

Analisis Kekuatan Struktur pada Bangunan 8 Lantai berdasarkan Respon Spektrum SNI 03-1726-2019 menggunakan SAP2000

Raihan Daffa Hukama^{1*}, Erizal¹

¹ Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor. Jl. Raya 5 Dramaga, Kampus IPB Dramaga, PO BOX 220, Bogor, Jawa Barat, Indonesia 16680

* penulis koresponden: raihandaffahukama@apps.ipb.ac.id, erizal@apps.ipb.ac.id

Abstrak: Suatu struktur bangunan gedung terdiri atas beberapa elemen struktur penyusunnya seperti kolom, balok, pelat lantai, *shearwall*, pondasi, dan rangka atap. Indonesia merupakan daerah rawan terhadap gempa karena dilalui oleh jalur pertemuan 3 lempeng tektonik. Provinsi Jawa Barat mengalami sebanyak 141 gempa bumi pada bulan Januari 2023 menurut Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG). Kabupaten Bogor mengalami gempa bumi sebanyak 16 kali dalam rentang tahun 2012-2022. Upaya mitigasi kegagalan struktur di Indonesia akibat gempa sangat perlu dilakukan untuk mengetahui kondisi kinerja struktur bangunan tersebut terhadap gempa. Tujuan penelitian ini adalah untuk melakukan pemodelan menggunakan *software* SAP2000 serta menganalisis kekuatan struktur pada bangunan 8 lantai terhadap gempa dengan mengacu pada SNI 1726-2019 tentang tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung. Penelitian dilakukan dengan menggunakan tiga skenario dengan metode respon spektrum. Pengujian kuat tekan beton digunakan menggunakan *hammer* test. Penyesuaian *as built drawing* perlu dilakukan karena terdapat perbedaan antara gambar rencana dengan kondisi *existing*. Pada hasil identifikasi kegagalan struktur Gedung X terdapat kegagalan pada saat beban gempa diinputkan. Terdapat 2 *frames* yang mengalami *overstress* pada skenario tiga. Berdasarkan hasil analisis simpangan antar lantai dan efek P- Δ , Gedung X dinilai aman karena nilai yang didapat tidak melebihi simpangan izin dan batas stabilitas struktur. Rekomendasi ini bertujuan untuk perencanaan pembangunan berikutnya. Rekomendasi struktur berupa penambahan dimensi kolom yang awalnya 400 mm x 400 mm menjadi 500 mm x 500 mm, serta pembesaran diameter tulangan yang awalnya 22 mm menjadi 32 mm.

Kata kunci: Gempa, Respon spektrum, SAP2000, Struktur Beton

1. Pendahuluan

Sebuah gedung terdiri dari beberapa elemen struktural seperti kolom, balok, pelat, dinding geser (*shear wall*), dan pondasi. Elemen struktur memiliki fungsi sebagai penerima beban yang bekerja pada struktur lalu meneruskan beban tersebut ke tanah. Secara umum ada dua jenis beban yang bekerja pada struktur, yaitu beban tetap dan beban lingkungan. Beban tetap terdiri dari beban mati dan beban hidup, sedangkan beban lingkungan terdiri dari beban angin, beban hujan, dan beban gempa. Agar struktur dapat memiliki kinerja yang baik saat menahan beban tersebut, beban yang bekerja harus diperhitungkan dengan tepat sesuai dengan kaidah perencanaan. Hal tersebut dilakukan untuk menjamin keselamatan dalam aspek kekuatan, stabilitas, kemampuan layan,

Diterima: 04 Agustus 2023
Disetujui: 22 Desember 2023

Sitasi:
Hukama RD, Erizal. Analisis Kekuatan Struktur Pada Bangunan 8 Lantai Berdasarkan Respon Spektrum SNI 03-1726-2019 Menggunakan SAP2000. 2023. *Jurnal teknik sipil dan lingkungan*; 08 (03): 127-136.,
<https://doi.org/10.29244/8.3.127-136>

durabilitas, dan integritas struktur [1]. Selain itu, struktur juga harus dirancang secara efisien agar lebih ekonomis [2].

Indonesia adalah daerah yang rawan gempa bumi karena dilalui oleh jalur pertemuan 3 lempeng tektonik yaitu Lempeng Indonesia-Australia, lempeng Eurasia, dan Lempeng Pasifik, serta satu lempeng tektonik mikro, yaitu Lempeng Philipina dan berada pada Cincin Api Pasifik (*Ring of fire*) [3]. Lempeng Indonesia-Australia bergerak relatif terhadap Lempeng Eurasia dengan kecepatan 65 mm/tahun [4]. Dalam rangka mengurangi risiko kegagalan struktur di Indonesia akibat gempa bumi, langkah-langkah mitigasi sangat penting untuk dilaksanakan. Tujuannya adalah untuk memahami dan memastikan kinerja struktur bangunan dalam kondisi tertentu. Khususnya, saat merancang bangunan tinggi, gempa bumi harus menjadi pertimbangan utama karena potensi kerusakan yang dapat ditimbulkannya pada struktur bangunan [5]. Kegagalan struktur bangunan bisa disebabkan oleh beberapa faktor. Pertama, salah perhitungan dalam tahap perencanaan bisa menjadi penyebabnya. Selain itu, ketidaksesuaian antara perencanaan dengan implementasi pelaksanaan di lapangan juga dapat menyebabkan kegagalan. Selain itu, bencana alam seperti gempa bumi kuat juga merupakan faktor risiko yang perlu dipertimbangkan. Selain hal-hal tersebut, perubahan fungsi bangunan juga dapat menyebabkan kegagalan struktur jika bangunan tidak mampu menahan beban yang diberikan [6].

