

Analisis Perilaku Struktur dan Penyebaran Gaya pada Gedung *Frame-Tube*

MIRARA KHANZA^{1*}

¹ Dosen Program Studi Teknologi Rekayasa Konstruksi Bandungan Gedung,
Universitas Negeri Jakarta, Indonesia
Email: mirarakhanza@unj.ac.id

ABSTRAK

Perancangan gedung bertingkat tinggi pada daerah rawan gempa seperti Indonesia tergolong sulit. Gedung bertingkat tinggi cenderung memiliki fleksibilitas tinggi, sehingga perlu diperhatikan bagaimana perilaku struktur dan penyebaran gayanya. Meskipun telah banyak tipe bangunan dengan berbagai bentuk gedung bertingkat tinggi yang telah terbangun, perilaku setiap bangunan dapat berbeda, bergantung pada bentuk denah, tipe gedung, maupun tinggi gedung. Bangunan bertingkat yang dianalisis merupakan sistem framed-tube, karena sistem ini masih terbilang jarang untuk bangunan gedung di Indonesia. Model akan didesain menggunakan software ETABS, dengan pengecekan kriteria desain gempa mengacu pada SNI 1726:2019. Tujuan utama dari penelitian ini adalah mengetahui bagaimana perilaku struktur dan penyebaran gaya pada gedung bertingkat frame-tube. Dimana dengan tipe bangunan ini, diketahui bahwa elemen eksterior akan berpengaruh pada elemen interior, pun sebaliknya. Pada akhir penelitian, diketahui bahwa semakin tinggi gedung, semakin besar periode struktur dan simpangan strukturnya. Diketahui pula bahwa pada bangunan frame-tube, elemen eksternal menerima gaya lateral, sedangkan elemen internal menerima gaya gravitasi. Sehingga struktur dengan sistem framed-tube ini dinilai efektif dalam menahan gaya gempa.

Kata kunci: perilaku struktur, framed-tube, penyebaran gaya, elemen eksternal, elemen interior

ABSTRACT

Designing high-rise buildings in earthquake-prone areas such as Indonesia is difficult. High-rise buildings tend to have high flexibility, so it is necessary to pay attention to how the structure behaves and the distribution of forces. Although many types of buildings with various forms of high-rise buildings have been built, the behavior of each building can be different, depending on the plan form, building type, and building height. The high-rise building analyzed is a framed-tube system, as this system is still relatively rare for buildings in Indonesia. The model will be designed using ETABS software, with earthquake design criteria checking referring to SNI 1726:2019. The main objective of this research is to find out how the structural behavior and force distribution in a frame-tube high-rise building. Where with this type of building, it is known that exterior elements will affect interior elements, and vice versa. At the end of the study, it was found that the higher the building, the greater the structural period and structural deviation. It is also known that in frame-tube buildings, external elements receive lateral forces, while internal elements receive gravitational forces. So, the structure with the framed-tube system is considered effective in resisting earthquake forces.

Keywords: structural behaviour, framed-tube, force distribution, external elements, interior elements

1. PENDAHULUAN

Perancangan gedung bertingkat tinggi menjadi tantangan signifikan bagi para insinyur struktur, khususnya di wilayah yang memiliki risiko tinggi terhadap gempa bumi, seperti Indonesia. Semakin tinggi bangunan, akan semakin fleksibel, ditandai dengan meningkatnya periode alami struktur [11]. Meskipun berbagai tipe dan bentuk gedung bertingkat tinggi telah banyak direalisasikan, perilaku struktur masing-masing bangunan dapat bervariasi secara signifikan, tergantung pada konfigurasi denah, jenis struktur, serta ketinggian bangunan. Salah satu tipe gedung adalah *frame-tube*. Sistem tube adalah salah satu sistem stabilitas lateral dan bertindak sebagai *hollow* kantilever vertikal silinder bercangkang [4]. Pada bagian dalam bangunan, terdapat ruang luas tanpa kolom dan dinding, sebagai suatu inovasi bangunan *openspace* bermassa ringan [7]. Karena sistem bangunan ini masih jarang dibangun di Indonesia, maka perlu dianalisis efek dari sistem *frame-tube* terhadap kestabilan bangunan. Hal tersebut menjadi dasar penelitian ini untuk menganalisis bangunan dengan tipe *frame-tube*. Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mengetahui perilaku struktur dan penyebaran transfer gaya pada sistem *frame-tube*. Dengan demikian, jika sistem ini dinilai efektif dalam menahan gaya gempa, sistem ini dapat diterapkan pada bangunan tahan gempa di Indonesia.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Dalam desain gedung tinggi, sistem tube adalah salah satu sistem stabilitas lateral yang umum digunakan. Dirancang untuk bertindak sebagai *hollow* kantilever vertikal silinder bercangkang. Ini memungkinkan untuk membuat "cangkang" kaku yang tidak terbatas di sekitar eksterior bangunan. Sistem ini diperkenalkan oleh Fazlur Rahman Khan dari perusahaan Skidmore, Owings & Merrill (SOM) pada 1970-an. Sistem stabilitas lateral ini dinilai inovatif untuk merancang bangunan yang lebih tinggi dan lebih efisien pada waktu itu. Contoh pertama penggunaan sistem tube adalah DeWitt-Chestnut Gedung Apartemen 43 lantai, Chicago, Illinois yang selesai dibangun pada tahun 1966. Baja, beton, atau konstruksi komposit dapat digunakan untuk sistem jenis ini. Perimeter bagian luar terdiri dari kolom-kolom dengan jarak yang berdekatan yang diikat menjadi satu dengan balok spandrel dalam melalui sambungan momen untuk menahan semua beban lateral. Jarak antara bagian luar dan rangka inti terbentang dengan balok atau rangka. Ini dapat memaksimalkan efektivitas perimeter tabung dengan mentransfer beberapa beban gravitasi ke dalam struktur dan meningkatkan kemampuannya untuk menahan guling karena beban lateral. Struktur *tube* dikategorikan ke dalam beberapa jenis: *tube-in-tube*, *framed-tubes*, *braced-tube*, *bundle-tube*, sistem *hybrids-tube* [15].

