

PERILAKU NONLINEAR STRUKTUR GEDUNG BAJA DENGAN BENTUK DENAH L, T DAN U AKIBAT GEMPA

Ade Faisal^{1,2}, Afif Prasetyo Darsono¹

¹Program Studi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, Medan

²Email: adef@umsu.ac.id

Article Info

Article history

Received :
Accepted :
Published :

Keywords:

Steel structure, center of mass, torsion, irregular building

JEL Classification

133,C61,C67

DOI:

Abstrak

Indonesia merupakan wilayah rawan gempa yang memiliki sejumlah kota besar dengan pertumbuhan pembangunan yang pesat. Pada kota-kota ini dibangun sejumlah gedung dengan berbagai bentuk denah yang unik dan tidak simetris, sehingga menjadi tantangan tersendiri bagi para ahli struktur dalam perencanaannya. Studi ini mengangkat masalah bentuk denah tersebut khususnya perilaku respon gedung akibat getaran gempa. Struktur yang ditinjau adalah struktur baja gedung 4 lantai berdenah beraturan yang dianalogikan sebagai struktur baja gedung tidak beraturan berbentuk L, T dan U. Analogi yang dimaksud didasarkan kepada pergeseran letak pusat massa. Struktur letak pusat massa. Struktur gedung ini diasumsikan terletak di tanah sedang di Kota Padang. Dari hasil studi ini diperoleh bahwa simpangan atap (global) pada setiap gedung tidak berbeda secara signifikan pada kondisi nonlinear. Perbedaan yang signifikan hanya terjadi pada torsi lantai kondisi nonlinear dimana respon gedung berdenah T yang paling dominan dibanding respon gedung yang lain.

Kata kunci: Struktur baja, pusat massa, torsi, gedung tidak beraturan.

***Abstract.** Indonesia is located in the seismic prone region with many cities have showing the rapid development. The cities have built the buildings with various unique plan-shape and unsymmetrically as well, which is challenging the structural engineer its design and construction phase. The plan-shape issue is highlighted in this study, especially the structural response due to seismic ground motion. The building structure model used in this study is 4-story regular plan-shape steel building which is idealized as the irregular building with L, T, and U shapes. The steel building structure is assumed to be located at medium soil in Padang City. The results indicate no significant difference in the top displacement of each building model for nonlinear condition. The gap shows only in the floor rotation of the building in nonlinear condition which is dominantly performed by the T-shape building compared to the others.*

***Keywords:** Steel structure, center of mass, torsion, irregular building.*

1. PENDAHULUAN

Untuk mengurangi resiko gempa bumi, perilaku struktur harus diketahui terlebih dahulu. Analisa ini dimaksud untuk mengetahui perilaku struktur terhadap gempa bumi bila pada struktur tersebut mempunyai eksentrisitas terhadap pusat massa dan pusat rotasi. Eksentrisitas ini terjadi

karena putaran rotasi dan pusat massa pada gedung tidak berimpit. Dengan adanya hal ini mengakibatkan gedung akan mengalami momen torsi yang mengakibatkan gedung mengalami puntir.

Pusat massa adalah letak titik tangkap resultante beban mati dan beban hidup yang sesuai yang bekerja pada lantai tingkat tersebut. Sedangkan pusat rotasi (pusat kekakuan) adalah titik dimana pada suatu lantai bangunan, apabila bekerja gaya horizontal pada titik tersebut, lantai tingkat tersebut tidak mengalami rotasi tapi hanya bertranslasi (BSN, 2002).

Letak pusat massa dan pusat kekakuan, tidak selalu terletak pada tempat yang sama. Sebagai contoh adalah pada perencanaan gedung perkantoran yang terdiri dari beberapa lantai. Pada gedung perkantoran kadang kala ada beberapa bagian luas bangunan yang direncanakan sebagai ruang pertemuan (aula), dimana ruang tersebut memiliki beban hidup rencana yang lebih besar dibandingkan dengan ruang-ruang kantor. Hal ini tentu saja mengakibatkan letak pusat massa dan pusat rotasi lantai tingkat tidak berimpit, sehingga menimbulkan eksentrisitas (Paulay, 1998).

Dengan mengubah letak pusat massa gedung pada struktur gedung dengan bentuk beraturan, maka akan di dapatkan pusat massa dan pusat kekakuan yang sama dengan struktur gedung dengan bentuk tidak beraturan horizontal. Dengan kata lain, struktur gedung dengan bentuk beraturan ini dapat dianalogikan sebagai struktur gedung dengan bentuk tidak beraturan dengan syarat letak pusat massa dan pusat kekakuannya sama. Sehingga kita dapat mengevaluasi kinerja struktur gedung dengan bentuk beraturan yang akan dianalogikan sebagai struktur gedung tidak beraturan horizontal terhadap beban gempa. Untuk itu studi ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja struktur baja gedung yang tidak beraturan secara horizontal bila mengalami getaran gempa

2. TINJAUAN PUSTAKA

Perancangan struktur merupakan unsur yang penting pada pembangunan suatu gedung agar dapat menghasilkan gedung yang kuat, aman dan ekonomis. Studi pustaka sebagai acuan dalam perencanaan struktur mengenai teori dasar yang digunakan sebagai standar yang ril untuk menetapkan tata cara perhitungan yang benar dan sesuai dengan aturan yang berlaku. Tinjauan pustaka meliputi landasan teori, tata cara perencanaan struktur, serta batasan deformasi pada komponen struktur.