Di Indonesia, upaya untuk merancang bangunan yang tahan terhadap gempa terus diperbarui secara berkala untuk meningkatkan akurasi. Awalnya dimulai dengan PPTI-UG-1983, kemudian SNI 1726-2002, dilanjutkan dengan SNI 1726-2012 [7], dan saat ini berlaku SNI 1726-2019. Pembaruan terakhir pada SNI 1726-2019 mengacu pada standar ASCE 7-16 dan didasarkan pada Peta Gempa Nasional 2017. Terdapat beberapa perbedaan antara SNI 1726-2012 dan SNI 1726-2019. Salah satunya terletak pada kombinasi beban untuk metode ultimit pada pasal 4.2.2 yang mengalami perubahan tanda dan penataan poin pada kombinasi beban *earthquake vertical* dan *earthquake horizontal*. Perbedaan lainnya terletak pada respon spektrum desain. Pada SNI 1726-2012, respon spektrum hanya dibagi menjadi 3 bagian yaitu $0 \rightarrow T_0 \rightarrow T_s$ (*short period*), sementara pada SNI 1726-2019 respon spektrum dibagi menjadi 4 bagian yaitu $0 \rightarrow T_0 \rightarrow T_s$ (*short period*) $\rightarrow T_L$ (*long period*). Oleh karena itu, SNI 1726-2019 mencakup peta tambahan yaitu peta periode panjang (T_L) untuk wilayah Indonesia. Hasil perubahan nilai spektrum respon desain periode pendek pada SNI 1726-2019 menunjukkan bahwa di beberapa kota di Indonesia, terjadi kenaikan dengan rasio antara 1,01 hingga 6,65. Namun, ada juga kota-kota yang mengalami penurunan dengan rasio 0,52 hingga 0,94 jika dibandingkan dengan nilai spektrum pada SNI 1726-2012 [8].

Kemajuan teknologi komputasi telah mempermudah perencana struktur dalam menghitung beban yang bekerja pada struktur, termasuk beban gempa. Salah satu produk teknologi yang banyak digunakan dalam perencanaan bangunan adalah perangkat lunak *Structural Analysis Program (SAP2000)*. Dalam penelitian ini, *SAP2000* digunakan untuk mengevaluasi kinerja bangunan 8 lantai. Analisis akhir ini akan menunjukkan apakah bangunan dapat menahan beban yang bekerja atau tidak. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja bangunan rumah sakit dengan 8 lantai di Bogor dengan menggunakan metode analisis respon spektrum berdasarkan SNI 1726-2019 tentang tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung.

2. Metode

2.1. Material

Penelitian dilaksanakan pada bulan Februari 2023 hingga Mei 2023. Lokasi penelitian di Gedung X Jl. KH. R. Abdullah Bin Nuh, Semplak, Kecamatan Bogor Barat, Kota Bogor, Jawa Barat 16113. Pengolahan data dilakukan di Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor. Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah *hammer test*, meteran digital, pita ukur, dan laptop yang dilengkapi dengan *software AutoCAD 2020*, *SAP2000* versi 24.1.0, dan *Microsoft Office*. Bahan yang digunakan berupa data primer dari hasil *ground check* dan pengukuran mutu beton menggunakan *hammer test*. Adapun data sekunder yang digunakan pada penelitian ini berupa data *as built drawing* untuk tulangan baja dan data penyelidikan tanah.

2.2. Studi literatur dan pengumpulan data

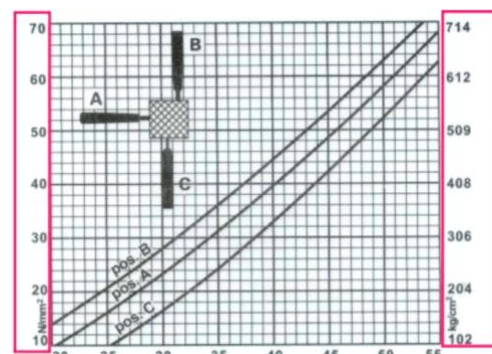
Studi literatur dilakukan untuk mempelajari tahapan-tahapan pemodelan bangunan menggunakan *software* SAP2000 dan mencari referensi terkait analisis gempa untuk bangunan. Penelitian diawali dengan pengumpulan data berupa data primer dan data sekunder. Data primer didapatkan dari hasil *ground check* dan pengujian kuat tekan beton menggunakan *hammer test*. Data sekunder berupa *as built drawing* bangunan dan data penyelidikan tanah. Ada beberapa SNI yang digunakan pada penelitian ini yaitu SNI 1726-2019 tentang tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung, SNI 1727-2019 tentang beban desain minimum dan kriteria terkait untuk bangunan gedung dan bangunan lain, SNI 2847-2019 tentang persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung dan SNI 03-4430-1997 tentang metode pengujian elemen struktur beton dengan alat palu beton tipe N dan NR.