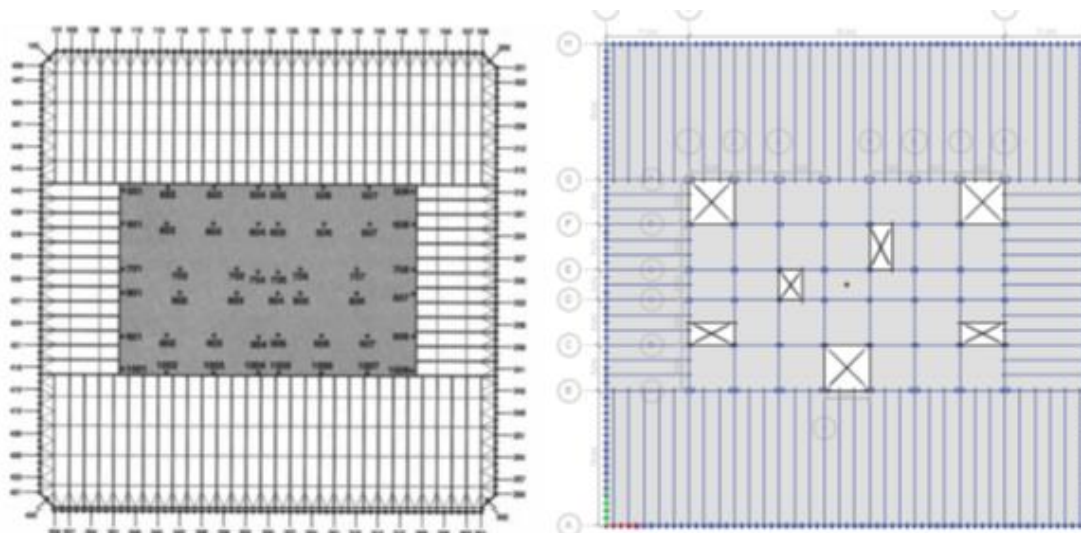
2.1 Sistem Bangunan *Framed-Tube*

Sistem *framed-tube* adalah salah satu sistem tabung yang paling banyak digunakan. Tabung kaku terdiri atas kolom jarak dekat yang terhubung oleh balok spandrel berdimensi tinggi yang disatukan dengan kuat untuk membuat cangkang luar yang kaku. Tergantung pada struktur, jarak kolom cukup dekat, umumnya berjarak 1,5–4,5 m. Tinggi balok spandrel bisa berkisar dari 0,5–1,2 m. Secara teori, jika tabung eksterior adalah tabung sempurna di gedung tinggi dengan sistem *framed-tube*, maka bangunan harus berperilaku seperti kantilever dengan semua gaya lateral ditahan oleh tabung luar [5].

3. METODOLOGI PENELITIAN

Objek gedung pada penelitian ini adalah gedung bertingkat 50 lantai dengan bentuk dan denah gedung mengacu pada "World Trade Center" di Manhattan, New York City, United State. WTC ini menggunakan konsep dasar perancangan *framed-tube*, yang memiliki perilaku mirip seperti

silinder yang di dalamnya terdapat inti/*core*. Antara kulit silinder dengan inti dihubungkan dengan lantai beton yang disokong oleh rangka baja [10]. Denah mengacu pada WTC karena bangunan dengan sistem *framed-tube* ini terbilang jarang dibangun. Dengan tipe bangunan ini, dapat diketahui bahwa kerusakan elemen eksterior akan mempengaruhi elemen interior, pun sebaliknya.



Gambar 1. (a) Denah bangunan (b) Pemodelan pada ETABS

Denah bangunan ditunjukkan pada **Gambar 1 (b)**. Pemodelan dilakukan dengan *software* berbasis *finite element* yaitu ETABS. Pembebanan mengikuti SNI 1727-2020 dengan beban hidup $2,4 \text{ kN/m}^2$ untuk tempat tinggal dan beban lantai dasar $4,79 \text{ kN/m}^2$ untuk lobby [12]. Tinggi perlantai 4 m , dengan tinggi lantai dasar 5 m dan tinggi total bangunan 201 m [3]. Pembebanan gempa menggunakan respons spektrum daerah Jakarta, Indonesia. Pemodelan struktur utama pada perangkat lunak ETABS ditunjukkan pada **Gambar 1 (a)**. Kerangka dalam bangunan (berbentuk persegi panjang) terhubung dengan kerangka luar (berbentuk persegi), sehingga membentuk kerangka seperti tabung (*framed-tube*). Antara kerangka dalam dan kerangka luar dihubungkan dengan balok penghubung, sedangkan kerangka luar terdiri atas kolom berjarak rapat yang dihubungkan dengan balok sprandel sehingga membentuk kerangka kokoh yang ditujukan untuk menerima gaya transversal [8]. Untuk analisis gempa, menggunakan kombinasi sesuai dengan yang ada pada SNI 2847:2019 adalah $1,4\text{DL}; 1,2\text{DL}+1,6\text{LL}; 0,9\text{DL}\pm 1,0\text{E}$ dan $1,2\text{DL}\pm 1,0\text{LL}\pm 1,0\text{E}$ [14].