2.1 Eksentrisitas dan Torsi

Salah satu faktor yang harus diperhatikan dalam perencanaan bangunan tahan gempa adalah timbulnya momen torsi pada elemen bangunan. Timbulnya momen torsi tersebut disebabkan adanya eksentrisitas antara pusat massa bangunan dengan pusat rotasi bangunan. Pusat massa adalah letak titik tangkap resultan beban mati dan beban hidup yang sesuai yang bekerja pada lantai tingkat tersebut. Sedangkan pusat rotasi (pusat kekakuan) adalah titik dimana pada suatu lantai bangunan, apabila bekerja gaya horizontal pada titik tersebut, lantai tingkat tersebut tidak mengalami rotasi tapi hanya bertranslasi (BSN, 2002).

Eksentrisitas terjadi karena pusat rotasi dan pusat massa pada gedung tidak berimpit, dengan adanya hal ini mengakibatkan gedung akan mengalami momen torsi yang mengakibatkan gedung mengalami puntir, contohnya pada struktur yang tidak beraturan (Faisal, 2015).

Torsi merupakan puntiran yang terjadi pada penampang tegak lurus terhadap sumbu utama dari elemen. Beban lateral dapat mengakibatkan torsi pada bangunan ketika beban lateral tersebut cenderung memutar bangunan tersebut dengan arah vertical [1]. Hal ini terjadi ketika pusat beban tidak tepat dengan pusat kekakuan elemen vertikal beban lateral – sistem ketahanan struktur tersebut. Eksentrisitas diantara pusat kekakuan dan massa bangunan dapat menyebabkan gerakan torsi selama terjadinya gempa. Torsi ini dapat meningkatkan displacement pada titik ekstrim bangunan dan menimbulkan masalah pada elemen penahan lateral yang berlokasi pada tepi gedung (Paulay, 1998). Berdasarkan BSN (2012), terdapat parameter pembesaran momen torsi tak terduga (A_x). Struktur yang dirancang untuk kategori desain seismik C, D, E dan F, dimana tipe 1a atau 1b ketidakberaturan torsi terjadi harus mempunyai pengaruh yang diperhitungkan dengan mengalikan M_{ta} di masing-masing tingkat dengan faktor pembesaran (A_x) seperti yang diperlihatkan pada Gambar 1.

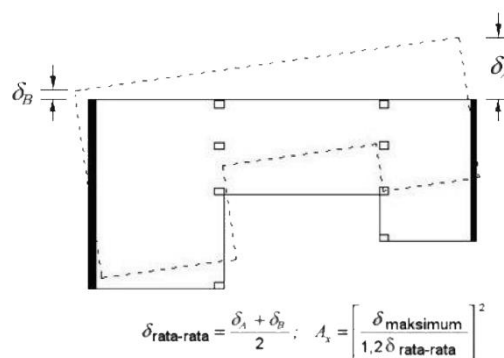
Gambar 1: Faktor pembesaran torsi (A_x) (BSN, 2012).

2.2 Analisa Dinamika Inkremental

Incremental dynamic analysis (IDA) atau dalam bahasa Indonesia disebut analisa dinamis meningkat bertahap adalah metode analisis komputasi teknik gempa untuk melakukan penilaian menyeluruh terhadap perilaku struktur di bawah beban gempa. Metode ini dikembangkan Vamvatsikos dan Cornell (2002) untuk membangun hasil analisis bahaya seismik probabilistik untuk memperkirakan risiko seismik yang dihadapi oleh struktur.

IDA melibatkan beberapa analisis respon riwayat waktu nonlinear terhadap model struktural di bawah rangkaian catatan gerak tanah, masing-masing diukur pada beberapa tingkat intensitas seismic [2]. Tingkat penskalaan dipilih untuk memaksa struktur melewati keseluruhan rentang perilaku, dari elastis hingga inelastis dan akhirnya sampai ke kondisi ketidakstabilan dinamis global, dimana struktur mengalami keruntuhan. Hasil *postprocessing* yang tepat dapat menyajikan hasilnya dalam bentuk kurva IDA, satu untuk setiap catatan gerak tanah. Kurva IDA biasanya ditunjukkan oleh Skalar *Intensity Measure* (IM), dengan bandingan respon struktural.

Pilihan yang mungkin untuk IM adalah jumlah skalar (atau jarang vektor) yang berhubungan dengan tingkat keparahan gerak tanah yang direkam dan skala secara linier atau nonlinear dengan amplitudonya. IM dipilih dengan benar sehingga peta bahaya yang tepat (kurva bahaya) dapat diproduksi untuk mereka dengan analisis bahaya seismik probabilistik. Selain itu, IM harus berkorelasi



$$\delta_{\text{rata-rata}} = \frac{\delta_A + \delta_B}{2}; A_x = \left[\frac{\delta_{\text{maksimum}}}{1,2 \delta_{\text{rata-rata}}} \right]^2$$

dengan respon struktural yang diminati untuk mengurangi jumlah analisis riwayat respon yang dibutuhkan. Kemungkinan pilihan adalah percepatan puncak, kecepatan puncak, namun yang paling banyak digunakan adalah percepatan spektral 5% pada periode mode pertama struktur seperti yang dipakai pada studi ini.

