

PENGARUH RASIO KEKAKUAN LATERAL STRUKTUR TERHADAP PERILAKU DINAMIS STRUKTUR RANGKA BETON BERTULANG BERTINGKAT RENDAH

Ketut Sudarsana¹, Made Ery Artha Yudha²

¹Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran, Badung-Bali Telp 62-361-703385

²Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran, Badung-Bali Telp 62-361-703385

Email: civil2001ca@yahoo.com; ksudarsana@civil.unud.ac.id

Abstrak

Perilaku struktur terhadap beban gempa sangat dipengaruhi oleh kekakuan lateral struktur tersebut. Kekakuan struktur ini merupakan gabungan dari kekakuan lateral elemen-elemen vertikal struktur secara keseluruhan. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh rasio kekakuan lateral struktur terhadap perilaku dinamis struktur rangka beton bertulang tingkat 3 (tiga) dimana kolom persegi panjang digunakan. Orientasi pemasangan kolom persegi panjang terhadap sumbu utama struktur akan sangat berpengaruh terhadap kekakuan struktur secara keseluruhan. Sebanyak Lima buah model struktur 3 tingkat dari gedung beraturan dianalisis secara 3 dimensi (3D) dengan software commercial SAP2000 v15. Adapun rasio antara kekakuan struktur arah sumbu X dengan arah sumbu Y (K_x/K_y) bervariasi dari 0.128, 0.32, 1.00, 3.13 dan 7.84 masing-masing untuk Model I, II, III, IV dan V. Denah struktur adalah tipikal memiliki 5 bentang arah sumbu X ($L_x = 4000$ mm) dan 3 bentang arah sumbu Y ($L_y = 4000$ mm) dengan tinggi tingkat 3500 mm. Semua model struktur memiliki properti yang sama termasuk massa tingkatnya kecuali orientasi sumbu kuat kolom yang berbeda dan telah didesain mengikuti persyaratan SNI 2847:2013 untuk sistem struktur daktail. Perilaku dinamis ditinjau berdasarkan analisis riwayat waktu (time step integration) sesuai dengan metode average acceleration dari Newmark dengan gempa masukan dari catatan gempa El-Centro 1940 yang telah disesuaikan. Hasil analisis menunjukkan bahwa peningkatan rasio K_x/K_y mengakibatkan penurunan nilai periode alami, simpangan dan gaya geser dasar dari struktur dalam arah sumbu X, namun mengalami peningkatan dalam arah sumbu Y. Struktur memiliki respon yang paling stabil adalah struktur dengan rasio $K_x/K_y = 1.00$. Hal ini sangat penting dalam menentukan orientasi kolom dalam suatu denah untuk menghindari resiko struktur lemah pada satu sisi.

Kata kunci: Perilaku dinamis, kekakuan struktur, analisis riwayat waktu, beton bertulang

Pendahuluan

Kolom merupakan elemen struktur vertikal yang berperan sebagai penyalur beban dari elemen-elemen struktur lainnya seperti balok dan pelat, sehingga integritas struktur secara keseluruhan dapat dipertahankan. Oleh karena itu, kekakuan kolom sangat menentukan perilaku struktur secara keseluruhan dalam memikul beban-beban horizontal seperti beban gempa dan angin.

Di daerah dengan resiko gempa tinggi seperti Bali, struktur harus didesain mengikuti ketentuan struktur tahan gempa dimana struktur tidak boleh runtuh akibat gempa kuat (gempa rencana) dan memiliki kemampuan untuk mendistribusikan beban gempa yang baik. Untuk menjamin hal ini maka struktur didesain dengan menerapkan konsep desain kapasitas yaitu suatu konsep desain dengan menentukan elemen-elemen struktur yang mengalami leleh sedangkan elemen lainnya masih dalam kondisi elastis. Dalam SNI 2847:2013, konsep ini diuraikan dalam persyaratan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK).