4. ANALISIS DATA

4.1 Sistem Bangunan *Framed-Tube*

Bangunan dimodelkan dengan aplikasi ETABS menggunakan respons spektrum daerah Jakarta dengan percepatan respons spektrum S_{D1} $0,3972$ dan S_{DS} $0,5703$. Sistem struktur adalah *frame-tube*, sistem rangka struktur baja dengan elemen kolom inti (IC) dan kolom rangka luar (OC) menggunakan profil *box hollow*, dan balok sprandel, balok anak, balok induk, dan balok penghubung menggunakan profil IWF.

Tabel 1. List Profil untuk Elemen Kolom dan Balok

Elemen	Lantai	Nama	Material	Tinggi [m]	Lebar [m]	Ketebalan Sayap [m]	Ketebalan Badan [m]
Kolom	41-50	IC 40x80 t 30	Fy 420	0,8	0,4	0,03	0,03
	31-40	IC 40x80 t 35	Fy 420	0,8	0,4	0,035	0,035
	21-30	IC 40x80 t 40	Fy 420	0,8	0,4	0,04	0,04
	11-20	IC 40x80 t 45	Fy 420	0,8	0,4	0,045	0,045
	1-10	IC 40x80 t 50	Fy 420	0,8	0,4	0,05	0,05
	21-50	IC 60x120 t 40	Fy 420	1,2	0,6	0,04	0,04
	11-20	IC 60x120 t 45	Fy 420	1,2	0,6	0,045	0,045
	1-10	IC 60x120 t 50	Fy 420	1,2	0,6	0,05	0,05
	21-50	IC 60x60 t 40	Fy 420	0,6	0,6	0,04	0,04
	11-20	IC 60x60 t 45	Fy 420	0,6	0,6	0,045	0,045
	1-10	IC 60x60 t 50	Fy 420	0,6	0,6	0,05	0,05
	41-50	OC t 20	Fy 420	0,3	0,3	0,02	0,02
	31-40	OC t 25	Fy 420	0,36	0,36	0,025	0,025
	21-30	OC t 30	Fy 420	0,36	0,36	0,03	0,03
	11-20	OC t 50	Fy 420	0,36	0,36	0,05	0,05
	1-10	OC 60x60	Fy 420	0,6	0,6	0,06	0,06
Balok	1-50	Balok <i>sprandel</i>	Fy 345	0,8	0,36	0,03	0,03
	1-50	Balok	Fy 345	0,5	0,2	0,016	0,01
	1-50	Balok anak	Fy 345	0,45	0,2	0,014	0,009
	1-50	Balok penghubung	Fy 420	0,7	0,3	0,024	0,013

Kombinasi pembebanan yang digunakan adalah kombinasi pembebanan LRFD SNI 2847-2013:

1. 1,4DL
2. 1,2DL + 1,6LL + 0,5 (Lr atau R)
3. 1,2DL + 1,6 (Lr atau R) + (1,0 LL atau 0,5W)
4. 1,2D + 1,0W + 1,0LL + 0,5 (Lr atau R)
5. (1,2 + 0,2 Sds) DL + 1,0 LL ± 0,3 (ρ Ex) ± 1,0 (ρ Ey)
6. (1,2 + 0,2 Sds) DL + 1 LL ± 1,0 (ρ Ex) ± 0,3 (ρ Ey)
7. (0,9 – 0,2 Sds) DL ± 0,3 (ρ Ex) ± 1 (ρ Ey)
8. (0,9 – 0,2 Sds) DL ± 1(ρ Ex) ± 0,3 (ρ Ey)
9. 0,9DL + 1,0W
10. Service 1DL + 1LL

4.2 Hipotesis

Berisi tentang anggapan dasar mengenai perilaku struktur dan penyebaran transfer gaya bangunan tipe *frame-tube*. Hipotesis penulis adalah, semakin tinggi bangunan, periode struktur akan semakin tinggi, pun juga dengan simpangan strukturnya. Untuk penyebaran transfer gaya, elemen eksternal menerima gaya lateral (gaya gempa), sedangkan elemen inti/*core* menerima gaya gravitasi. Hipotesis ini didasari karena melihat kolom eksternal yang rapat dan kaku sehingga menyerap banyak gaya lateral, sedangkan kolom internal langsung dikenai gaya akibat beban hidup, sehingga menerima gaya gravitasi.

4.3 Analisis

Analisis yang dilakukan dalam penulisan terdiri dari beberapa analisis. Tahap pertama adalah memastikan bahwa gedung sudah stabil secara keseluruhan, mencakup analisis periode getar alami, simpangan izin, dan P-Delta *effect*. Setelah memastikan bangunan stabil, selanjutnya

ke analisis kapasitas elemen berdasarkan kombinasi ultimate LRFD. Dari analisis penampang ini, akan diketahui penyebaran transfer gaya pada bangunan *frame-tube*.

4.3.1 Periode Getar Struktur

Periode alami struktur perlu diketahui untuk menghindari resonansi pada struktur. Periode fundamental struktur (T) tidak diizinkan melebihi hasil koefisien untuk batas atas pada periode yang dihitung (C_u) dan batas atas bawah periode fundamental pendekatan (T_a). Periode fundamental pendekatan (T_a) ditentukan berdasarkan SNI 1726-2019 [5]. Periode getar struktur didapat dari ETABS melalui **Tabel 2 Modal Participating Mass Ratio**. Pada **Tabel 2** tersebut harus dipastikan terlebih dahulu bahwa dua modal pertama, perpindahan yang mendominasi merupakan perpindahan translasi.

