0,985	0,970	0	0,000	0,7069	0,006	0,945	1E+00	0,9716
Modal 7	7	0,16	0,0009	0,0367	0	0,986	0,995	0	0,035	0,0019	0,022	0,980	1E+00	0,9935
Modal 8	8	0,13	0,0105	0,0007	0	0,996	0,996	0	0,002	0,0249	0,000	0,982	1E+00	0,9935
Modal 9	9	0,12	0,0007	0,0023	0	0,997	0,998	0	0,003	0,0028	0,002	0,995	1E+00	0,9988
Modal 10	10	0,12	0,0000	0,0000	0	0,997	0,998	0	0,000	0,0000	0,000	0,995	1E+00	0,9988
Modal 11	11	0,12	0,0000	0,0000	0	0,997	0,998	0	0,000	0,0000	0,000	0,995	1E+00	0,9988
Modal 12	12	0,12	0,0000	0,0000	0	0,997	0,998	0	0,000	0,0000	0,000	0,995	1E+00	0,9988
Modal 13	13	0,12	0,0000	0,0000	0	0,997	0,998	0	0,000	0,0000	0,000	0,995	1E+00	0,9988
Modal 14	14	0,12	0,0000	0,0000	0	0,997	0,998	0	0,000	0,0000	0,000	0,995	1E+00	0,9988
Modal 15	15	0,12	0,0000	0,0000	0	0,997	0,998	0	0,000	0,0000	0,000	0,995	1E+00	0,9988
Modal 16	16	0,12	0,0000	0,0000	0	0,997	0,998	0	0,000	0,0000	0,000	0,995	1E+00	0,9988
Modal 17	17	0,11	0,0020	0,0003	0	0,999	0,998	0	0,001	0,0042	0,000	0,996	1E+00	0,9982
Modal 18	18	0,11	0,0000	0,0000	0	0,999	0,998	0	0,000	0,0000	0,000	0,996	1E+00	0,9982
Modal 19	19	0,11	0,0003	0,0003	0	0,999	0,999	0	0,000	0,0006	0,001	0,996	1E+00	0,9973
Modal 20	20	0,11	0,0003	0,0003	0	0,999	1,000	0	0,003	0,0007	0,003	0,999	1E+00	0,9999
Modal 21	21	0,08	0,0005	0,0000	0	1,000	1,000	0	0,000	0,0045	0,000	0,999	1E+00	0,9999
Modal 22	22	0,07	0,0000	0,0001	0	1,000	1,000	0	0,001	0,0002	0,000	1,000	1E+00	1,0000
Modal 23	23	0,04	0,0000	0,0000	0	1,000	1,000	0	0,000	0,0000	0,000	1,000	1E+00	1,0000

Tabel 8. Gaya Geser Seismik Struktur Dengan Bracing

Simbol	Arah X		Arah Y		Referensi
	Kuantitas	Satuan	Kuantitas	Satuan	
Cs	0,1257		0,1257		Pasal 7.8.1.1 Pers 31
Csmax	0,1279		0,1221		Pasal 7.8.1.1 Pers 32
Csmin	0,0442		0,0442		Pasal 7.8.1.1 Pers 34
Csmin2	0,0404		0,0404		Pasal 7.8.1.1 Pers 35
Cs digunakan	0,1257		0,1221		

W	41228	kN	41037	kN	Output ETABS
V (SNI)	5181,23	kN	5008,83	kN	Gaya Geser Statik
V (ETABS)	5217,199	kN	5217,199	kN	Gaya Geser Statik
Perbedaan	-0.69%	perbedaan V (SNI) & V (software) di bawah atau sama dengan 1%, dapat dikategorikan konsisten			

Efektivitas *bracing* terlihat dari penurunan simpangan antar lantai arah X dan Y yang terlihat pada Tabel 9 dan 10 jika dibandingkan terhadap struktur eksisting pada Tabel 5 dan 6. Penurunan simpangan antar lantai terbesar terjadi pada arah X lantai *roof top* yang berkurang dari 32,018 mm menjadi 23,39 mm. Seluruh nilai simpangan setelah *retrofit* masih berada jauh di bawah batas yang diizinkan, sedangkan pemeriksaan P-Delta menunjukkan nilai koefisien stabilitas tetap berada di bawah batas maksimum sehingga kestabilan struktur semakin baik. Pemeriksaan P-Delta setelah retrofit dapat dilihat pada Tabel 11 dan Tabel 12.