Parameter permintaan teknik dapat berupa kuantitas respons struktural yang berhubungan dengan kerusakan structural atau non-structural. Pilihan tipikal adalah simpangan antar tingkat maksimum, puncak puncak individu dan percepatan lantai puncak.

2.3 Material Nonlinear Untuk IDA

Analisis dinamik struktur nonlinear ini menggunakan Metode Respon Riwayat Waktu dan dianalisis secara dua dimensi. Program yang digunakan sebagai alat bantu analisa adalah Ruaumoko (Carr, 2007). Pemodelan struktur dibuat dengan menggunakan Model Sendi Plastis Terkonsentrasi (*lumped plasticity* [3]). Model ini menggunakan line+spring element sebagai model pengganti (constitutive model) dalam bentuk gaya deformasi yang diintegrasikan ke ujung-ujung (namun ada juga di tengah) elemen. Pemodelan ini digunakan agar analisis dapat dilakukan dengan lebih mudah dan cepat.

2.3.1 Momen Leleh (My)

Berdasarkan Metode FEMA (Zareian dan Krawinkler, 2007), momen leleh yang digunakan sebagai *input* analisis nonlinear pada program Ruaumoko adalah momen maksimum pada analisis linear respon riwayat waktu menggunakan Program Analisis Struktur. Nilai $M_o/M_y = 1,18$ untuk semua jenis gempa yang dihitung berdasarkan Persamaan 1. Nilai tersebut sebelumnya telah dikontrol dan dikoreksi menggunakan konsep *strong coloumn weak beam*.

$$\frac{M}{M_p} = \left(1 - \frac{p}{py}\right) \quad (1)$$

2.3.2 Kapasitas Rotasi

Kapasitas rotasi dihitung berdasarkan metode yang diusulkan oleh Zareian dan Krawinkler (2007):

- Kapasitas rotasi plastis (θ_p)

Dalam studi ini nilai θ_p yang digunakan adalah 10,12 berdasarkan perhitungan dari Persamaan 2 berikut ini.

$$\theta_p = 5,63 \left(\frac{h}{tw}\right)^{-0,565} \left(\frac{bf}{2tf}\right)^{-0,8} \left(\frac{c^1_{unit} d}{533}\right)^{-0,28} \left(\frac{c^2_{unit} fy}{355}\right)^{-0,43} \quad (2)$$

- Rotasi pasca-puncak (θ_{pc})

Pada pemodelan nonlinear ini memilih $\theta_{pc} = 2,54$ yang dihitung berdasarkan Persamaan 2, sedangkan $M_o/M_y = 1,18$ yang dihitung berdasarkan Persamaan 3.

$$\theta_p = 7,5 \left(\frac{h}{tw}\right)^{-0,61} \left(\frac{bf}{2tf}\right)^{-0,71} \left(\frac{lb}{ry}\right)^{-0,11} \left(\frac{c^1_{unit} d}{533}\right)^{-0,161} \left(\frac{c^2_{unit} fy}{355}\right)^{-0,32} \quad (3)$$

2.3.3 Rotasi Leleh (θ_y)

Rotasi pada saat leleh digunakan untuk mendapatkan nilai daktalitas yang dibutuhkan sebagai *input* dalam *software* Ruaumoko. Nilai rotasi leleh tersebut dihitung berdasarkan Persamaan 4 (Zareian dan Krawinkler, 2007) dan dihitung untuk semua *frame* (balok-kolom) pada struktur gedung yang direncanakan.

$$\theta_y = \frac{M_y l}{6EI} \quad (4)$$

Dimana:

E = Modulus elastisitas

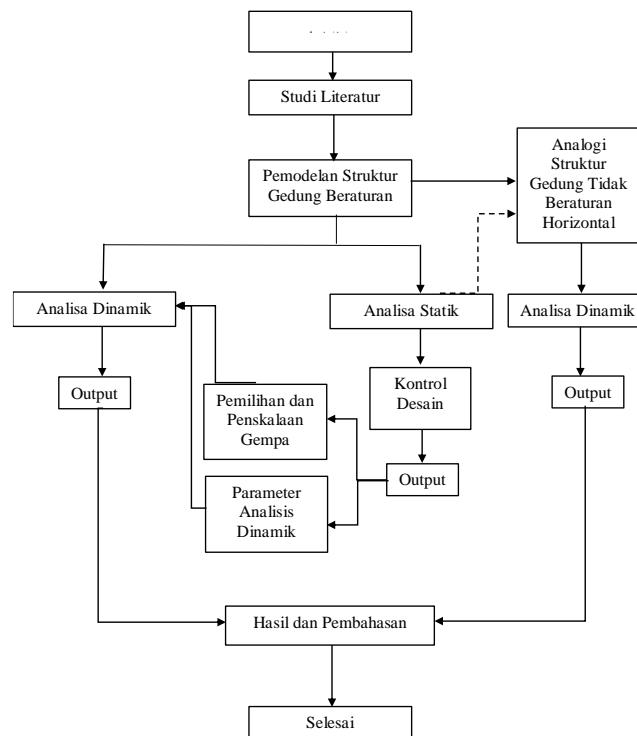
I = Momen Inersia kolom/balok

l = Panjang kolom/balok

3. METODE PENELITIAN

Secara umum, metode penelitian dalam Tugas Akhir ini dibuat dalam suatu diagram alir seperti yang tampak pada Gambar 2. Tugas akhir ini bertujuan untuk membandingkan pengaruh simpangan lantai terhadap variasi pusat massa yang dianalogikan sebagai struktur gedung tidak beraturan horizontal berbentuk L, T dan U yang dimana dari struktur tersebut mempunyai 4 lantai. Struktur gedung adalah portal baja yang dimodelkan sebagai *element frame* 3 dimensi dengan berpedoman pada standar BSN (2012).