Tabel 2. Modal Participating Mass Ratio

Mode	Period [sec]	UX	UY	RZ	Sum UX	Sum UY	Sum RZ
1	5,736	0,7092	0	8,059E-07	0,7092	0	8,059E-07
2	5,704	0	0,7131	0	0,7092	0,7131	8,059E-07
3	3,586	7,524E-07	0	0,704	0,7092	0,7131	0,704
4	2,110	0,1442	0	0	0,8533	0,7131	0,704
5	2,099	0	0,1439	0	0,8533	0,857	0,704
6	1,414	0	0	0,1451	0,8533	0,857	0,8491
7	1,299	0,0513	0	0	0,9047	0,857	0,8491
8	1,294	0	0,0506	0	0,9047	0,9076	0,8491
9	0,904	1,433E-06	0	0,057	0,9047	0,9076	0,9061
10	0,898	0,0247	6,02E-07	2,384E-06	0,9294	0,9076	0,9061
11	0,897	6,095E-07	0,0244	0	0,9294	0,932	0,9061
12	0,688	0	0,018	0	0,9294	0,95	0,9061

Ragam pertama dan kedua menunjukkan arah translasi dan jumlah partisipasi massa kedua arah translasi sudah mencapai 90% dalam total jumlah ragam yang digunakan (Hal ini menunjukkan bahwa jumlah modal yang diperhitungkan oleh bangunan yang didesain telah dianggap mempresentasikan respon struktur ketika bangunan menerima beban gempa/gaya lateral). Kemudian akan dilihat apakah periode getar struktur memenuhi persyaratan periode fundamental pendekatan (T_a) yang ditentukan **Persamaan 1** dan **Persamaan 2** berdasarkan SNI 1726:2019.

1. Periode fundamental pendekatan minimum ($T_{a\ minimum}$).

$$T_{a\ minimum} = C_t \times h_n^x \quad \dots (1)$$

keterangan:

$T_{a\ minimum}$ = nilai batas bawah periode bangunan [detik],

C_t dan x = parameter yang ditentukan berdasarkan tipe struktur,

h_n = ketinggian struktur di atas dasar sampai tingkat tertinggi struktur [m].

2. Periode fundamental pendekatan maksimum ($T_{a\ maksimum}$).

$$T_{a\ maksimum} = C_u \times T_{a\ minimum} \quad \dots (2)$$

keterangan:

$T_{a\ maksimum}$ = nilai batas atas periode bangunan [detik],

C_u = parameter yang ditentukan berdasarkan nilai S_{D_1} .

Tabel 3. Nilai Parameter Periode Pendekatan C_t dan x

Tipe Struktur	C_t	x
Sistem rangka pemikul momen di mana rangka memikul 100 persen gaya gempa yang disyaratkan dan tidak dilingkuip atau dihubungkan dengan koponen yang lebih kaku dan akan mencegah rangka dari defleksi jika dikenai gaya gempa:		
Rangka baja pemikul momen	0,0724	0,8
Rangka beton pemikul momen	0,0466	0,9
Rangka baja dengan bresing eksentris	0,0731	0,75
Rangka baja dengan bresing terkekang terhadap tekuk	0,0731	0,75
Semua system struktur lainnya	0,0488	0,75

Tabel 4. Koefisien untuk Batas Atas pada Periode yang Dihitung

Parameter Percepatan Respons Spektral Desain pada 1 detik, S_{D_1}	C_u
$\geq 0,4$	0,0724
0,3	0,0466
0,2	0,0731
0,15	0,0731
$\leq 0,1$	0,0488

Berdasarkan SNI 1726:2019 untuk persamaan perhitungan periode fundamental pendekatan dan tabel-tabel penentuan parameter, maka dilakukan perhitungan sebagai berikut.

3. Tipe struktur adalah sistem rangka baja pemikul momen, sehingga berdasarkan **Tabel 3** didapat nilai $C_t = 0,0724$ dan $x = 0,8$.
4. Untuk nilai S_{D_1} telah ditentukan pada poin Pembebanan Gempa adalah sebesar 0,132; maka dari **Tabel 4** diinterpolasi sehingga didapat nilai $C_u = 1,4$.
5. Diketahui tinggi struktur (h_n) yaitu 201 meter, sehingga nilai $T_{a\ minimum} = 5,0384$ detik dan $T_{a\ maksimum} = 7,0538$ detik.
6. Periode fundamental struktur didapat dari ETABS untuk modal 1 dan modal 2 dalam arah x dan y sebagai berikut $T_{x\ (mode\ 1)} = 5,736$ detik dan $T_{y\ (mode\ 2)} = 5,704$ detik. Syarat: $T_{a\ minimum} < T < T_{a\ maksimum}$. Karena nilai periode fundamental struktur arah x dan y yang didapat memenuhi syarat, maka periode struktur dapat digunakan yaitu $T_x = 5,736$ detik dan $T_y = 5,704$ detik.

4.3.2 Gaya Geser Seismik

Koefisien respons seismik C_s dapat ditentukan dengan **Persamaan 3**.

$$C_s = \frac{S_{DS}}{\frac{R}{I_e}} \quad \dots (3)$$

keterangan:

- C_s = koefisien respons seismik,
- S_{DS} = parameter percepatan spektrum respons desain dalam rentang periode pendek,
- R = faktor modifikasi respons,
- I_e = faktor keutamaan gempa.