Tabel 9. Simpangan Antar Tingkat Arah X Struktur Dengan Bracing

Arah X	Ie = 1,50	Cd = 5,50	$\rho =$ 1,30			
Lantai	h (mm)	Perpindahan δ (mm)	Story Drift $\delta_e X$ (mm)	Ratio Δx (mm)	Yang Diizinkan Δa (mm)	Cek
Roof Top	3350	23,3900	3,9940	6,6567	25,7692	OK
Lantai 3	4200	19,3960	6,2660	10,4433	32,3077	OK
Lantai 2	4200	13,1300	7,2890	12,1483	32,3077	OK
Lantai 1	4150	5,8410	5,8410	9,735	31,9231	OK
Lower Ground	0,00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	OK

Tabel 10. Simpangan Antar Tingkat Arah Y Struktur Dengan Bracing

Arah Y	Ie = 1,50	Cd = 5,50	$\rho =$ 1,30			
Lantai	h mm	Perpindahan δ (mm)	Story Drift $\delta_e Y$ (mm)	Ratio Δy (mm)	Yang Diizinkan Δa (mm)	Cek
Roof Top	3350	25,8080	4,1460	6,9100	25,7692	OK
Lantai 3	4200	21,6620	6,7270	11,2117	32,3077	OK
Lantai 2	4200	14,9350	8,5000	14,1667	32,3077	OK
Lantai 1	4150	6,4350	6,4350	10,7250	31,9231	OK
Lower Ground	0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	OK

Tabel 11. Pemeriksaan P-delta arah X Struktur Dengan Bracing

Arah X	Ie =	1,50	Cd =	5,50					
Lantai	hx	Px	Vx	Δx	b (Beta)	θx	q max	Batas Pengaruh P-Delta	P- Δ
	mm	kN	kN	mm					
Roof Top	3350	21,2346	39,376	10,20	1	0,001	0,200	0,10	OK
Lantai 3	4200	12,7086	90,8172	15,08	1	0,000	0,200	0,10	OK
Lantai 2	4200	7,2735	40,0915	16,59	1	0,000	0,200	0,10	OK

Tabel 12. Pemeriksaan P-delta arah Y Struktur Dengan Bracing

Arah Y	Ie	1,50	Cd =	5,50					
Lantai	hx	Px	Vy	Δx	b (Beta)	θx	q max	Batas Pengaruh P-Delta	P- Δ
	mm	kN	kN	mm					
Roof Top	3350	21,23	353,736	7,39	1	0,000	0,200	0,10	OK
Lantai 3	4200	12,71	1252,7763	11,16	1	0,000	0,200	0,10	OK
Lantai 2	4200	7,27	1893,8798	14,18	1	0,000	0,200	0,10	OK

Evaluasi Potensi Pounding

Potensi *pounding* dievaluasi berdasarkan perbandingan antara simpangan maksimum struktur dan jarak dilatasi yang tersedia. Hasil analisis menunjukkan bahwa kebutuhan jarak dilatasi minimum adalah 30,195 mm, sedangkan Gedung E memiliki jarak dilatasi aktual sebesar 50 mm sebagaimana terlihat pada Tabel 13. Dengan demikian, jarak pemisah yang tersedia telah mampu mengakomodasi pergerakan struktur akibat gempa sehingga tidak ditemukan potensi terjadinya *pounding* pada kondisi gempa yang dianalisis.

Tabel 13. Jarak Minimal Gedung

Section	Displacement (cm)	Jarak Minimal Dilatasi (cm)	Jarak Dilatasi Gedung (cm)	Cek
A	23,39	30,195	50	Aman
B	19,096			

Oleh karena itu, *bracing* dapat dipertimbangkan sebagai strategi peningkatan kinerja seismik, terutama apabila terjadi perubahan fungsi bangunan, peningkatan beban, atau pembaruan ketentuan desain gempa di masa mendatang. Pendekatan asesmen berbasis respons struktur pada penelitian ini terbukti mampu mengevaluasi kondisi eksisting sekaligus memberikan dasar yang objektif dalam penyusunan rekomendasi mitigasi struktural.

KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil *assessment* dan analisis respons spektrum terhadap Gedung E Institut Teknologi Sumatera, dapat disimpulkan bahwa struktur eksisting memiliki kinerja seismik yang baik. Evaluasi menunjukkan bahwa nilai koefisien stabilitas (θ) pada seluruh lantai berada jauh di bawah batas maksimum 0,10 sesuai SNI 1726:2019, sehingga pengaruh efek P-Delta tidak signifikan terhadap perilaku struktur. Selain itu, nilai simpangan antar lantai (inter-story drift) masih berada dalam batas yang diizinkan, yang menunjukkan bahwa struktur memiliki kekakuan lateral yang memadai dalam menahan beban gempa.