2.3. Hammer test

Besarnya kekuatan tekan beton diukur dengan menggunakan *hammer test*. Pengujian menggunakan *hammer test* merupakan salah satu metode *non destructive test* yang bertujuan untuk memperkirakan nilai kuat tekan beton pada struktur yang telah terpasang. Pengukuran ini dilakukan dengan cara memberikan beban tumbukan pada permukaan beton menggunakan suatu massa dengan besaran energi tertentu. Metode ini memberikan data yang cukup banyak dalam waktu singkat dan biaya yang terjangkau [10]. Pengujian dengan *hammer test* sangat bermanfaat untuk mengevaluasi keseragaman material beton pada struktur. Namun, perlu diingat bahwa metode ini mengasumsikan beton bersifat homogen, sehingga tidak dapat menunjukkan perubahan mutu beton di bagian dalam struktur. Untuk mengatasi ini, lebih banyak titik pengamatan harus dilakukan agar hasil pengujian menjadi lebih akurat [11]. Hasil pengujian didapatkan berdasarkan jarak pantulan massa yang terukur, yang mengindikasikan tingkat kekerasan permukaan beton, dan dari situ dapat diperkirakan kekuatan tekan beton yang diuji. Pengujian ini dilakukan berdasarkan acuan SNI 03-4430-1997 tentang metode pengujian elemen struktur beton dengan alat palu beton tipe N dan NR. Pengujian *hammer test* dilakukan sebanyak 10 kali pada setiap elemen struktur yang diuji. Pengujian dilakukan tegak lurus terhadap elemen struktur yang diuji. Pengujian dapat dilakukan dari tiga arah yang akan mempengaruhi pendefinisian kuat tekan beton dari hasil pengujian. Terdapat tiga kurva yang menunjukkan arah dari posisi pengujian *hammer test* yaitu posisi A, posisi B, dan posisi C. Posisi A menunjukkan pengujian *hammer test* dilakukan dari arah samping, posisi B menunjukan pengujian dilakukan dari arah atas ke bawah, posisi C menunjukan pengujian dilakukan dari arah bawah ke atas. Hasil dari pengujian *hammer test* berupa angka yang perlu diplotkan kedalam grafik sesuai dengan posisi pengujian yang dilakukan. Pengujian *hammer test* dapat dilihat pada **Gambar 1**. Hasil yang ditunjukkan oleh *hammer test* perlu diplotkan kedalam grafik, grafik tersebut dapat dilihat pada **Gambar 2**.



Gambar 1 Pengujian *hammer test* (SNI 03-4430-1997)



Gambar 2 Kurva hubungan nilai pantul dengan kuat tekan beton

2.4. Pemodelan struktur

Pada tahap ini dilakukan pemodelan untuk struktur bangunan berdasarkan hasil *ground check*. Pemodelan struktur tersebut berupa elemen struktur seperti kolom, balok, pelat, *shear wall*, ram dan tangga. Pemodelan struktur dibentuk dengan perspektif arah tiga dimensi, yaitu sumbu X, Y, dan Z. Struktur pada bagian bawah gedung dimodelkan dengan tumpuan jepit. Pemodelan struktur diawali dengan *input material properties* untuk beton dan baja yang digunakan. Setelah itu, melakukan pendefinisian terhadap *frame section* untuk kolom dan balok sesuai dengan data *ground check* yang telah dilakukan. Pendefinisian pelat lantai dan *shearwall* dilakukan pada *area section*. Setelah dilakukan pendefinisian *frame section* dan *area section*, pembuatan model pada struktur bisa dilakukan dengan tools "draw" dengan mengacu pada denah yang telah didapat dari hasil penyesuaian *as built drawing*.

2.5. Analisis pembebanan

Analisis pembebanan pada penelitian ini mengacu kepada SNI 1726:2019 tentang tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung dan SNI 1727:2020 tentang beban desain minimum dan kriteria terkait untuk bangunan gedung dan struktur lain. Perencanaan pembebanan yang direncanakan pada bangunan ini berupa beban mati (DL), beban hidup (LL), beban angin (W), beban hujan (R), dan beban gempa (E). Beban mati yang direncanakan meliputi berat dari bangunan sendiri dan beban mati tambahan.

2.6 Analisis struktur

Analisis struktur yang dilakukan bertujuan untuk melihat apakah struktur mampu menahan beban yang bekerja pada struktur atau tidak setelah dilakukan kombinasi pembebanan yang telah direncanakan. Penelitian ini menggunakan metode respon spektrum yang dilakukan dengan mengacu kepada SNI terbaru tentang tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan nongedung yaitu SNI 1726:2019, sehingga hasil dari analisis ini dapat mengetahui apakah bangunan telah sesuai dengan syarat-syarat perencanaan. Struktur, komponen elemen struktur, dan elemen-elemen pondasi struktur pada kombinasi beban untuk metode ultimit harus dirancang sedemikian rupa agar kuat rencananya sama atau melebihi beban-beban yang bekerja dengan kombinasi-kombinasi beban sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \text{ULS1} &= 1,4 D & (1) \\ \text{ULS2} &= 1,2 D + 1,6 L + 0,5 (L_r \text{ atau } R) & (2) \\ \text{ULS3} &= 1,2 D + 1,6 (L_r \text{ atau } R) + (L \text{ atau } 0,5 W) & (3) \\ \text{ULS4} &= 1,2 D + 1,0 W + L + 0,5 (L_r \text{ atau } R) & (4) \\ \text{ULS5} &= 0,9 D + 1,0 W & (5) \\ \text{ULS6} &= 1,2 D + E_v + E_h + L & (6) \\ \text{ULS7} &= 0,9 D - E_v + E_h & (7) \end{aligned}$$

Keterangan:

- D = beban mati (*dead load*)
- L = beban hidup (*live load*)
- L_r = beban hidup atap (*roof live load*)
- R = beban hujan (*rain load*)
- W = beban angin (*wind load*)
- E_v = pengaruh beban gempa vertikal
- E_h = pengaruh beban gempa horizontal

Tabel 1 Skenario pemodelan pada SAP2000

Skenario	Kuat Tekan Beto (MPa)	Mutu Baja Tulangan
1	fc' rata-rata minimum	fy as built*
2	fc' rata-rata	fy as built*
3	fc' as built*	fy as built*

*file yang didapat dari pihak Gedung X

Analisis struktur dilakukan dengan 3 skenario seperti yang ditunjukkan oleh **Tabel 1**. Skenario 1 merupakan skenario yang menggunakan nilai kuat tekan beton rata-rata minimum dari hasil pengujian *hammer test* yang telah dilakukan. Skenario 1 merupakan skenario yang menunjukkan kekuatan kritis dari beton *existing*, sehingga skenario 1 dapat dibilang skenario kritis dalam menganalisis struktur kali ini. Hasil dari pengujian *hammer test* yang menunjukkan hasil yang beragam sehingga skenario 2 juga perlu dilakukan. Skenario 2 merupakan skenario yang menggunakan nilai kuat tekan beton rata-rata dari hasil pengujian *hammer test* pada setiap elemen struktur. Selain itu, pada analisis struktur juga digunakan skenario 3 dengan menggunakan nilai kuat tekan beton sesuai dengan dokumen perencanaan yang didapat dari pihak Gedung X. Ketiga skenario ini dilakukan agar dapat mengetahui perbedaan dari penerapan kekuatan beton masing-masing skenario, sehingga diharapkan hasil yang diperoleh dapat dilihat dari berbagai sudut pandang.

