

EVALUASI KINERJA STRUKTUR RANGKA BETON BERTULANG TIDAK BERATURAN DENGAN PENAMBAHAN TINGKAT MENGGUNAKAN STRUKTUR BAJA

I Ketut Sudarsana, Anak Agung Gde Agung Asmara dan Gusti Ayu Rai Mahayani

Program Studi Teknik Sipil Universitas Udayana
Email : ksudarsana@unud.ac.id

ABSTRAK

Penambahan tingkat pada sebuah gedung yang sudah beroperasi sering dijumpai di lapangan. Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis kinerja struktur beton bertulang dengan penambahan tingkat menggunakan struktur baja dan juga mengetahui nilai dari faktor modifikasi respon (R), nilai kuat lebih struktur (Ω_o), dan faktor pembesar perpindahan (C_d) yang diperlukan dalam mendesain struktur akibat beban gempa. Struktur yang ditinjau adalah struktur gedung perkantoran terdiri dari 5 tingkat berada di atas tanah sedang pada wilayah dengan kategori seismic D. Gedung tidak beraturan horizontal dengan denah L yang struktur awalnya didesain sebagai beton bertulang (M1), kemudian divariasikan dengan mengganti tingkat ke 5 dengan struktur baja sebagai variasi pertama (M2) dan variasi kedua, tingkat 4 dan 5 diganti dengan struktur baja (M3). Sambungan kolom baja ke beton dimodel dengan tiga jenis hubungan yaitu rigid (M2R, M3R), semi rigid (M2SR, M3SR) dan sendi (M2S, M3S). Struktur dimodelkan secara 3D dan dianalisis dengan *static nonlinear pushover* pada program berbasis elemen hingga. Level kinerja struktur dievaluasi mengikuti FEMA 440. Hasil penelitian menunjukkan bahwa level kinerja struktur dengan penambahan baja adalah *immediate occupancy* (IO), sedangkan struktur awal berupa beton bertulang adalah *collapse prevention* (CP). Nilai R semua model struktur pada penelitian ini melebihi nilai R menurut FEMA P-695 sebesar 6,0. Struktur dengan sambungan rigid dan semi rigid tidak menghasilkan perbedaan nilai R yang signifikan, namun sangat jelas berbeda untuk struktur yang menggunakan sambungan sendi. Nilai Ω_o semua struktur berkisar 4,61 hingga 6,03 dan telah melebihi nilai Ω_o yang ditentukan SNI 1727:2012 dan FEMA P-695. Semua model struktur memiliki nilai faktor pembesar perpindahan (C_d) kurang dari 2 kecuali struktur dengan penambahan 2 tingkat baja dan sambungan sendi (M3S) yang menghasilkan faktor pembesar perpindahan (C_d) lebih besar dari 4.

Kata kunci : *kinerja struktur, struktur gabungan beton-baja, struktur tidak beraturan, sambungan*

PERFORMANCE EVALUATION OF IRREGULAR REINFORCED CONCRETE STRUCTURE WITH STORY REPLACEMENT USING STEEL STRUCTURE

ABSTRACT

The addition of storey to an operated building is often found in the field. This research was conducted to analyze the performance of reinforced concrete structure with the addition of storeys using steel structure and also to investigate value of response modification factor (R), overstrength factor (Ω_o), and displacement factor (C_d) needed in designing structure due to earthquake load. The investigated structure is the structure of an office building consisting of 5 storeys on a medium soil (SD) in a seismic category of D. An horizontal irregularity building with a L-shape plan that was initially designed as reinforced concrete (M1), then varied by replacing the 5th storeys with steel structure as the first variation (M2) and the second variation, the 4th and 5th are replaced with steel structures (M3). Steel column connections to concrete are modeled with three types of connection such as rigid (M2R, M3R), semi rigid (M2SR, M3SR) and pin (M2S, M3S). The structure is modeled in 3D and analyzed with static nonlinear pushover on finite element-based programs. The performance level of the structure is evaluated following FEMA 440. The results show that the level of performance of the structure with the addition of steel structure is immediate occupancy (IO), while the initial structure of reinforced concrete is collapse prevention (CP). The R value of all structural models in this study exceeded the R value according to FEMA P-695 of 6.0. Structures with rigid and semi-rigid connections do not result in significant differences on R value, but are very distinctly different for structures using pin connections. The Ω_o values of all structures range from 4.61 to 6.03 and have exceeded the Ω_o values specified by SNI 1727: 2012 and FEMA P-695. All structural models have a value of displacement factor (C_d) of less than 2 except structures with the addition of 2 storeys of steel structure and pin connections (M3S) resulting in a magnifier displacement factor greater than 4.