Pada SRPMK, SNI 2847:2013 pasal 21.6.1 mensyaratkan dimensi kolom ditentukan dengan rasio sisi penampang terpendek dan terpanjang adalah minimal 0,4 dengan lebar minimum 300 mm. Namun di lapangan sering dijumpai penggunaan kolom dengan penampang pipih dengan rasio sisi penampang yang lebih kecil dari 0,4 terutama untuk bangunan bertingkat rendah (2-3 tingkat). Hal ini karena pertimbangan untuk mendapatkan ruangan yang bebas tonjolan karena ketebalan kolom umumnya lebih besar daripada tebal dinding. Kolom dengan penampang pipih memiliki kekakuan pada arah sumbu-sumbu utamanya berbeda sehingga sangat berpengaruh terhadap kekakuan struktur secara keseluruhan. Kekakuan global struktur kolom ditentukan oleh orientasi sumbu

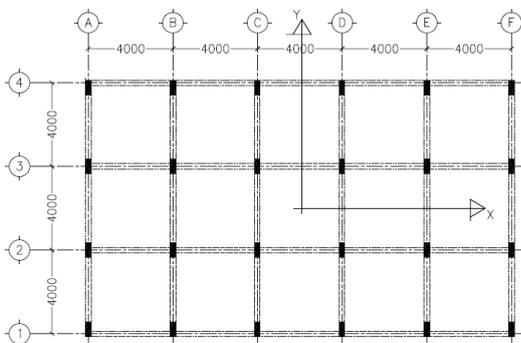
kuat dari kolom-kolom dalam setiap lantai. Kondisi ini akan menghasilkan rasio kekakuan struktur dalam arah sumbu Y akan berbeda-beda. Perilaku dinamis struktur dengan rasio kekakuan yang berbeda dalam memikul beban gempa perlu ditinjau. Adapun perilaku dinamis yang ditinjau dalam tulisan ini terbatas pada waktu getar alami, gaya geser dasar, simpangan dan simpangan antar tingkat serta faktor daktilitas struktur.

Manfaat penelitian

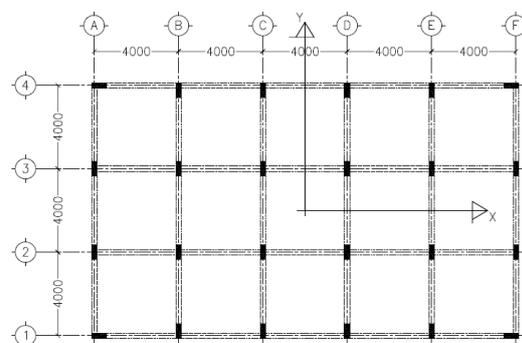
Penggunaan kolom berpenampang pipih sering dijadikan pilihan dalam suatu bangunan karena pertimbangan estetika walaupun bangunan tersebut berada di wilayah dengan resiko gempa kuat. Penelitian ini diharapkan dapat menunjukkan bagaimana perilaku struktur dengan kolom berpenampang pipih dengan arah kolom yang bervariasi sehingga didapat perilaku struktur yang stabil terhadap pengaruh beban horizontal seperti gempa. Hasil dari penelitian ini juga diharapkan menjadi salah satu referensi dalam melakukan perencanaan struktur beton bertulang tingkat rendah menggunakan kolom penampang pipih.

Data Struktur Yang Ditinjau

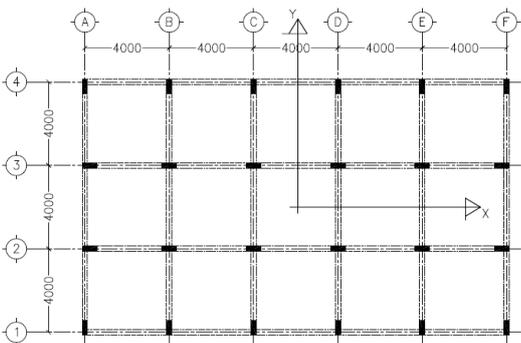
Struktur gedung yang ditinjau berfungsi sebagai hotel dan merupakan struktur gedung beraturan dengan empat tingkat. Denah struktur adalah 20mx12m yang terdiri atas 5 bentang arah sumbu X ($L_x = 4000$ mm) dan 3 bentang arah sumbu Y ($L_y = 4000$ mm) dengan tinggi tingkat 3500 mm. Lima tipe konfigurasi pemasangan kolom penampang pipih yang ditinjau dalam studi ini untuk mendapatkan rasio kekakuan kolom arah sumbu X dan Y (K_x/K_y) sebesar 0.128, 0.32, 1.00, 3.13 dan 7.84 seperti terlihat masing-masing pada Gambar 1,2,3,4 dan 5.