2.7 Rekomendasi

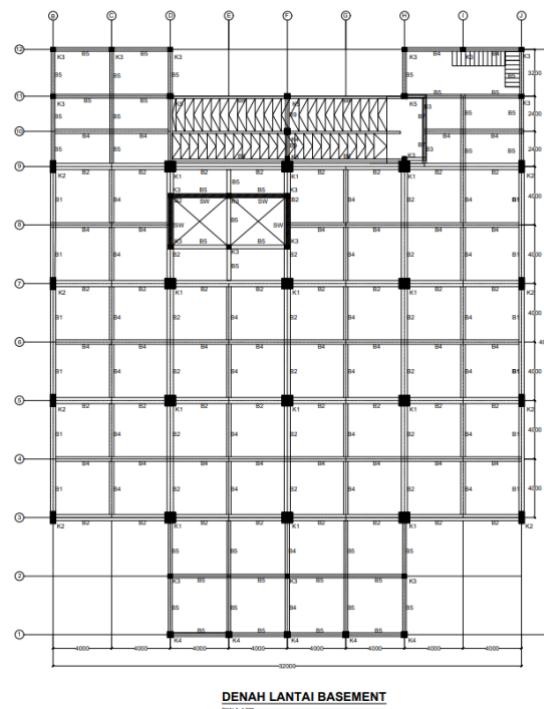
Dengan analisis struktur yang dilakukan dapat diketahui pula bagian-bagian elemen struktur yang mengalami *overstressed* ketika dilakukan pembebanan. Apabila ada elemen struktur yang mengalami *overstressed* maka dapat dilakukan beberapa rekomendasi untuk perkuatan struktur seperti pengurangan beban hidup, menaikkan kekuatan dan kekakuan dengan penambahan *shearwall* atau *branching*, meningkatkan daktilitas struktur dengan *steel jacketing* dan FRP *jacketing*, melakukan penambahan dimensi elemen struktur, melakukan penambahan atau pembesaran tulangan pada beton, dan menambah mutu beton.

3. Hasil dan Pembahasan

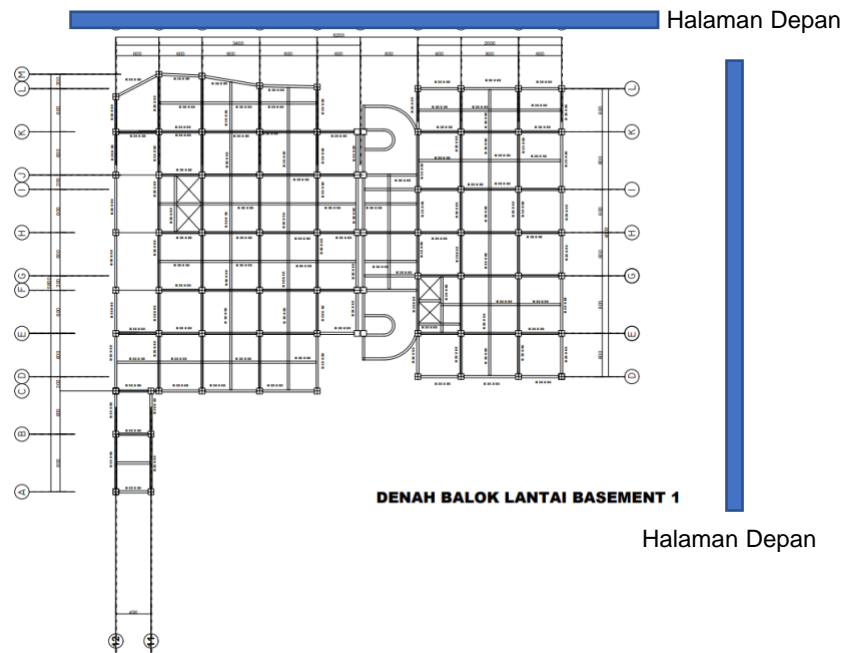
3.1. Penyesuaian As Built Drawing

Kegiatan ini berupa *ground check* untuk memastikan analisis struktur yang dilakukan sesuai dengan kondisi bangunan *existing*. Dari gambar perencanaan yang diperoleh, ternyata terdapat beberapa perbedaan yang mendasar antara gambar rencana dengan struktur bangunan *existing* seperti tata letak, bentang antar kolom, dan dimensi dari elemen strukturnya. Hal ini merupakan suatu hal yang sangat kritis dalam menganalisis kekuatan struktur, sehingga pada awal perlu dilakukannya penyesuaian *as built drawing*. Salah satu hasil penyesuaian *as built drawing* yaitu pada lantai *basement* dapat dilihat pada **Gambar 3**. Gambar perencanaan yang didapat mengenai denah lantai *basement* dapat dilihat pada **Gambar 4**.