Keywords : *performance of structures, concrete-steel combined structures, irregular structures, connections*

1 PENDAHULUAN

Pada pembangunan gedung secara bertahap dapat terjadi perubahan material struktur gedung tersebut karena pertimbangan bahwa sebagian gedung tersebut sudah beroperasi, waktu pengerjaan dan keuangan pemilik. Perubahan itu dapat berupa perubahan material struktur yang awalnya direncanakan sebagai struktur beton bertulang dapat menjadi struktur baja pada pembangunan lanjutannya. Penelitian terhadap kinerja struktur beton bertulang dengan struktur baja dilakukan oleh Putra (2014), Prabowo (2016) dan Prabowo dan Lase (2016) dengan denah struktur beraturan. Ketidakberaturan denah struktur dapat mempengaruhi gaya gempa yang bekerja pada pusat massa.

Penambahan tingkat pada struktur yang sudah ada, akan mempengaruhi kinerja struktur tersebut dan juga sistem sabungan antara struktur baru dan lama juga memberikan pengaruh terhadap kinerja struktur secara keseluruhan. Pada umumnya terdapat 3 tipe kondisi sambungan yang mungkin digunakan dalam mendesain hubungan antar kolom beton bertulang dan baja yaitu sambungan kaku (*rigid*), sendi (*pin*), semi rigid (*partially restrained*). Sambungan dinyatakan kaku jika pada sambungan tidak terjadi rotasi atau terkendali, sedangkan sambungan sederhana (sendi) mengabaikan pengekangan, diijinkan berotasi dan fleksibel, dan sambungan semi rigid (*partially restrained*) yang memiliki sifat diantara kedua jenis lain. Prabowo dan Lase (2016) menggunakan ketiga kondisi sambungan tersebut pada penambahan struktur baja di atas struktur beton dengan denah beraturan dan menyarankan bahwa penambahan struktur baja menggunakan sistem struktur penahan momen menengah. Kondisi denah yang tidak beraturan juga mempengaruhi kinerja struktur gedung.

Kinerja suatu struktur dapat dievaluasi dengan analisis *pushover* pada software berbasis elemen hingga dengan memperhitungkan perilaku inelastis elemen struktur mengacu pada definisi sendi plastis FEMA. Hasil analisis *pushover* juga dapat dipakai untuk menghitung nilai dari beberapa parameter yang berkaitan dengan beban gempa yang diperlukan dalam mendesain struktur gedung. SNI 1726:2012 memberikan nilai-nilai parameter faktor modifikasi respon (R), nilai kuat lebih struktur (Ω_o), dan faktor pembesar perpindahan (Cd) pada struktur beton bertulang atau baja. Untuk struktur yang menggunakan material gabungan tersebut, nilai-nilai tersebut belum ditentukan nilainya.

Untuk mengetahui kinerja struktur yang menggunakan gabungan bahan struktur beton dan baja pada struktur gedung tidak beraturan maka penelitian perlu dilakukan. Tulisan ini menampilkan hasil analisis yang telah dilakukan meliputi gaya geser dasar, level kinerja model struktur, nilai faktor daktilitas aktual struktur, kekakuan struktur faktor faktor modifikasi respon (R), nilai kuat lebih struktur (Ω_o), dan faktor pembesar perpindahan (Cd) pada struktur.