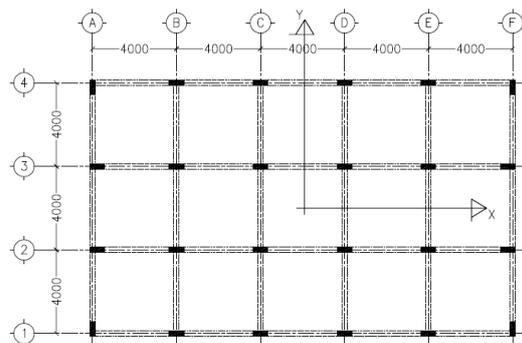
Gambar 1. Plan Model I dengan $K_x = 11.3\%$, $K_y = 88.7\%$ dari kekakuan struktur



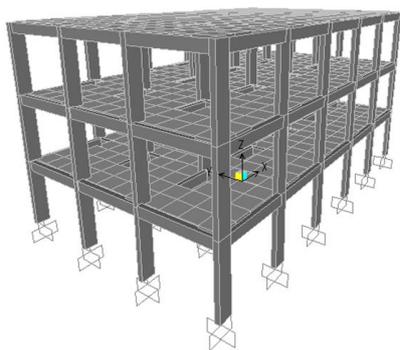
Gambar 2. Plan Model II dengan $K_x = 24.2\%$, $K_y = 75.8\%$ dari kekakuan struktur



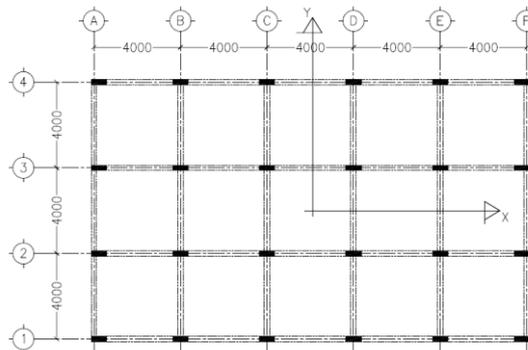
Gambar 3. Plan Model III dengan $K_x = 50\%$, $K_y = 50\%$ dari kekakuan struktur



Gambar 4. Plan Model IV dengan $K_x = 75.8\%$, $K_y = 24.2\%$ dari kekakuan struktur



Gambar 6. Tampak 3D dari plan Model V dengan $K_x = 88.7\%$, $K_y = 11.3\%$ dari kekakuan struktur



Gambar 5. Plan Model V dengan $K_x = 88.7\%$, $K_y = 11.3\%$ dari kekakuan struktur

Gedung dianggap terletak di Bali dengan Kategori Desain Seismik (KDS) D menurut SNI 1726:2012. Jenis tanah pada lokasi bangunan tergolong tanah keras. Adapun kuat tekan beton (f'_c) = 25 Mpa dan kuat leleh baja tulangan (f_y) = 400 Mpa. Kelima model struktur yang ditinjau kemudian didesign untuk memikul beban-beban seperti pada Tabel 1, sehingga dimensi yang diperoleh akan memenuhi semua model struktur. Dimensi dan tulangan dari elemen-elemen struktur semua model adalah sama seperti terlihat pada Tabel 2.

Tabel 1. Beban-beban pada struktur yang ditinjau

Jenis beban	Lokasi Bekerjanya Beban	Model I	Model II	Model III	Model IV	Model V
Beban Mati	Atap (kN/m^2)	3.09	3.09	3.09	3.09	3.09
	Lantai 1-2 (kN/m^2)	3.33	3.33	3.33	3.33	3.33
Beban Hidup	Atap (kN/m^2)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	Lantai 1-2 (kN/m^2)	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
Beban Gempa Rencana (V) sebesar 751 kN	Pusat Massa Atap (kN)	288.4	288.4	288.4	288.4	288.4
	Pusat Massa Lantai 1(kN)	308.4	308.4	308.4	308.4	308.4
	Pusat Massa Lantai 2 (kN)	154.2	154.2	154.2	154.2	154.2

Tabel 2. Dimensi dan tulangan dari elemen struktur.