Berdasarkan Gambar 3 dan Gambar 4 terdapat perbedaan berupa tata letak elemen struktur, jumlah elemen struktur, bentang antar kolom, dan dimensi strukturnya. Gambar 4 menunjukan terdapat 78 kolom pada lantai *basement* sedangkan pada Gambar 3 hanya terdapat 45 kolom. Perbedaan bentang antar kolom juga dapat dilihat pada *grid 2,L* sampai *3,L* pada Gambar 4 berjarak 6 m sedangkan dalam kondisi *existing* pada *grid 3,J* sampai *5,J* pada Gambar 4.1 berjarak 8 m. Dimensi pada kolom utama dengan kode K1 pada Gedung X terdapat perbedaan antara gambar perencanaan dengan kondisi *existing*. Pada gambar perencanaan dimensi pada kolom K1 memiliki dimensi 750 mm × 550 mm, sedangkan pada kondisi *existing* kolom K1 memiliki dimensi 720 mm × 720 mm. Oleh karena itu penyesuaian *as built drawing* perlu dilakukan sebelum melakukan analisis struktur pada bangunan Gedung X.



Gambar 3 Penyesuaian *as built drawing* pada lantai basement



Gambar 4 Gambar perencanaan struktur lantai basement bangunan Gedung X

3.2. Pemodelan Struktur Gedung

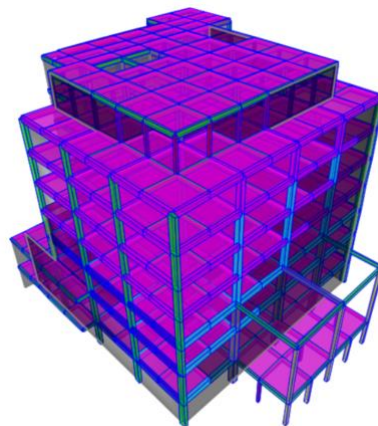
Setelah menyelesaikan pengukuran secara *ground check* dan membuatkan *as built drawing*, pengujian *hammer test* dilakukan pada kolom, balok dan plat lantai bangunan. Adapun hasil pengujian *hammer test* disajikan pada **Tabel 2**, beserta dimensi komponen yang diukur. Kode pada elemen struktur didasarkan pada dimensi elemen struktur tersebut. Selanjutnya, nilai kuat tekan beton diinputkan ke dalam *software* SAP2000. Adapun untuk baja tulangan dan skenario ketiga menggunakan data perencanaan yang diberikan oleh pihak Gedung X. *Input material properties* beton skenario 3

menggunakan satu jenis mutu beton untuk semua elemen struktur dengan mutu beton K350 dengan nilai $f_c' = 29,05$ MPa.

Tabel 2 Hasil uji *hammer test*

ELEMEN STRUKTUR	Balok Struktur							Balok Ram				Kolom								Plat				
Jenis pukulan	C	C	A	C	C	A	A	B	A	C	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	C	A	B
Kode bidang uji	B1	B2	B3	B4	B5	B10	B6	B7	B8	B9	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	L	T	R		
Dimensi	B	35	42	25	30	25	35	25	20	15	25	72	38	30	40	40	62	56	48	33.5				
	H	80	80	56	60	50	70	77	45	35	35	72	82	30	40	34	62	56	48	42	25	20	17	
	1	34	31	33	35	38	35	31	24	29	37	39	40	41	36	28	34	32	35	33	34	34	20	
	2	34	31	32	36	34	32	30	21	35	38	33	35	35	33	36	30	30	39	33	33	29	21	
	3	35	32	32	38	35	29	25	21	34	34	34	40	41	34	29	32	34	32	35	30	36	28	
	4	34	33	34	34	36	32	30	18	32	37	39	35	32	29	32	31	28	35	39	34	31	22	
Nilai <i>hammer test</i>	5	31	31	33	37	38	34	26	22	33	30	37	35	35	30	36	34	29	34	42	36	33	22	
	6	38	37	35	34	32	29	29	18	33	39	39	33	29	31	33	34	34	34	43	30	33	22	
	7	37	36	30	35	38	37	28	18	37	33	41	35	28	34	31	34	28	31	38	33	30	24	
	8	34	36	36	34	38	31	30	26		34	39	34	31	32	36	32	29	32	35	31	30	21	
	9	37	36	31	34	35	30	32	25		33	42	35	29	31	34	35	32	35	39	32	32	20	
	10	36	36	30	31	35	33	30	20		36	38	36	28	32	32	34	33	34	40	37	35	23	
R maksimum	38	37	36	38	38	37	32	26	37	38	39	42	41	36	34	36	35	35	39	43	37	35	24	
R minimum	31	31	30	31	32	29	25	18	29	34	30	35	33	28	28	31	30	28	31	30	30	28	20	
R rata-rata	35	33.9	32.6	34.8	35.9	32.2	29.1	21.3	33.3	36.3	34.8	39.0	36.0	31.7	30.9	33.6	33.0	31.0	34.2	37.3	33.6	31.1	21.9	
Simpangan baku	2.055	2.514	2.011	1.932	2.079	2.616	2.183	2.946	2.498	2.082	2.898	2	2.749	3.129	1.912	1.897	1.633	2.539	2.15	4.165	2.271	2.132	1.449	
Koefisien variasi	0.059	0.074	0.062	0.056	0.058	0.081	0.075	0.138	0.075	0.057	0.083	0.051	0.076	0.099	0.062	0.056	0.049	0.082	0.063	0.112	0.068	0.069	0.066	
R minimum	34	31	30	31	34	29	28	20	32	34	33	37	33	28	28	31	30	28	31	33	30	28	20	
Kuat tekan min (MPa)	22.3	18	23	18	22.3	21.5	20	14	26	22.3	27.8	34.5	27.8	20	20	24.5	23	20	24.5	27.8	16.5	13.6	14	
f_c' min (MPa)	18.51	14.94	19.09	14.94	18.51	17.85	16.6	11.62	21.58	18.51	23.07	28.64	23.07	16.6	16.6	20.34	19.09	16.6	20.34	23.07	13.7	11.29	11.62	
f_c' rata-rata (MPa)	19.92	18.38	22.48	19.64	21.19	21.88	17.97	13.11	23.43	21.77	25.45	31.71	27.22	21.21	20.21	23.82	23.07	20.34	24.6	29.13	18.01	20.46	13.61	