Gambar 2: Bagan alir penelitian.

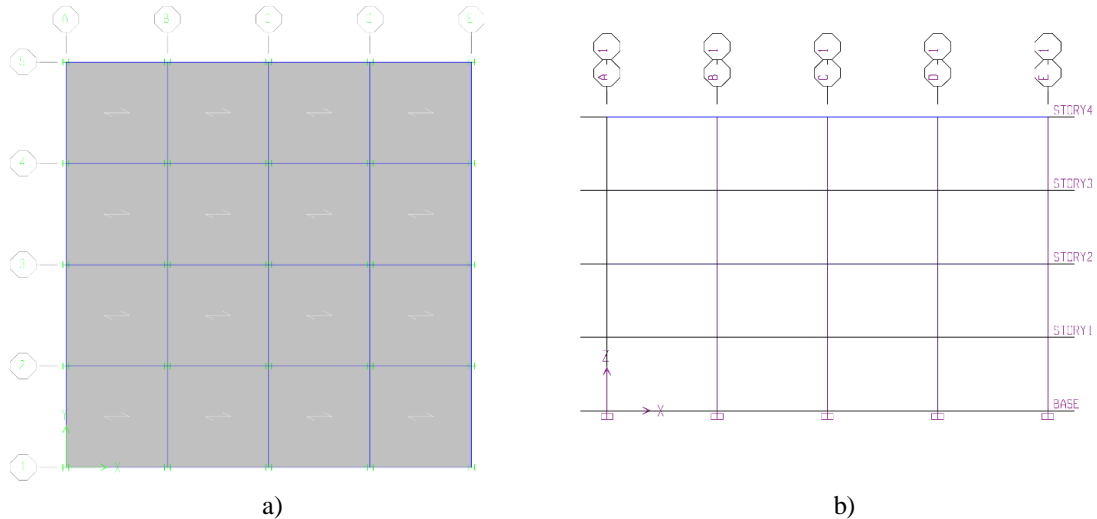


3.1 Data Perencanaan

Data perencanaan struktur dijabarkan sebagai berikut:

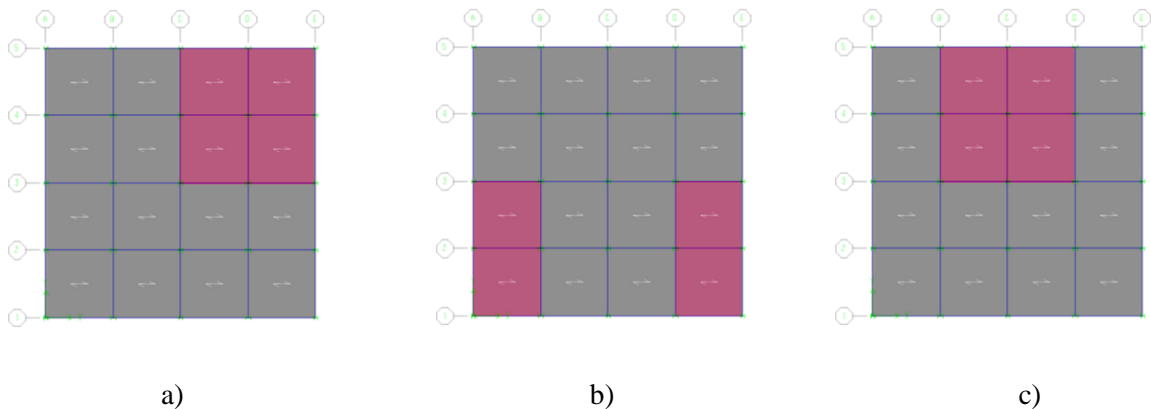
- Jenis portal struktur baja
- Fungsi gedung perkantoran
- Gedung terletak di Kota Padang
- Kelas situs tanah berdasarkan BSN (2012) ditetapkan sebagai kelas situs tanah sedang.
- Mutu baja yang digunakan adalah mutu baja BJ-37
- Mutu beton untuk plat lantai adalah beton $f_c' 30$
- Luas gedung sebesar 24 meter x 24 meter
- Tinggi antar lantai sebesar 4 meter

i. Properti penampang yang digunakan adalah profil WF 350 x 350



Gambar 3: a) Pemodelan struktur sumbu X-Y; b) Pemodelan struktur sumbu X-Z.

Analogi struktur gedung tidak beraturan horizontal berbentuk L, T dan U dapat dilihat pada Gambar 4 berdasarkan bentuk awal gedung beraturan. Warna merah pada Gambar 4 menjelaskan bagian dari gedung yang diabaikan sehingga Bergeraknya pusat massa.