Nilai C_s tersebut dicari nilai yang terkecil dari **Persamaan 4** di bawah ini.

$$C_s = \frac{S_{D1}}{T\left(\frac{R}{I_e}\right)} \quad \dots (4)$$

Nilai C_s juga tidak boleh kurang dari nilai **Persamaan 5** di bawah ini:

$$C_{s\ min} = 0,044 S_{DS} \times I_e \geq 0,01 \quad \dots (5)$$

Berikut adalah perhitungan untuk mendapatkan nilai C_s yang digunakan $C_{s\ min} = 0,03137 > 0,01$ maka digunakan $C_{s\ min} = 0,0251$. Serta, untuk perhitungan nilai $C_s = 0,07219$; $C_{s-x} = 0,00866$; $C_{s-y} = 0,00870$ sehingga digunakan yang minimum yaitu $C_{s-x} = 0,00866$ dan $C_{s-y} = 0,00870$. Namun, harus diperhatikan $C_{s\ min} = 0,0251$ sehingga yang akhirnya digunakan $C_{s-x} = 0,0251$ dan $C_{s-y} = 0,0251$.

Geser dasar seismik (V) dalam arah yang ditetapkan dihitung dengan **Persamaan 6** berikut.

$$V_{statik} = C_s \times W \quad \dots (6)$$

dengan:

W = berat seismik efektif.

Nilai W kumulatif didapat dari ETABS dengan kombinasi *Dead Load*, *SIDL* dan *0,25 Live Load* dan ditunjukkan pada **Tabel 5** berikut.

Tabel 5. Berat Total Bangunan

TABLE: Base Reactions					
Output Case	Case Type	Step Type	Global FX	Global FY	Global FZ
			[kN]	[kN]	[kN]
Berat Sendiri	Combination		0	0	1.569.618,776

Sehingga didapatkan nilai $V_{statik-x} = 39.386,758$ kN dan $V_{statik-y} = 39.386,758$ kN. Adapun $V_{dinamik}$ didapatkan dari *Base Reactions* di ETABS pada **Tabel 6** berikut.

Tabel 5. Berat Total Bangunan

TABLE: Base Reactions					
Output Case	Case Type	Step Type	Global FX	Global FY	Global FZ
			[kN]	[kN]	[kN]
EQx	LinRespSpec	Max	11.797,033	5,4536	0
EQy	LinRespSpec	Max	5,2815	12.109,8352	0

Berdasarkan peraturan SNI 1726:2019, bahwa $V_{dinamik}$ harus sama dengan atau lebih besar dari 100% V_{statik} . Maka harus dicek apakah $V_{dinamik}$ sudah lebih besar daripada 100% V_{statik} atau belum. Jika belum, diberikan skala pembesaran seperti tersaji pada **Tabel 7**.

Tabel 2. Pengecekan $V_{dinamik}$ dan V_{statik}

Arah	V_{statik} [kN]	$V_{dinamik}$ [kN]	Skala Pembesaran
x	39.386,75786	11.797,03	3,338700339
y	39.386,75786	12.109,84	3,252460273

Selanjutnya, skala pembesaran dikalikan pada *load case data* untuk EQx dan EQy seperti pada **Persamaan 7** berikut.

$$\text{Faktor Skala} = \frac{g}{R} * \text{Skala Pembesaran} \quad \dots (7)$$

4.3.3 Pengecekan Simpangan Antar Lantai

Simpangan antar lantai dianalisis berdasarkan SNI 1726:2019 di mana simpangan tidak boleh melebihi simpangan antar lantai izin (Δ_a). Pada penelitian ini, gedung masuk ke dalam kategori sistem lainnya, sehingga simpangan antar lantai izin (Δ_a) mengikuti **Persamaan 8** berikut.

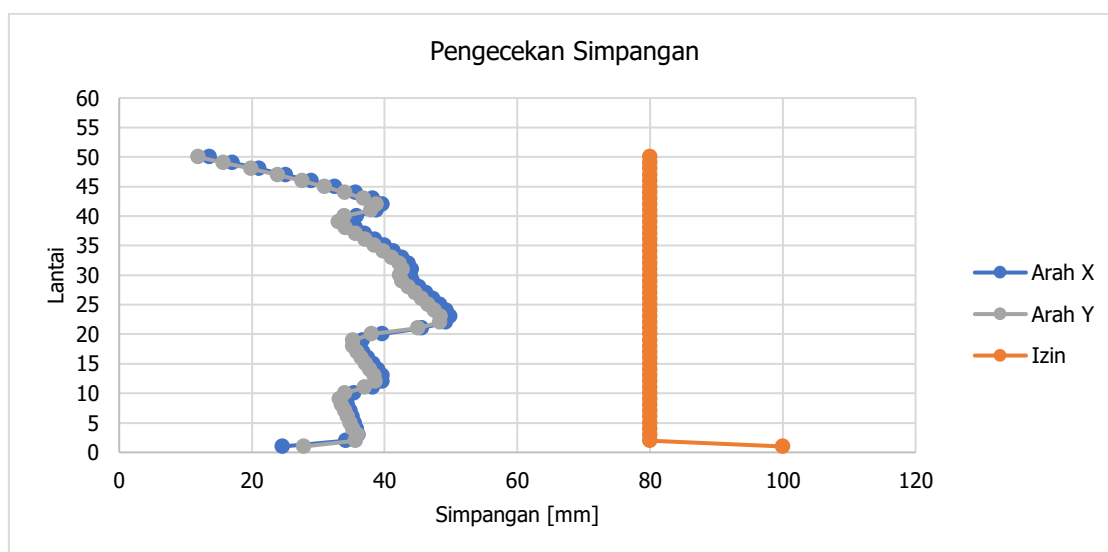
$$\Delta_a = 0,020h_n^x \quad \dots (8)$$

Perhitungan simpangan meliputi *story drift* (δ) atau *inter-story drift* (Δ) dari analisis struktur secara elastis melalui *software* ETABS yang kemudian dipengaruhi faktor pembesaran defleksi sesuai **Persamaan 9** dan **Persamaan 10** berikut.

$$\delta = \frac{\delta_e C_d}{I_e} \quad \dots (9)$$

$$\Delta = \frac{\Delta_e C_d}{I_e} \quad \dots (10)$$

Gambar 2 menunjukkan grafik pengecekan simpangan struktur.