Pemodelan dimulai dengan *input* parameter *material properties* setiap material yang digunakan. Pada struktur gedung X, terdapat dua jenis material, yaitu beton dan baja tulangan. Nilai kuat tekan beton berbeda-beda pada setiap jenis elemen struktur, sehingga untuk material beton diperlukan data penginputan yang berbeda untuk setiap skenario. Setelah melakukan *input material properties*, selanjutnya dilakukan pendefinisian *frame section* seperti kolom dan balok, *area section* seperti plat lantai dan dinding geser. Material yang digunakan pada masing-masing frame sesuai dengan mutu masing-masing yang sudah diinputkan sebelumnya pada *material properties*. Setelah semua elemen struktur sudah didefinisikan, selanjutnya dilakukan pemodelan struktur Gedung X sesuai dengan *as built drawing existing*. Gambar pemodelan struktur Gedung X disajikan pada **Gambar 5**. Warna yang terdapat pada pemodelan struktur bukan merupakan hasil analisis dari struktur, melainkan sebagai informasi mengenai elemen struktur.

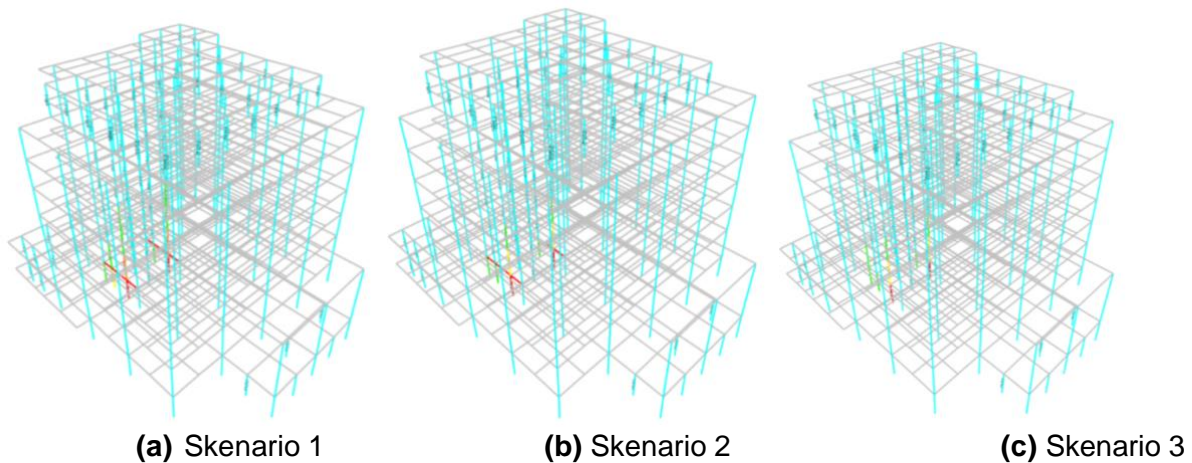


Gambar 5 Pemodelan struktur Gedung X pada SAP2000

3.3. Evaluasi Struktur Terhadap Beban Gempa

Hasil evaluasi untuk kombinasi pembebanan dengan adanya beban gempa pada skenario pertama, kedua, dan ketiga masing-masing berturut-turut terdapat 6, 5, dan 2 *frames* mengalami *overstress*.

Overstress terjadi disebabkan kapasitas rasionya lebih dari 1. Hal ini menunjukkan bahwa beban gempa memiliki pengaruh terhadap kekuatan struktur suatu bangunan. Elemen struktur yang mengalami *overstress* terdapat pada bagian rangka lift di lantai dasar. Hasil evaluasi untuk skenario pertama, kedua dan ketiga dengan kombinasi beban gempa dapat dilihat pada **Gambar 6(a)**, **Gambar 6(b)**, dan **Gambar 6(c)**.



Gambar 6 Hasil identifikasi kegagalan struktur Gedung X beban gempa

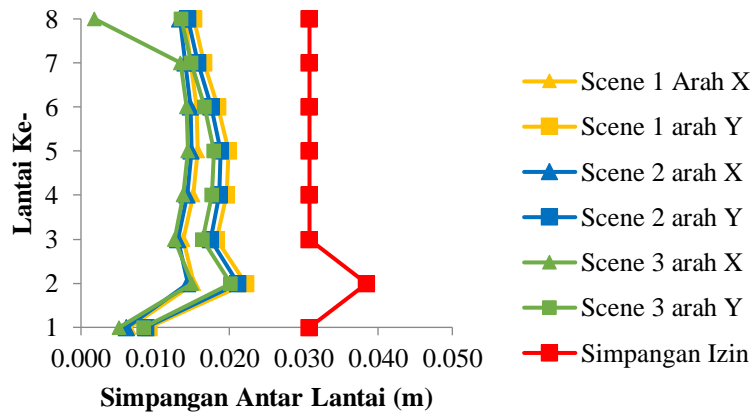
Dari hasil analisis dari *SAP2000*, kegagalan komponen struktur disebabkan oleh beban gempa. Selanjutnya dilakukan analisis respon struktur saat terjadi gempa. Analisis yang dilakukan berupa pengecekan modal partisipasi massa, pengecekan periode struktur, simpangan antar lantai, dan efek P-Δ. Analisis gempa diawali dengan penentuan besarnya Modal Partisipasi Massa (MPMR). MPMR menunjukkan persentase massa struktural model yang berpartisipasi dalam arah dan mode tertentu. SNI 1726-2019 mensyaratkan besarnya MPMR harus mencapai 90%. MPMR yang dibawah 90% memiliki gaya geser dasar gempa yang lebih kecil. Akan lebih aman struktur yang dianalisis dengan MPMR mendekati 100%. Apabila dianalisis bangunan dengan gaya geser dasar gempa yang kecil (MPMR dibawah 90%) memang struktur akan aman, tetapi akan mengalami keruntuhan jika ternyata gaya geser dasar gempa yang datang pada saat waktu tertentu sangat besar. Oleh karenanya, faktor ini perlu dipertimbangkan dalam menganalisis gempa. MPMR ini dapat diperoleh dari *software SAP2000* pada bagian *display Modal Participation Ratio*. Pada bangunan rumah sakit yang dianalisis partisipasi massa mencapai 90% tercapai pada mode 82 untuk arah sumbu X dan mode 90 untuk arah sumbu Y. Tabel terkait *modal mass participation ratio* untuk skenario 3 dapat dilihat pada **Tabel 3**.