Gambar 4: a) Analogi struktur Gedung tidak beraturan berbentuk L; b) Analogi struktur Gedung tidak beraturan berbentuk T; c) Analogi struktur Gedung tidak beraturan berbentuk U.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Analisis

Hasil analisis dibagi ke dalam dua bagian yaitu hasil analisa linear dan hasil analisa nonlinear. Hasil analisa linear ditujukan untuk memastikan pemodelan telah memenuhi kriteria atau kaedah perencanaan sesuai yang disyaratkan oleh peraturan SNI, seperti simpangan antar lantai yang terjadi, kekakuan antar tingkat dan ketidakberaturan torsi. Sedangkan analisa nonlinear ditujukan untuk melihat respon model dalam bentuk simpangan atap (global), torsi lantai, dan simpangan antar tingkat, akibat getaran gempa.

4.1.1. Simpangan Antar Lantai

Berdasarkan peraturan BSN (2012), kontrol simpangan antar lantai hanya terdapat satu kinerja batas, yaitu kinerja batas ultimit. Pada Tabel 4 dan 5, tertera hasil nilai simpangan linear gedung untuk pemodelan pada arah x dan arah y.

Tabel 4: Nilai simpangan antar lantai pada arah x.

Tingkat	h (m)	Total Drift		Simpangan Antar Tingkat		$(\delta_i \cdot C_d)/I_e$	
		X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)
4	16.000	0.013	0.000	0.002	1.67E-16	0.01045	9.185E-16
3	12.000	0.011	0.000	0.003	1.03E-15	0.0187	5.692E-15
2	8.000	0.007	0.000	0.004	0	0.0231	0
1	4	0.0032	0	0.0032	0	0.0176	0
Base	0	0	0	0	0	0	0

Tabel 5: Nilai simpangan antar lantai pada arah y.

Tingkat	h (m)	Total Drift		Simpangan Antar Tingkat		$(\delta_i \cdot C_d)/I_e$	
		X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)
4	16.000	0.000	0.016	0.000	0.0023	0	0.01265
3	12.000	0.000	0.014	0.000	0.0041	0	0.02255
2	8	0	0.01	0	0.0053	0	0.02915
1	4	0	0.0047	0	0.0047	0	0.02585
Base	0	0	0	0	0	0	0

4.2.1 Kekakuan Tingkat

Berdasarkan hasil analisa yang dilakukan melalui *software*, maka didapat nilai kekakuan antar tingkat pada arah x dan arah y. Dijelaskan pada BSN (2012), kekakuan tingkat lunak (*soft story*) didefinisikan ada jika terdapat suatu tingkat dimana kekakuan lateralnya kurang dari 70% kekakuan lateral tingkat di atasnya atau kurang dari 80% kekakuan rata-rata tiga tingkat di atasnya. Nilai kekakuan tingkat untuk pemodelan struktur akan dijabarkan pada Tabel 6 dan 7.

Tabel 6: Kekakuan tingkat arah x kekakuan tingkat.

story	Σk_{ix} (kN/m)	Σk_{iy} (kN/m)	$\% \Sigma k_{ix+1}$ (kN/m)	$\% \Sigma k_{iy+1}$ (kN/m)	$\% \Sigma k_{ix+3}$ (kN/m)	$\% \Sigma k_{iy+3}$ (kN/m)	$\% \Sigma k_{ix-1}$ (kN/m)	$\% \Sigma k_{iy-1}$ (kN/m)	$\% \Sigma k_{ix-3}$ (kN/m)	$\% \Sigma k_{iy-3}$ (kN/m)
1	216560,5	0	149,401	0	157,4361	0	-	-	-	-
2	144952,5	0	104,6553	0	105,3782	0	0,669339	0	86,96841	0
3	138504,8	0	107,1965	0	100,6908	0	0,955518	0	100,6908	0
4	129206,5	0	-	-	-	-	0,932867	0	96,52674	0

Tabel 7: Kekakuan tingkat arah y kekakuan tingkat.

story	Σk_{ix} (kN/m)	Σk_{iy} (kN/m)	$\% \Sigma k_{ix+1}$ (kN/m)	$\% \Sigma k_{iy+1}$ (kN/m)	$\% \Sigma k_{ix+3}$ (kN/m)	$\% \Sigma k_{iy+3}$ (kN/m)	$\% \Sigma k_{ix-1}$ (kN/m)	$\% \Sigma k_{iy-1}$ (kN/m)	$\% \Sigma k_{ix-3}$ (kN/m)	$\% \Sigma k_{iy-3}$ (kN/m)
1	0	84666,8	0	976,878	0	61,5514	-	-	-	-
2	0	86670,8	0	989,287	0	63,0083	0	1,02367	0	100,411
3	0	87609,4	0	783,805	0	63,6906	0	1,01083	0	91,8804
4	0	111774	-	-	-	-	0	1,27583	0	112,12

4.2.2 Pemeriksaan Ketidakberaturan Torsi

Di dalam BSN (2012), terdapat parameter pembesaran momen torsi tak terduga (A_x). Kontrol pemeriksaan ketidakberaturan torsi gempa untuk arah x dan y tertera pada Tabel 8 dan 9.