Gambar 2. Grafik pengecekan simpangan

4.3.4 Pengecekan Efek P-Delta

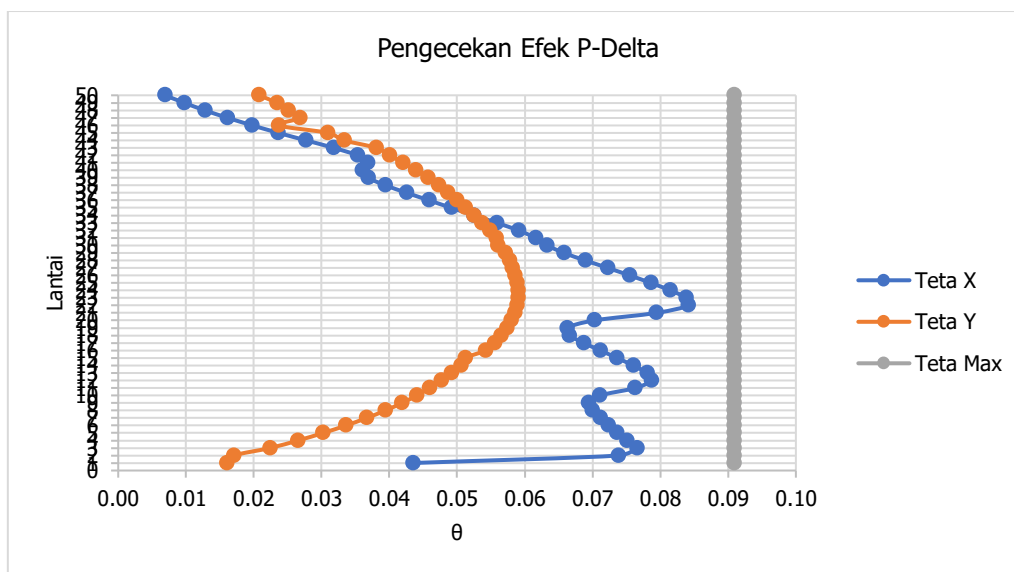
Ketika struktur mengalami beban gempa, terjadi perpindahan atau pergeseran antara pusat massa struktur dan pusat massa lantai di bawahnya serta pusat kekakuan dari elemen penahan gaya gravitasi struktur. Akibatnya, terbentuk momen tambahan yang mengancam kestabilan bangunan. Fenomena tersebut disebut dengan *P-Delta Effect*. Pada bagian ini, *P-Delta Effect* harus diperhitungkan memastikan keselamatan struktur saat terjadi gempa. Berdasarkan Pasal 7.8.7 SNI 1726:2019, pengaruh *P-Delta* ditentukan oleh **Persamaan 11** berikut.

$$\theta = \frac{P_x \Delta_e I_e}{V_x h_{sx} C_d} \quad \dots (11)$$

dengan:

- P_x = beban desain vertikal total pada dan di atas tingkat x [kN]; bila menghitung P_x , faktor beban individu tidak perlu melebihi 1,0;
- Δ_e = simpangan antar lantai tingkat desain, terjadi secara serentak dengan V_x [mm];
- I_e = faktor keutamaan gempa;
- V_x = gaya geser seismik yang berkerja anantara tingkat x dan $x - 1$ [kN],
- h_{sx} = tinggi tingkat di bawah tingkat x [mm];
- C_d = faktor pembesaran defleksi.

Gambar 3 menunjukkan grafik pengecekan simpangan struktur.



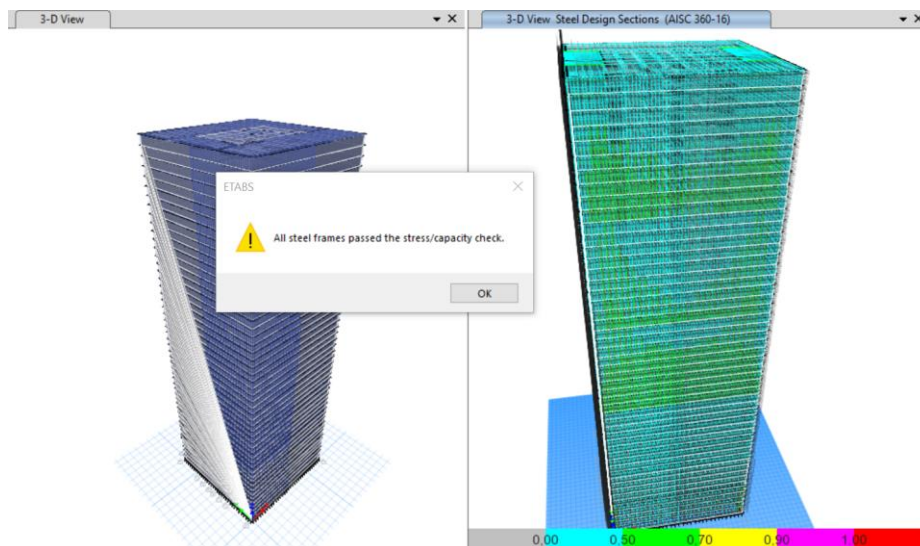
Gambar 3. Grafik pengecekan efek P-Delta