Tabel 3 *Modal mass participation ratio*

Case	Mode	Periode (detik)	UX	UY	UZ	Sum UX	Sum UY
Modal	1	1,9677	$2,38 \times 10^{-1}$	$9,10 \times 10^{-2}$	$3,61 \times 10^{-7}$	0,23	0,09
Modal	2	1,3233	$5,80 \times 10^{-2}$	$6,05 \times 10^{-1}$	$3,62 \times 10^{-5}$	0,29	0,69
Modal	3	0,8183	$3,76 \times 10^{-1}$	$3,78 \times 10^{-3}$	$6,72 \times 10^{-6}$	0,67	0,69
Modal	90	0,1826	$4,83 \times 10^{-3}$	$5,10 \times 10^{-2}$	$5,85 \times 10^{-5}$	0,91	0,93
Modal	91	0,1818	$6,29 \times 10^{-6}$	$3,14 \times 10^{-4}$	$7,53 \times 10^{-4}$	0,91	0,93

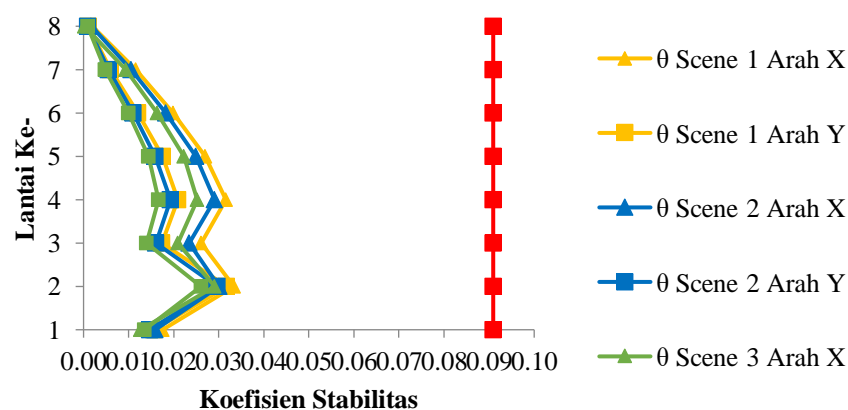
Gaya gempa lateral akan menghasilkan simpangan struktur dalam arah lateral. Dalam proses evaluasi struktur, maka simpangan lateral antar lantai tingkat (*story drift*) harus selalu diperiksa untuk menjamin stabilitas struktur, mencegah kerusakan elemen-elemen non struktural, serta untuk menjamin kenyamanan pengguna bangunan. Penentuan simpangan antar lantai tingkat evaluasi harus dihitung sebagai perbedaan defleksi pada pusat massa di tingkat teratas dan terbawah yang ditinjau. Struktur Gedung X yang memiliki kategori risiko IV yang berarti struktur tersebut sangat dibatasi simpangan antar

lantainya akibat beban gempa karena harus tetap beroperasi saat gempa terjadi. Simpangan antar lantai tingkat struktur (Δ) tidak boleh melebihi simpangan antar lantai tingkat izin (Δ_a). Nilai yang digunakan untuk menghitung simpangan antar lantai seperti simpangan antar tingkat izin (Δ_a), faktor redudansi, faktor pembesaran defleksi (C_d), dan faktor keutamaan gempa (I_e) didapat dari SNI 1726-2019. Simpangan yang terjadi ketika gempa berlangsung pada Gedung X telah lebih kecil dari simpangan izinnya, sehingga dapat disimpulkan bahwa Gedung X telah aman dari simpangan antar lantai yang terjadi. Nilai simpangan arah X dan arah Y pada ketiga skenario dapat dilihat pada **Gambar 7**.



Gambar 7 Simpangan antar lantai tiga skenario

Efek P- Δ merupakan efek sekunder berupa geser dan momen pada elemen-elemen struktur, yang disebabkan oleh aksi beban-beban vertikal yang dipicu oleh perpindahan horizontal struktur yang dihasilkan dari berbagai kondisi pembebanan. Pengaruh P- Δ pada geser, gaya dan momen elemen struktur yang dihasilkan dan simpangan antar lantai tingkat yang timbul oleh pengaruhnya, tidak disyaratkan untuk diperhitungkan koefisien stabilitas (θ). Dalam hasil pengecekan semua skenario struktur terhadap pengaruh P- Δ arah X dan Y pada struktur Gedung X sudah sesuai dengan ketentuan yang disyaratkan ketika nilai θ tidak melebihi dari nilai θ_{max} sebesar 0,09, ketika *story drift* dan *story shear* yang timbul akibat pengaruh P- Δ perlu diperhitungkan atau struktur Gedung X dapat dikatakan stabil terhadap beban gempa yang terjadi. Berikut disajikan hasil analisis terhadap efek P- Δ pada **Gambar 8** terkait diagram P- Δ .