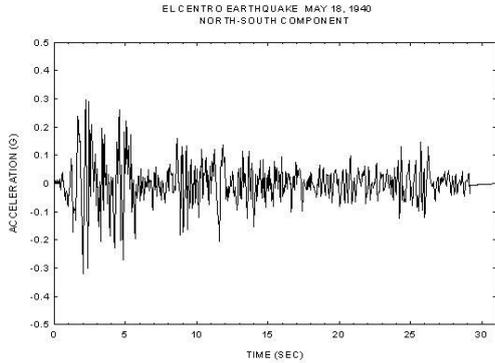
Tingkat	Komponen Struktur	Dimensi (mm)	Tulangan longitudinal		Tul. Tranversal	
			Tumpuan	Lapangan	Tumpuan	Lapangan
I	Pelat	120	D10-125	D10-125	-	-
	Balok	250 x 500	5D16(T); 3D16(B)	3D16(T); 5D16(B)		
	Kolom	250 x 700	14D19		D10-75	D10-100
II	Pelat	120	D10-125	D10-125		
	Balok	250 x 500	4D16(T); 3D16(B)	3D16(T); 4D16(B)		
	Kolom	250 x 700	10D19		D10-75	
III	Pelat	120	D10-125	D10-125		
	Balok	250 x 500	4D16(T); 3D16(B)	3D16(T); 4D16(B)		
	Kolom	250 x 700	10D16		D10-100	

Catatan:
(T) = sisi atas balok; (B) = sisi bawah balok

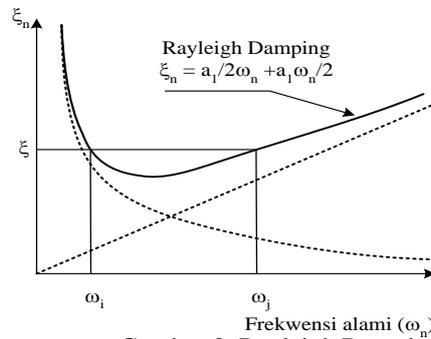
Pemodelan dan Metode Analisis

Perilaku dinamis struktur diperoleh berdasarkan analisis dinamis riwayat waktu terhadap model struktur 3D dari semua denah yang ditinjau dengan bantuan software commercial SAP 2000 v15. Metode *average acceleration* dari Newmark dengan nilai $\gamma = 1/2$ dan $\beta = 1/6$ digunakan untuk mendapatkan respon yang *unconditionally stable*. Kelima model dibuat memiliki properti yang sama termasuk massa tingkat kecuali orientasi sumbu kuat dari kolom-kolomnya yang bervariasi. Gempa masukan yang diperhitungkan adalah gempa riwayat waktu El Centro 1940 N-S seperti terlihat pada Gambar 7 yang telah diskalakan untuk wilayah Bali. Semua struktur diasumsikan memiliki redaman Rayleigh seperti terlihat pada Gambar 8 dengan rasio redaman untuk semua mode diambil tetap yaitu sebesar $\xi = 5\%$.

Disamping analisis riwayat waktu, dalam penelitian ini juga dilakukan analisis nonlinear static pushover untuk memperoleh factor daktilitas tiap model struktur. Perilaku sendi plastis pada masing-masing komponen struktur mengacu pada FEMA 356 dan terintegrasi secara default di dalam software.