Tabel 8: Pemeriksaan ketidakberaturan torsi gempa arah x.

Lantai	Elevasi	dxmin	Dxmax	Δx min	Δx max	Ratio	Biasa	Berlebih
--------	---------	-------	-------	----------------	----------------	-------	-------	----------

	(m)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)		(1A)	(1B)
4	16	12,7	12,7	1,9	1,9	1	Tidak Ada	Tidak Ada
3	12	10,8	10,8	3,4	3,4	1	Tidak Ada	Tidak Ada
2	8	7,4	7,4	4,2	4,2	1	Tidak Ada	Tidak Ada
1	4	3,2	3,2	3,2	3,2	1	Tidak Ada	Tidak Ada

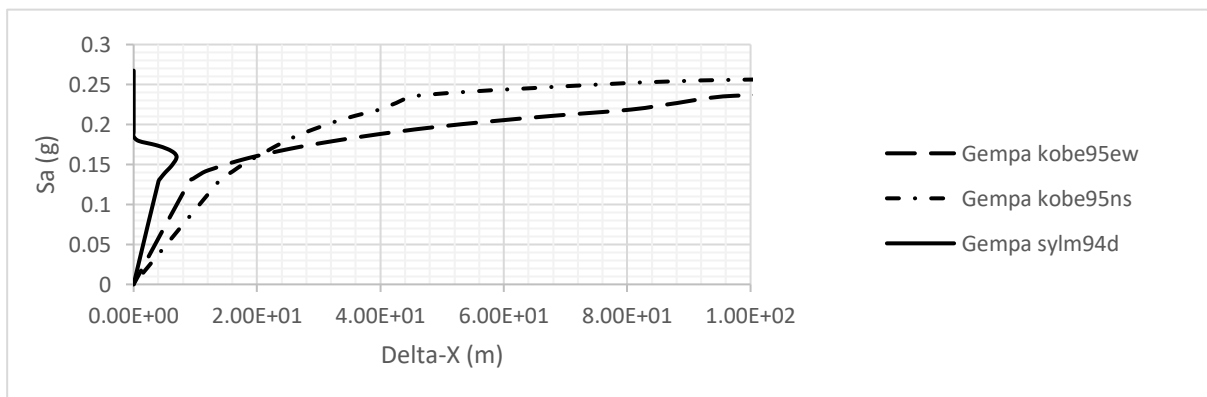
Tabel 9: Pemeriksaan ketidakberaturan torsi gempa arah y.

Lantai	Elevasi (m)	dxmin (mm)	Dxmax (mm)	Δx min (mm)	Δx max (mm)	Ratio	Biasa (1A)	Berlebih (1B)
4	16	16,4	16,4	2,3	2,3	1	Tidak Ada	Tidak Ada
3	12	14,1	14,1	4,1	4,1	1	Tidak Ada	Tidak Ada
2	8	10	10	5,3	5,3	1	Tidak Ada	Tidak Ada
1	4	4,7	4,7	4,7	4,7	1	Tidak Ada	Tidak Ada

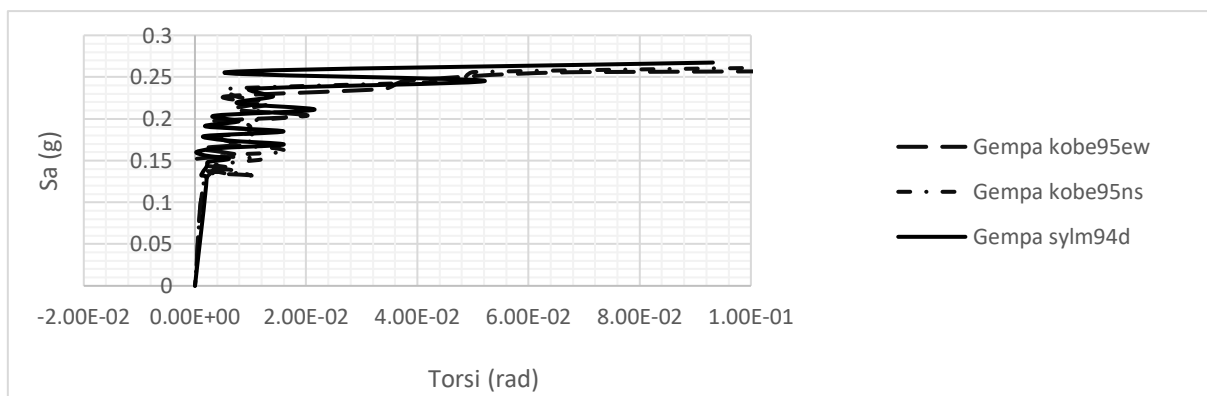
4.2 Hasil Analisis Nonlinear

4.3.1 Struktur Gedung Beraturan

Kinerja batas layan struktur gedung ditentukan oleh simpangan antar tingkat akibat pengaruh gempa rencana . Gambar 5 menjelaskan perbandingan grafik simpangan pada gedung beraturan.



Gambar 5: Grafik perbandingan nilai simpangan.