Gambar 8 Diagram P- Δ

3.4. Rekomendasi Struktur

Rekomendasi struktur ini dilakukan hanya untuk skenario ketiga, karena bertujuan untuk mengevaluasi desain awal dari struktur Gedung X. Rekomendasi ini berguna untuk mengevaluasi desain yang sudah ada supaya apabila suatu saat ingin membangun bangunan dengan struktur, kelas situs tanah, fungsi dan parameter lainnya dengan nilai yang sama, maka hasil dari rekomendasi ini bisa digunakan. Dua elemen struktur yang mengalami *overstress* terdapat pada bagian bawah lift merupakan

kolom K3. Kolom K3 memiliki dimensi 300 mm × 300 mm dengan jumlah tulangan sebanyak 14, berdiameter 22 mm dan memiliki f_c' 29,05 MPa. Hasil dari rekomendasi struktur berupa pembesaran kolom pada bagian lift dan penambahan dimensi dari tulangannya. Dimensi struktur diperbesar menjadi 500 mm × 500 mm dan penambahan dimensi tulangan menjadi 32 mm. Analisis SAP2000 menunjukkan bahwa kolom K3 lantai *basement* mengalami *overstress* ketika diberikan beban gempa, oleh karena itu diperlukan perkuatan kolom K3 *existing*. Rekomendasi perbaikan yang disarankan adalah dengan melakukan *concrete jacketing* pada kolom karena *concrete jacketing* merupakan metode yang cocok digunakan untuk kolom yang berbentuk persegi. *Concrete jacketing* dilakukan dengan penambahan dimensi setebal 200 mm dengan tambahan tulangan sebanyak 8 buah berdiameter 25 mm sesuai rekomendasi yang didapat dari hasil analisis SAP2000.

4. Kesimpulan

Pengukuran Ground check diperlukan karena terdapat perbedaan antara gambar *as built drawing* yang didapat dari pihak Gedung X dengan kondisi *existing*. Hal ini merupakan hal yang kritis dalam menganalisis kekuatan struktur, sehingga pada awal perlu dilakukannya penyesuaian *as built drawing*. Pemodelan struktur meliputi kolom, balok, pelat lantai dan dinding geser. Warna yang terdapat pada gambar pemodelan bukan merupakan hasil akhir dari analisis struktur, melainkan sebagai informasi mengenai elemen struktur. Terdapat beberapa *overstress* pada elemen struktur pada skenario satu, dua, dan tiga berturut-turut pada saat diaplikasikan kombinasi pembebanan dengan gempa sebanyak 6, 5, dan 2 *frames*. Hal tersebut disebabkan rasio kapasitas *frames* tersebut sudah lebih dari 1. Besarnya partisipasi massa yang memenuhi 90% untuk arah X maupun Y terdapat pada *mode* ke-90 masing-masing sebesar 91,9% dan 93,5%. Nilai simpangan antar lantai pada arah X dan arah Y untuk setiap lantai pada Gedung X dinyatakan aman karena besar simpangan yang terjadi pada setiap lantai lebih kecil dari nilai simpangan izin. Hasil pengecekan terhadap pengaruh P-Δ arah X dan arah Y pada struktur Gedung X sudah sesuai dengan ketentuan yang disyaratkan di mana nilai θ tidak melebihi θ_{maks} atau struktur Gedung X dapat dikatakan stabil terhadap beban gempa yang terjadi.

Daftar Pustaka

- [1] [BSN] Badan Standarisasi Nasional. *Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung*. SNI 2847:2019. Jakarta: BSN; 2019
- [2] Surya M. Analisis dan Evaluasi Struktur Wing Fahutan IPB, Bogor Terhadap Ketahanan Gempa Berdasarkan Peta Gempa 2010. *Skripsi*. Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Pertanian Bogor. Bogor. 2012
- [3] Setyonegoro W, B. Sunardi, S. Sulastri, J. Nugraha, dan P. Susilanto. Analisis sumber gempabumi pada segmen Mentawai (studi kasus: gempabumi 25 oktober 2010). *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*. 2012; 13(2): 63- 68.
- [4] Sieh K, Natawidjaja D. Neotectonics of the Sumatran Fault Indonesia. *Journal of Geophysical Research*. 2000; 28(12): 295-326.
- [5] Reinhorn AM. *The UB-NEES Versatile High Performance Testing Facility 13th*. Canada: Vancouver; 2004.
- [6] Rohman RK, Kristiawan SA, Mukahar. Asesmen kinerja struktur gedung timbul jaya plaza kota Madiun pasca alih fungsi. *Media Teknik Sipil*. 2009; 9(2): 127-135.
- [7] Anggriawan FS, Rosyidah A. Kinerja Struktur Bangunan Dengan Floating Columns Terhadap Beban Gempa. *Potensi*. 2020; 22(1): 96-103.
- [8] Sutjipto S. Perbandingan Spektrum Respons Desain RSNI 1726:2018 dan SNI 1726-2012 Pada 17 Kota Besar Di Indonesia. *Konferensi Nasional Teknik Sipil 12*. Batam, Indonesia, 18-19 September 2018.
- [9] Edward L, Wilson. *CSI Analysis Reference Manual*. Berkeley: Computer & Structures Inc; 2004.
- [10] Sembiring A, Wallah S, Ointu B. Pengaruh Pembebanan Terhadap Hasil Pengujian Hammer Test Pada Kolom Beton Bertulang. *Jurnal Sipil Statik*. 2019; 7(2): 277-284.
- [11] Dharmawan W, Oktarina Devi, Safitri Mariana. Perbandingan Nilai Kuat Tekan Beton Menggunakan Hammer Test dan Compression Testing Machine terhadap Beton Pasca Bakar. *Jurnal Ilmu dan Terapan Bidang Teknik Sipil*. 2016; 22(1): 35-42.