Gambar 7. Catatan gempa El Centro 1940 N-S



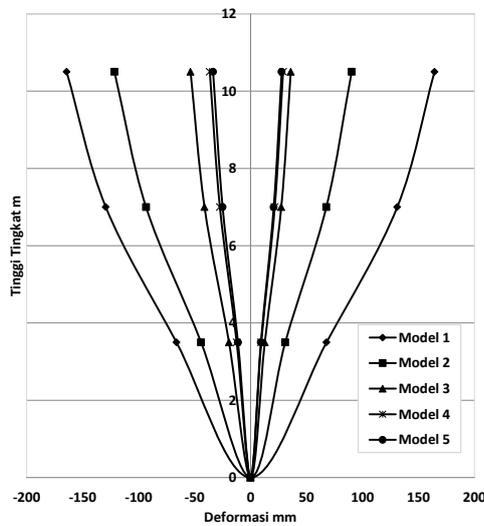
Gambar 8. Rayleigh Damping

Hasil Analisis dan Pembahasan

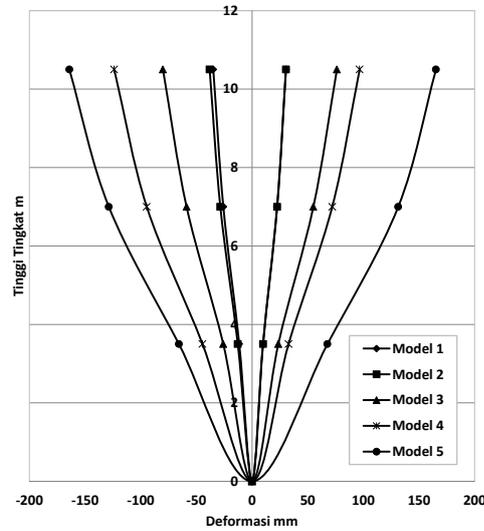
Hasil analisis yang ditampilkan dalam tulisan ini merupakan ringkasan dari hasil analisis yang telah dilakukan, baik analisis riwayat waktu maupun analisis nonlinear static pushover. Adapun pembahasan yang diuraikan terbatas pada simpangan, waktu getar alami, gaya geser dasar dan factor daktilitasnya.

Simpangan Tingkat dan Drift Rasio

Simpangan struktur pada join A1 (atap) diperoleh dari analisis riwayat waktu (THA) ditampilkan pada Gambar 9 dan 10 masing-masing untuk arah X (gempa THAx) dan arah Y (gempa THAy). Simpangan horizontal pada masing-masing tingkat untuk semua model adalah serupa, namun dengan meningkatnya kekakuan ke suatu arah, simpangannya mengalami penurunan.



Gambar 9. Deformasi arah X tiap tingkat pada Join A1 akibat THAx



Gambar 10. Deformasi Arah Y tiap tingkat pada Join A1 akibat THAy

Drift rasio pada masing-masing model adalah drift rasio total pada lantai teratas (atap) yang dihitung berdasarkan simpangan pada Gambar 9 untuk Arah X dan Gambar 10 untuk Arah Y. Tabel 3 dan 4 menunjukkan bahwa drift rasio yang terjadi masih lebih kecil dari drift maksimum yang disyaratkan dalam SNI 1726:2002 yaitu sebesar 0.02 sehingga semua model masih memenuhi persyaratan.

Tabel 3. Drift ratio akibat beban gempa Arah X

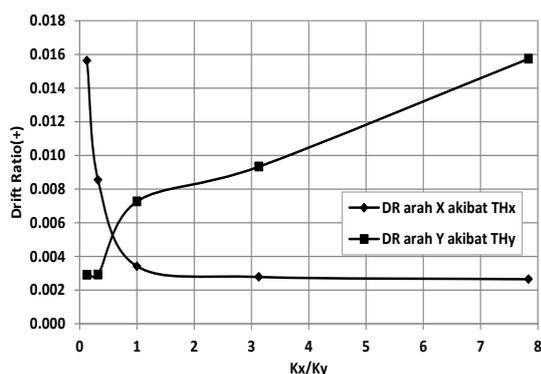
Model	Simpangan (mm)		Tinggi Gedung (mm)	Drift Ratio	
	Positif (+)	Negatif (-)		Positif (+)	Negatif (-)
I	164.17	164.13	10500	0.0156	0.0156
II	89.82	120.90	10500	0.0086	0.0115

III	35.90	53.50	10500	0.0034	0.0051
IV	29.20	36.50	10500	0.0028	0.0035
V	27.80	33.40	10500	0.0026	0.0032

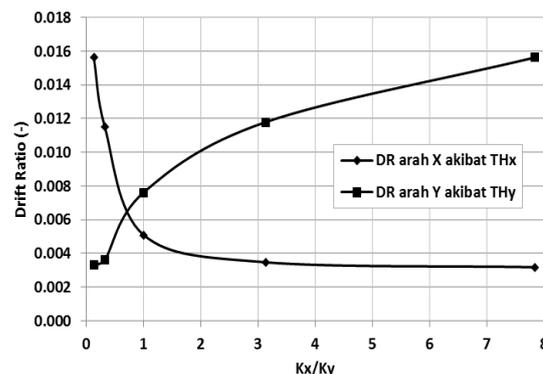
Tabel 4. *Drift ratio* akibat beban gempa Arah Y.