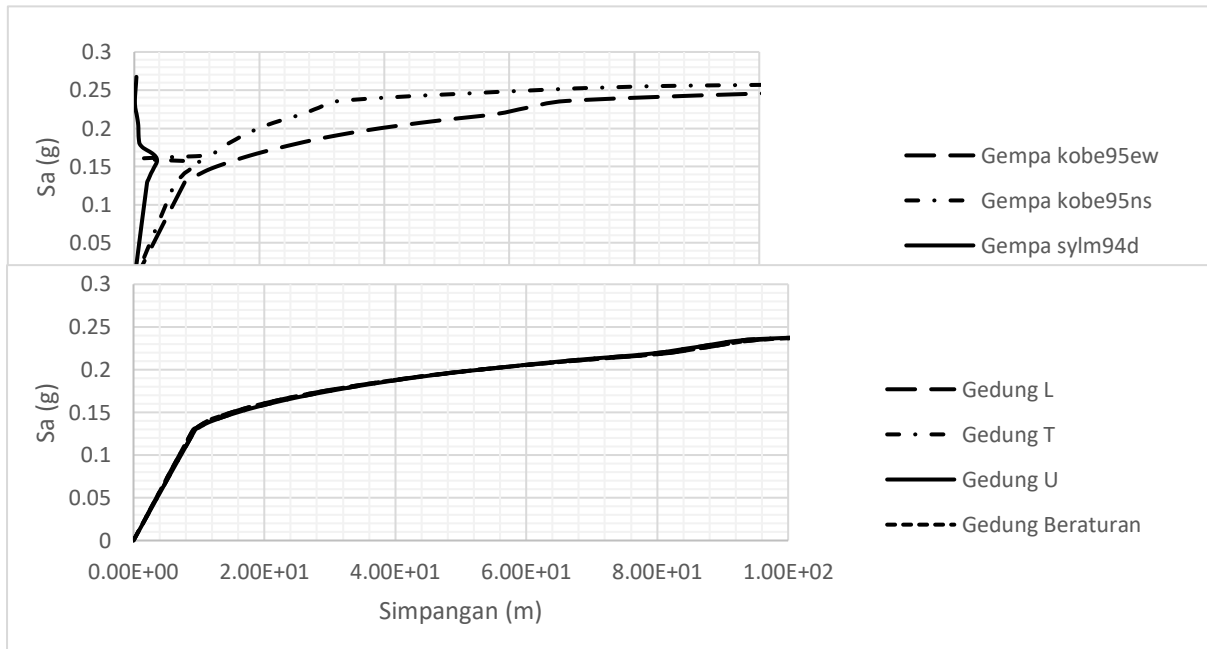
Gambar 6: Grafik perbandingan torsi.

Gambar 7: Grafik perbandingan *inter-storey drifts*.

Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa respon lebih besar terjadi saat diberikan beban gempa *kobe95ew*. Struktur yang dimodelkan mengalami sendi plastis lebih cepat bila mengalami gempa *kobe95ew* dibandingkan dengan variasi gempa lain.

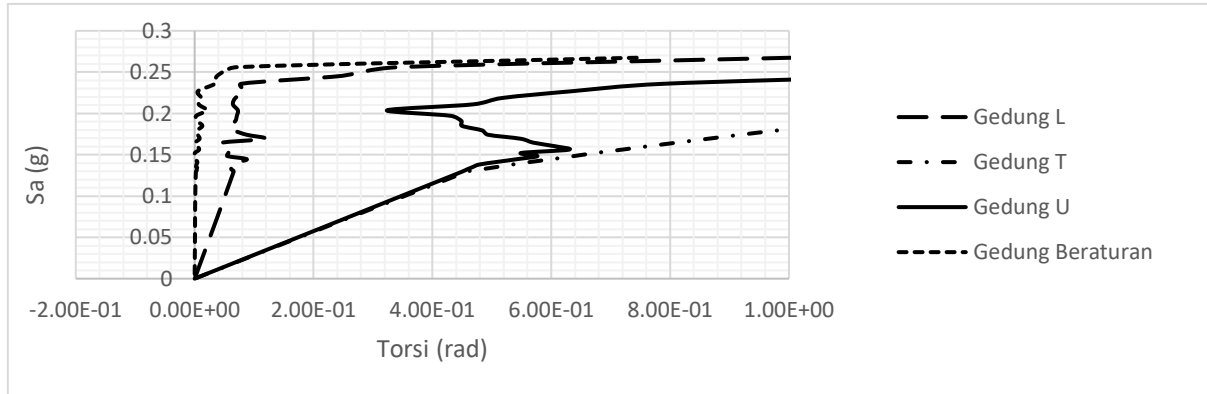
4.3.2 Struktur Gedung Tidak Beraturan

Untuk menghitung kinerja gedung tidak beraturan horizontal ini menggunakan variasi gempa *kobe95ew* karena variasi gempa ini memiliki nilai yang lebih besar diantara gempa yang lain[4]. Kemudian kinerja setiap bentuk gedung akan dibandingkan berdasarkan spektrum gempa. Pada Gambar 8 – 9 disajikan hasil analisa nonlinear untuk berbagai bentuk bangunan gedung. Gambar 8 menjelaskan simpangan nonlinear yang terjadi pada atap gedung (simpangan global) dimana hasil menunjukkan tren yang hampir tidak memiliki perbedaan sama sekali. Kasus ini bisa terjadi