Kemudian akan dilakukan pengecekan profil penampang oleh ETABS, pengecekan menggunakan kombinasi pembebanan LRFD mencakup ultimate gravity dan ultimate gempa, sebagai berikut:

1. 1,4DL
2. 1,2DL + 1,6LL + 0,5 (Lr atau R)
3. 1,2DL + 1,6 (Lr atau R) + (1,0 LL atau 0,5W)
4. 1,2D + 1,0W + 1,0LL + 0,5 (Lr atau R)
5. (1,2 + 0,2 Sds) DL + 1,0 LL ± 0,3 (ρ Ex) ± 1,0 (ρ Ey)
6. (1,2 + 0,2 Sds) DL + 1 LL ± 1,0 (ρ Ex) ± 0,3 (ρ Ey)
7. (0,9 - 0,2 Sds) DL ± 0,3 (ρ Ex) ± 1 (ρ Ey)
8. (0,9 - 0,2 Sds) DL ± 1(ρ Ex) ± 0,3 (ρ Ey)
9. 0,9DL + 1,0W
10. Service 1DL + 1LL; GSA 2DL + 0,5LL

4.3.5 Pengecekan Kapasitas Penampang

Kapasitas elemen struktur dicek dengan ETABS yang mengacu pada SNI 1729:2019 tentang Spesifikasi untuk Bangunan Gedung Baja Struktural apakah masih bisa memikul semua kombinasi akibat gravitasi, angin, maupun gempa [7].



Gambar 4. Pengecekan kapasitas penampang

Dari pengecekan di atas, dapat dilihat bahwa baik simpangan, efek P-Delta di bawah batas izin, dan elemen-elemen struktur mampu memikul beban-beban kombinasi ultimit baik berdasarkan kombinasi gravitasi, angin, maupun gempa. **Tabel 8** menunjukkan beberapa rasio kolom.

Tabel 8. Rasio Maksimum Kolom

TABLE: Steel Frame Design Summary – AISC 360-16							
Story	Label	Unique Name	Design Type	Design Section	Status	PMM Com	PMM Ratio
1	C1	361	Column	OC 60x60	No Message	6.8(C)	0,804
1	C34	394	Column	OC 60x60	No Message	6.8(C)	0,804
1	C33	394	Column	OC 60x60	No Message	6.8(C)	0,803
1	C66	426	Column	OC 60x60	No Message	6.8(C)	0,803
1	C129	4361	Column	IC 60x120 t 50	No Message	GSA(C)	0,751
1	C135	4426	Column	IC 60x120 t 50	No Message	GSA(C)	0,751
2	C129	4368	Column	IC 60x120 t 50	No Message	GSA(C)	0,747
2	C135	4429	Column	IC 60x120 t 50	No Message	GSA(C)	0,747
3	C129	4368	Column	IC 60x120 t 50	No Message	GSA(C)	0,711
3	C135	4429	Column	IC 60x120 t 50	No Message	GSA(C)	0,711
2	C1	617	Column	OC 60x60	No Message	6.8(C)	0,711
2	C34	650	Column	OC 60x60	No Message	6.8(C)	0,711
2	C33	649	Column	OC 60x60	No Message	6.8(C)	0,71
2	C66	682	Column	OC 60x60	No Message	6.8(C)	0,71
1	C134	4367	Column	IC 60x120 t 50	No Message	GSA(C)	0,707
2	C134	4366	Column	IC 60x120 t 50	No Message	GSA(C)	0,706
2	C136	4437	Column	IC 60x120 t 50	No Message	GSA(C)	0,706
1	C136	4427	Column	IC 60x120 t 50	No Message	GSA(C)	0,706
1	C146	4536	Column	IC 60x120 t 50	No Message	GSA(C)	0,696
1	C141	4486	Column	IC 60x120 t 50	No Message	GSA(C)	0,695

Tabel 8. Rasio Maksimum Kolom lanjutan

TABLE: Steel Frame Design Summary – AISC 360-16							
Story	Label	Unique Name	Design Type	Design Section	Status	PMM Com	PMM Ratio
4	C135	4430	Column	IC 60x120 t 50	No Message	GSA(C)	0,693
1	C173	4806	Column	IC 60x120 t 50	No Message	GSA(C)	0,693
4	C129	4370	Column	IC 60x120 t 50	No Message	GSA(C)	0,692
2	C141	4487	Column	IC 60x120 t 50	No Message	GSA(C)	0,692
2	C146	4537	Column	IC 60x120 t 50	No Message	GSA(C)	0,692
2	C173	4807	Column	IC 60x120 t 50	No Message	GSA(C)	0,69
1	C174	4816	Column	IC 60x120 t 50	No Message	GSA(C)	0,69

4.4 Pembahasan

Jika dilihat dari periode alami struktur $T_x = 5,736 \text{ detik}$; $T_y = 5,704 \text{ detik}$; termasuk rentang di antara $T_{a \text{ minimum}} = 5,0384 \text{ detik}$; $T_{a \text{ maksimum}} = 7,0538 \text{ detik}$; menandakan bahwa struktur cukup stabil, dan periode struktur mendekati periode minimum, menandakan bahwa struktur cukup kaku. Struktur yang cukup kaku ini menandakan cukup baik dalam menahan gaya gempa, padahal struktur tidak dilengkapi dengan *shearwall* dan *bracing*. Selanjutnya dilihat dari simpangannya bernilai sekitar 50 mm di bawah simpangan izin 80 mm, menandakan bahwa struktur cukup kaku dan bisa menjaga fleksibilitasnya. Pengecekan selanjutnya adalah efek P-Delta, untuk memastikan bahwa struktur tidak menerima momen tambahan akibat adanya eksentrisitas. Dari hasil analisis, baik teta X dan teta Y berada di bawah teta max, yang berarti struktur tidak mengalami efek P-Delta. Dari sini, terlihat bahwa bangunan *frame-tube* memiliki struktur yang lebih kaku dan simpangan yang lebih kecil, dan tidak terjadinya efek P-Delta karena gaya transversal mampu diserap dengan cukup baik.