Model	Simpangan (mm)		TinggiGedung (mm)	<i>Drift Ratio</i>	
	Positif (+)	Negatif (-)		Positif (+)	Negatif (-)
I	30.58	34.80	10500	0.0029	0.0033
II	30.61	38.00	10500	0.0029	0.0036
III	76.30	80.00	10500	0.0073	0.0076
IV	98.00	123.80	10500	0.0093	0.0118
V	165.30	164.10	10500	0.0157	0.0156

Hubungan antara rasio kekakuan K_x/K_y dengan drift maksimum dapat dilihat pada Gambar 11 dan 12. Nilai drift rasio Arah X akan semakin menurun dengan semakin meningkatnya nilai rasio K_x/K_y , Sedangkan drift rasio Arah Y akan semakin besar nilainya dengan meningkatnya nilai rasio K_x/K_y . Pada rasio K_x/K_y sama dengan satu, nilai Drift rasio Arah X dan Arah Y tidak sama disebabkan ada pengaruh bentuk denah yang persegi panjang. Disini juga terlihat bahwa Model 3 merupakan model struktur dengan drift rasio yang seimbang. Hal ini sangat jelas karena kekakuan Arah X dan Y adalah sama.



Gambar 11. Hubungan rasio kekakuan dengan *drift ratio* akibat gempa positif

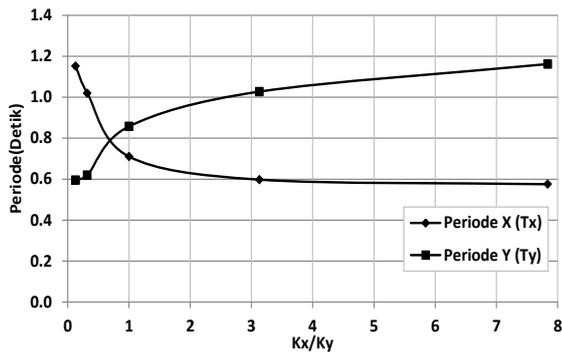


Gambar 12. Hubungan rasio kekakuan dengan *drift ratio* akibat gempa negative

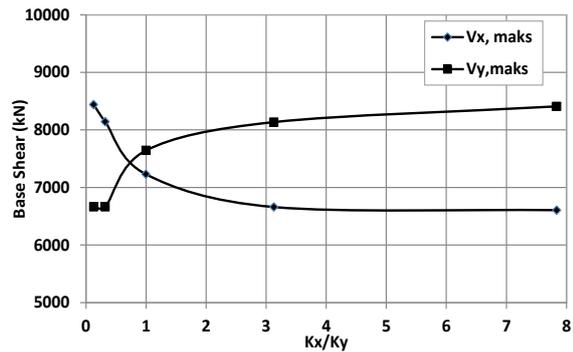
Waktu Getar Alami Struktur dan Gaya Geser Dasar

Waktu getar alami dalam arah yang ditinjau, merupakan periode getar struktur pada arah tersebut terhadap gempa kearah yang sama. Periode ini merupakan periode getar yang tertinggi dimana struktur mengalami translasi. Semakin besar nilai rasio K_x/K_y , waktu getar alami struktur kearah sumbu X semakin menurun karena struktur kearah tersebut semakin kaku. Begitu juga sebaliknya untuk waktu getar alami kearah Y akibat gempa THAy.