Hasil evaluasi potensi *pounding* menunjukkan bahwa Gedung E tidak berisiko mengalami tumbukan dengan bangunan di sekitarnya. Hal ini dibuktikan dengan ketersediaan jarak dilatasi sebesar 50 mm, yang lebih besar dibandingkan kebutuhan jarak minimum sebesar 30,195 mm berdasarkan hasil analisis perpindahan struktur. Dengan demikian, ruang pemisah yang tersedia masih mampu mengakomodasi pergerakan bangunan selama terjadi gempa.

Analisis terhadap penerapan sistem bracing menunjukkan bahwa strategi tersebut mampu meningkatkan kekakuan struktur melalui penurunan periode getar dan simpangan lateral. Meskipun struktur eksisting telah memenuhi persyaratan kinerja dan tidak menunjukkan potensi *pounding*, penggunaan *bracing* dapat dipertimbangkan sebagai alternatif mitigasi untuk meningkatkan keandalan struktur terhadap beban gempa di masa mendatang. Penelitian selanjutnya disarankan mengkaji efektivitas perangkat mitigasi lain, seperti *seismic damper*, untuk membandingkan kinerjanya dalam mengurangi respons struktur dan potensi *pounding*.

DAFTAR PUSTAKA

- Arrasyid, M. I., Istiqomah, I., Batubara, B. N., & Kudwadi, B. (2023). Evaluasi Valuasi Kinerja Struktur Bangunan Gedung Tahan Gempa Dengan Metode Analisa Respons Spektrum dan Time History. *Kokoh*, 21(2), 67–80. <https://doi.org/10.17509/k.v21i2.60213>
- Badan Standardisasi Nasional. (2020). Beban Minimum untuk Perancangan Bangunan Gedung dan Struktur Lain. *SNI 1727:2020*, www.bsn.go.id
- Badan Standardisasi Nasional. (2019). Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung. *SNI 1726:2019*, www.bsn.go.id
- Badan Standardisasi Nasional. (2012). Metode uji angka pantul beton keras. *SNI ASTM C805:2012*, www.bsn.go.id
- Budiarty I, Budiman E, Haryanto B. Menggunakan sistem rangka pemikul momen khusus (Studi Kasus: Hotel Fox Harris Lite di Jln. S. Parman, Kota Samarinda, Kalimantan Timur). *Jurnal Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Sipil*. 2022;6:45–59.
- Guler MG, Guler K. The effect of story drifts in determining the earthquake performance of high-rise buildings. *Buildings*. 2024;14(12):3830. <https://doi.org/10.3390/buildings14123830>
- Khatami SM, Naderpour H, Barros RC, Jakubczyk-Gańczyńska A, Jankowski R. Determination of peak impact force for buildings exposed to structural

- pounding during earthquakes. *Geosciences*. 2020;10(1):1–16.
<https://doi.org/10.3390/geosciences10010018>
- Manoukas G, Karayannis C. Slab-to-column seismic pounding between multistorey buildings: Influence of the impact point location and the pre-existing gap size. *Buildings*. 2025;15(4). <https://doi.org/10.3390/buildings15040581>
- Namboothiri VP. Seismic Pounding of Adjacent Buildings. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2017;4(3):1443–1448.
- Raheem SEA, Alazrak TTMA, AbdelShafy AAGA, Ahmed MM, Gamal YYAS. Seismic pounding between adjacent buildings considering soil-structure interaction. *Earthquake and Structures*. 2021;20(1):55–70.
<https://doi.org/10.12989/eas.2021.20.1.55>
- Rahmantyo, A., & Andayani, R. (2019). Analisis Story Drift dan Kondisi Sendi Plastis Berbasis Performa pada Gedung Bertingkat dengan Konfigurasi Struktur Persegi Panjang, U, L, H, dan T. *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 25(1), 38. <https://doi.org/10.14710/mkts.v25i1.17945>
- Shany SA, Santosa AA, Erfan M. Analisa perbandingan simpangan pada sistem rangka pemikul momen dan sistem ganda. *Prosiding Seminar Nasional Perwujudan Pembangunan Berkelanjutan Berbasis Kearifan Lokal*. 2020;4:27–38.
- To D, Moehle J. Seismic performance of beams with high-strength reinforcement. In: *Proceedings of the 16th World Conference on Earthquake Engineering (16WCEE)*; 2017. p. 1–13.