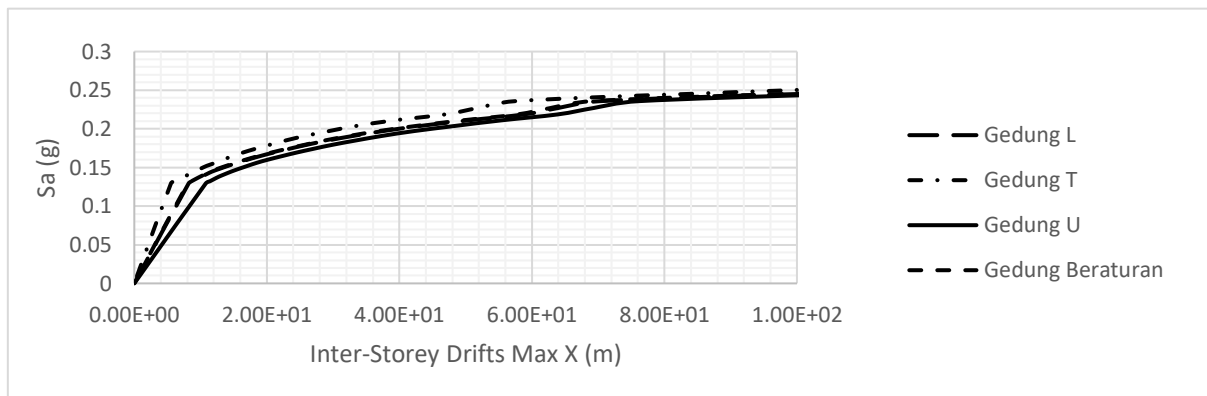


disebabkan karena kekakuan yang sama antara model gedung beraturan dengan model gedung tidak beraturan (dibedakan hanya pada letak pusat massa). Sedangkan Gambar 9 menjelaskan bagaimana perilaku lantai bangunan merespon getaran gempa dimana tampak dengan jelas bahwa lantai gedung berbentuk L, T dan U berdeformasi puntir secara signifikan. Pada Gambar 10 simpangan antar tingkat (*inter-storey drift*) menunjukkan perbedaan yang nyata namun tidak signifikan [5]. Pada kasus ini, gedung U yang paling besar memberikan respon terhadap getaran gempa.

Gambar 8: Grafik perbandingan nilai simpangan.



Gambar 9: Grafik perbandingan torsi.

Gambar 10: Grafik perbandingan *inter-storey drifts*.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan analisa dan pembahasan mengenai perbandingan kinerja struktur gedung tidak beraturan horizontal terhadap gempa, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut bahwa setiap struktur gedung tidak beraturan horizontal akan cenderung memiliki nilai simpangan atap (global) yang sama. Hal ini dikarenakan kekakuan tingkat yang identik sama untuk setiap jenis gedung. Ketidakberaturan horizontal gedung hanya disebabkan oleh letak pusat masa yang berbeda pada studi ini. Sehingga bisa disimpulkan bentuk ketidakberaturan yang disebabkan oleh letak pusat masa yang berbeda, dengan nilai kekakuan tingkat sama, tidak mempengaruhi simpangan bangunan tersebut. Perbedaan hanya tampak jelas pada nilai torsi pada lantai, terutama pada bangunan berbentuk T, bentuk yang paling dominan memberikan respon torsi nonlinear.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Hohenwarter, A. Taylor, R. Stock, and R. Pippan, "Effect of large shear deformations on the fracture behavior of a fully pearlitic steel," in *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 2011.
- [2] D. Vamvatsikos and M. Fragiadakis, "Incremental dynamic analysis for estimating seismic performance sensitivity and uncertainty," *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, 2010.
- [3] M. S. Matoso, R. B. Figueiredo, M. Kawasaki, D. B. Santos, and T. G. Langdon, "Processing a twinning-induced plasticity steel by high-pressure torsion," *Scr. Mater.*, 2012.
- [4] A. R. Özuygur, "Performance-based Seismic Design of an Irregular Tall Building - A Case

- Study,” *Structures*, 2016.
- [5] O. Lavan and M. de Stefano, “Seismic behaviour and design of irregular and complex civil structures,” *Geotech. Geol. Earthq. Eng.*, 2013.
- [6] Badan Standarisasi Nasional, *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung Dan Non Gedung SNI 1726-2012*. Jakarta: Badan Standar Nasional Indonesia, 2012.
- [7] Badan Standarisasi Nasional, *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung SNI 1726-2002*. Jakarta: Badan Standar Nasional Indonesia, 2002.
- [8] A. J. Carr, *RUAUMOKO 2D: Users Manual*. Christchurch, New Zealand.: University of Canterbury, 2007.
- [9] T. Paulay, “Torsional mechanisms in ductile building systems,” *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, vol. 10, no. 27, pp. 1101–1121, 1998.
- [10] A. Faisal, “Torsi Aktual pada SRPM Simetris,” in *Seminar Nasional HAKI Komda Sumut*, 2015.
- [11] C. A. Vamvatsikos, D., & Cornell, “Incremental dynamic analysis,” *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, vol. 3, no. 31, pp. 491–514, 2002.
- [12] H. Zareian, F., & Krawinkler, “Assessment of probability of collapse and design for collapse safety,” *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, vol. 13, no. 36, pp. 1901–1914, 2007.