Dari Gambar 13 terlihat bahwa titik seimbang dimana periode getar arah X dan periode getar arah Y bertemu pada rasio perbandingan K_x dan K_y kurang dari 1. Model struktur yang paling stabil adalah model struktur dengan rasio K_x/K_y mendekati satu. Sedangkan semakin besar rasio K_x/K_y , makin besar selisih nilai kedua periode tersebut. Gambar 13 juga menunjukkan bahwa meskipun kekakuan kearah sumbu X dan Y sama seperti pada Model 3, namun waktu getar alaminya tidak sama, hal ini mungkin dikarenakan oleh denah struktur struktur yang tidak simetris.



Gambar 13. Hubungan antara Rasio kekakuan Kx/Ky dan periode alami struktur



Gambar 14. Hubungan antara Rasio kekakuan Kx/Ky dan gaya geser dasar

Hubungan gaya geser dasar (V) dengan rasio kekakuan Kx/Ky memiliki kecenderungan yang sama dengan waktu getar alami struktur seperti terlihat pada Gambar 14. Dengan meningkatnya kekakuan struktur ke suatu arah, maka gaya geser juga mengalami penurunan begitu juga sebaliknya. Perubahan gaya geser dasar struktur sangat significant terlihat dari rasio Kx/Ky 0.128 sampai dengan 3.13.

Dari Gambar 14 terlihat bahwa model struktur dengan rasio Kx/Ky = 1.0 memiliki selisih terkecil antara gaya geser Arah X dan gaya geser Arah Y. Untuk mendapatkan gaya geser dasar lebih seimbang baik ke arah X dan ke arah Y maka perbandingan kekakuan struktur pada kedua arah tersebut adalah yang mendekati 1 atau paling tepat pada persilangan titik pertemuan garis grafik di atas.

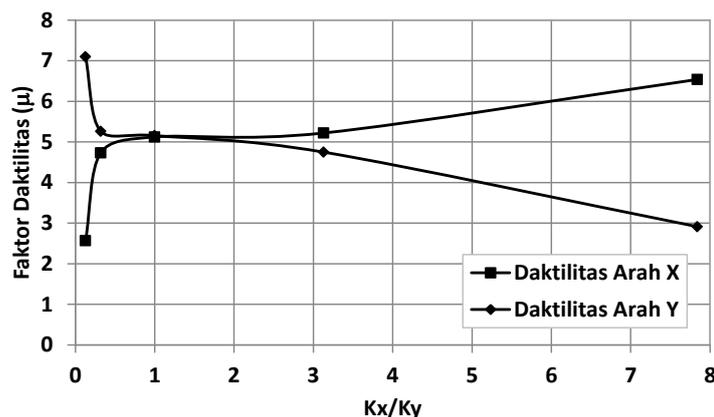
Daktilitas Struktur

Faktor daktilitas dari semua model diperoleh dari hasil analisis static nonlinear pushover menggunakan SAP 2000 v.15. Simpangan struktur pada saat kondisi terjadi leleh pertama dan kondisi ultimit dapat dilihat pada Tabel 5. Faktor daktilitas dihitung berdasarkan rasio antara simpangan struktur pada kondisi ultimit dan leleh. Faktor daktilitas struktur berkisar antara 2.56 sampai dengan 6.54 dalam Arah X dan 2.91 sampai dengan 7.09 dalam Arah Y. Tabel 5 menunjukkan bahwa peningkatan rasio kekakuan Kx/Ky mengakibatkan peningkatan factor daktilitas struktur dalam arah X, begitu juga sebaliknya dalam Arah sumbu Y. Hal ini jelas terlihat bahwa bila kekakuan struktur ke suatu arah menurun, maka deformasi lelehnya juga menurun sedangkan deformasi pada kondisi ultimit relative sama. Dengan demikian, factor daktilitas struktur mengalami peningkatan.