Jika dilihat dari **Tabel 8** tentang rasio maksimum kolom, dapat diketahui bahwa elemen eksternal (*outer column*) lebih banyak didominasi oleh kombinasi 6.8: $(1,2 + 0,2 S_{DS}) DL + 1 LL - 1,0 (\rho EQy) - 0,3 (\rho EQx)$, yaitu kombinasi gempa. Sedangkan elemen internal (*inner column*) lebih banyak didominasi kombinasi GSA: $2DL + 0,5LL$; yaitu kombinasi gravitasi. Sehingga dapat dikatakan bahwa elemen eksternal efektif menahan gaya transversal, sedangkan elemen internal efektif menahan gaya gravitasi. Sistem *framed-tube* ini dinilai efektif dalam menahan gaya-gaya yang ada, karena mampu mendistribusikan gaya-gaya tersebut secara efisien melalui kolom eksternal dan internal yang saling terhubung dengan kuat.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Semakin tinggi gedung, gedung akan semakin fleksibel ditandakan dengan periode struktur yang besar. Semakin fleksibel bangunan, simpangan struktur akan semakin besar. Oleh karena itu dalam SNI diatur periode maksimum dan simpangan antar-lantai maksimum yang diizinkan.

Untuk gedung bertingkat tinggi, biasanya dilengkapi dengan *shearwall* (untuk struktur beton bertulang) dan *bracing* untuk struktur baja. Dalam tesis ini, gedung tidak dilengkapi dengan *bracing*, namun digantikan dengan sistem *tube* dapat dilihat bahwa bangunan lebih kaku, dibuktikan dengan periode struktur yang kecil. Konsekuensinya dimensi elemen dibuat lebih besar untuk memenuhi syarat simpangan izin dan mencegah adanya efek P-Delta pada gedung.

Penyebaran transfer beban pada bangunan *framed-tube*, bahwa kolom tepi (*outer column*) cenderung menerima beban lateral, sedangkan kolom dalam/kolom inti (*inner column/core column*) cenderung menerima beban gravitasi. Dibuktikan pada rasio maksimum yang diterima kolom (**Tabel 8**) bahwa pada kolom tepi, kombinasi yang menyebabkan rasio maksimum adalah kombinasi gempa, sedangkan pada kolom dalam, kombinasi yang menyebabkan rasio maksimum adalah kombinasi gravitasi. Sehingga struktur dengan sistem *framed-tube* adalah struktur yang dinilai efektif dalam struktur tahan gempa, walau memiliki kelemahan biaya yang mahal karena banyaknya penggunaan elemen struktur.

5.2 Saran

Pada penelitian ini, analisis dilakukan secara statis linier, sehingga perilaku inelastik baja belum dapat tergambarkan dengan baik. Untuk penelitian selanjutnya, dapat meninjau perilaku inelastik material maupun penampang.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ahmad, M. &. (2021). Behaviour of framed-tube systems under lateral loading in highrise buildings. *Structures*, 34(____), 196-204.
- [2] Alipour, A. &. (2018). Effectiveness of exterior tube stiffness in seismic mitigation for tall structures. *Journal of Earthquake Engineering*, 22(4), 657-673.
- [3] Badan Standardisasi Nasional. (2019). *SNI 1726:2019 tentang Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- [4] Badan Standardisasi Nasional. (2019). *SNI 2847:2019 tentang Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- [5] Badan Standardisasi Nasional. (2020). *SNI 1727:2020 tentang Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait Untuk Bangunan Gedung dan Struktur Lain*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- [6] Badan Standardisasi Nasional. (2020). *SNI 1729:2020 tentang Spesifikasi untuk bangunan gedung baja struktural*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- [7] Faschan, W. G. (2005). *Reference Structural Models and Baseline Performance Analysis of the World Trade Center Towers*. Washington D.C.: National Institute of Standards and Technology.
- [8] Fu, F. (2018). *Design and Analysis of Tall and Complex Structures*. Cambridge: Elsevier Ltd.
- [9] Fu, F. (2020). Advanced seismic analysis of framed-tube skyscrapers with varying stiffness. *Engineering Structures*, 210, 110369.
- [10] Gupta, R. &. (2020). Dynamic performance of tube-in-tube structures under seismic loading. *International Journal of Civil Engineering*, 18(3), 225-243.
- [11] Jeffrey, W. (2005). *Final Report on the Collapse of the World Trade Center Towers*. Washington D.C.: National Institute of Standards and Technology.
- [12] Kim, J. &. (2019). Lateral load resistance of tube-type tall buildings: a comparative study. *Structures*, 22(____), 14-23.
- [13] Paul, A. &. (2017). Seismic response optimization for framed-tube structures. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 46(2), 285-305.
- [14] Sadek, F. (2005). *Baseline Structural Performance and Aircraft Impact Damage Analysis of the World Trade Center Towers*. Washington D.C.: National Institute of Standards and Technology.
- [15] Wang, Q. &. (2021). Comparison of framed-tube and braced-tube systems in seismic design for tall buildings. *Journal of Structural Engineering*, 147(5), 04021044.