Tabel 5. Faktor daktilitas struktur untuk tiap-tiap model

Model	Rasio Kx/Ky	Simpangan Leleh (mm)		Simpangan Ultimit (mm)		Faktor Daktilitas (μ)	
		Arah X	Arah Y	Arah X	Arah Y	Arah X	Arah Y
1	0.128	55.460	24.800	142.190	175.940	2.56	7.09
2	0.320	29.960	25.540	141.710	134.370	4.73	5.26
3	1.000	26.220	30.420	134.310	156.840	5.12	5.16
4	3.130	26.480	29.700	138.190	140.990	5.22	4.75
5	7.840	24.600	55.640	160.820	162.000	6.54	2.91

Daktilitas struktur pada Tabel 5 kemudian diplot pada Gambar 15 untuk mengetahui kecenderungan hubungan antara rasio kekakuan Kx/Ky dan factor daktilitas struktur. Perubahan yang sangat significant terlihat pada rasio kekakuan struktur antara 0.128 dan 0.320 dimana daktilitas struktur Arah X berkurang sebesar 84.5%, sedangkan pada arah Y perubahan terbesar adalah 38.7% pada rasio kekakuan Kx/Ky dari 3.13 dan 7.84. Pada rasio kekakuan Kx/Ky = 1, daktilitas struktur baik arah X maupun arah Y hampir sama dengan selisih 0.8%. Hal ini menunjukkan bahwa daktilitas struktur yang sama dapat dicapai bila kekakuan stuktur dalam arah yang saling tegak lurus adalah sama.



Gambar 15. Hubungan antara rasio kekakuan K_x/K_y dengan factor daktilitas struktur pada arah sumbu global X dan Y

Kesimpulan

Dari hasil analisis *Linier Time History* dan *Static Nonlinear Pushover* untuk mengetahui perilaku dinamis struktur beton bertulang dengan berbagai konfigurasi orientasi penampang kolom pipih dapat disimpulkan bahwa semakin meningkatnya rasio kekakuan K_x/K_y suatu struktur, maka periode alami struktur, gaya geser dasar dan drift rasio semakin menurun dalam Arah X, namun sebaliknya terjadi dalam Arah Y. Faktor daktilitas struktur meningkat dengan meningkatnya rasio kekakuan K_x/K_y dalam suatu arah yang ditinjau. Perilaku struktur yang proporsional dalam kedua Arah diperoleh apabila rasio kekakuan K_x/K_y mendekati satu.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Putu Didik Sulistiana yang telah membantu melaksanakan analisis static nonlinear pushover dari model struktur yang ditinjau. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada semua pihak atas diskusi dan masukannya demi selesainya tulisan ini.

Daftar Pustaka

- American Society of Civil Engineers, (2000), "*FEMA 235-Prestandard and Commentary for The Seismic Rehabilitation of Buildings*", Federal Emergency Management Agency, Washington D.C., USA
- Applied Technology Council, (2005), "*FEMA 440 - Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures*", Federal Emergency Management Agency, Washington D.C., USA
- American Concrete Institute, (2008), "*Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318M-08) and Commentary*", Farmington Hills, Country Club Drive
- Badan Standarisasi Nasional, (2002), "*Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Bangunan Gedung SNI 03 - 1726 - 2002*", Jakarta
- Badan Standarisasi Nasional, (2013), "*Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung SNI 2847:2013*", Jakarta
- Badan Standarisasi Nasional, (2012), "*Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung SNI 1726:2012*", Jakarta.
- Chopra, A. K., (1995), "*Dynamics Of Structure*", Prentice Hall, New Jersey, USA.
- Computer & Structures Inc., (2011), "*Getting Started with SAP2000*", Berkeley, USA
- Fajfar, P., and Krawinkler, H., (1992), "*Nonlinear Seismic Analysis and Design of Reinforced Concrete Buildings*", Elsevier Applied Science, New York, USA.
- Fanella, D. A., & Munshi, J. A., (1998), "*Design Of low-Rise Concrete Buildings for Earthquake Forces*", Portland Cement Association, USA.
- MacGregor, J. G., & Wight, J. K., (2006), "*Reinforced Concrete Mechanics and Design (4th Edition ed.)*", Prentice-Hall Inc., Singapore
- Sadiasmini, L.P.E., (2005), "*Analisis Nonlinear Statik Pushover Struktur Gedung 3-D dengan dan tanpa Pelat*", Tugas Akhir, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Udayana, Bali
- Tanone, N.S., (2010), "*Pengaruh Variasi Dinding Pengisi Terhadap Daktilitas Struktur Portal Beton Bertulang*", Tugas Akhir, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Udayana, Bali