2 MATERI DAN METODE

2.1 Dasar-dasar Kinerja Struktur

FEMA 440 menetapkan batasan-batasan level kinerja (*performance level*) kedalam beberapa kategori yaitu *Immediate Occupancy* (IO), *Life Safety* (LS), dan *Collapse Prevention* (CP). Kinerja struktur dapat ditentukan setelah melakukan analisis *static nonlinear pushover*. Kemudian menganalisis level kinerja yang diperoleh dengan menggunakan target perpindahan. Dalam penelitian ini, penentuan target perpindahan menggunakan metode FEMA 440 dan SNI 1726:2012.

Berdasarkan kurva kapasitas hasil analisis *pushover*, maka kekakuan struktur pada kondisi elastis dan ultimit didapat dengan menggunakan persamaan ($k = V/\delta$). Daktilitas struktur yang merupakan perbandingan antara simpangan ultimit (δ_u) dibagi simpangan leleh (δ_y) dapat dihitung setelah melakukan analisis *pushover*. Mengacu pada FEMA P-695 seperti terlihat pada Gambar 1b, nilai R , Ω_o , dan Cd bisa diperoleh dengan menggunakan berturut-turut Persamaan 1, 2 dan 3.

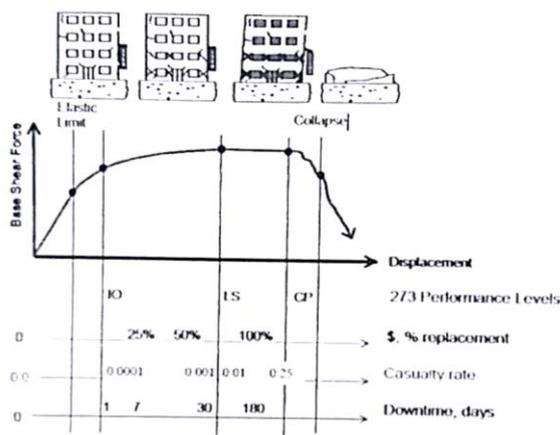
$$R = \frac{V_E}{V} \quad (1)$$

$$\Omega_o = \frac{V_{maks}}{V} \quad (2)$$

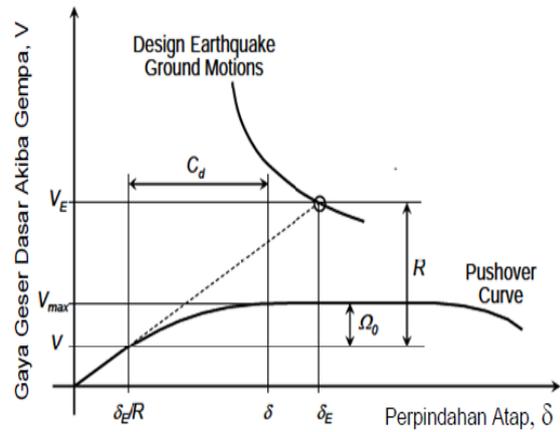
$$Cd = \frac{\delta}{\delta_E/R} \quad (3)$$

Dimana:

- V_{maks} : gaya gempa maksimum yang mampu dipikul oleh struktur
- V_E : gaya gempa pada struktur agar berperilaku elastik penuh
- V : beban gempa rencana yang diberikan pada desain struktur
- δ : perpindahan saat struktur mulai melewati kondisi elastis.
- δ_E/R : perpindahan saat beban gempa rencana



(a) Level Kinerja struktur FEMA 273



(b) Cara menentukan parameter beban gempa FEMA P-695

Gambar 1. Level kinerja dan penentuan parameter kinerja struktur

2.1 Geometri Struktur dan Data Material

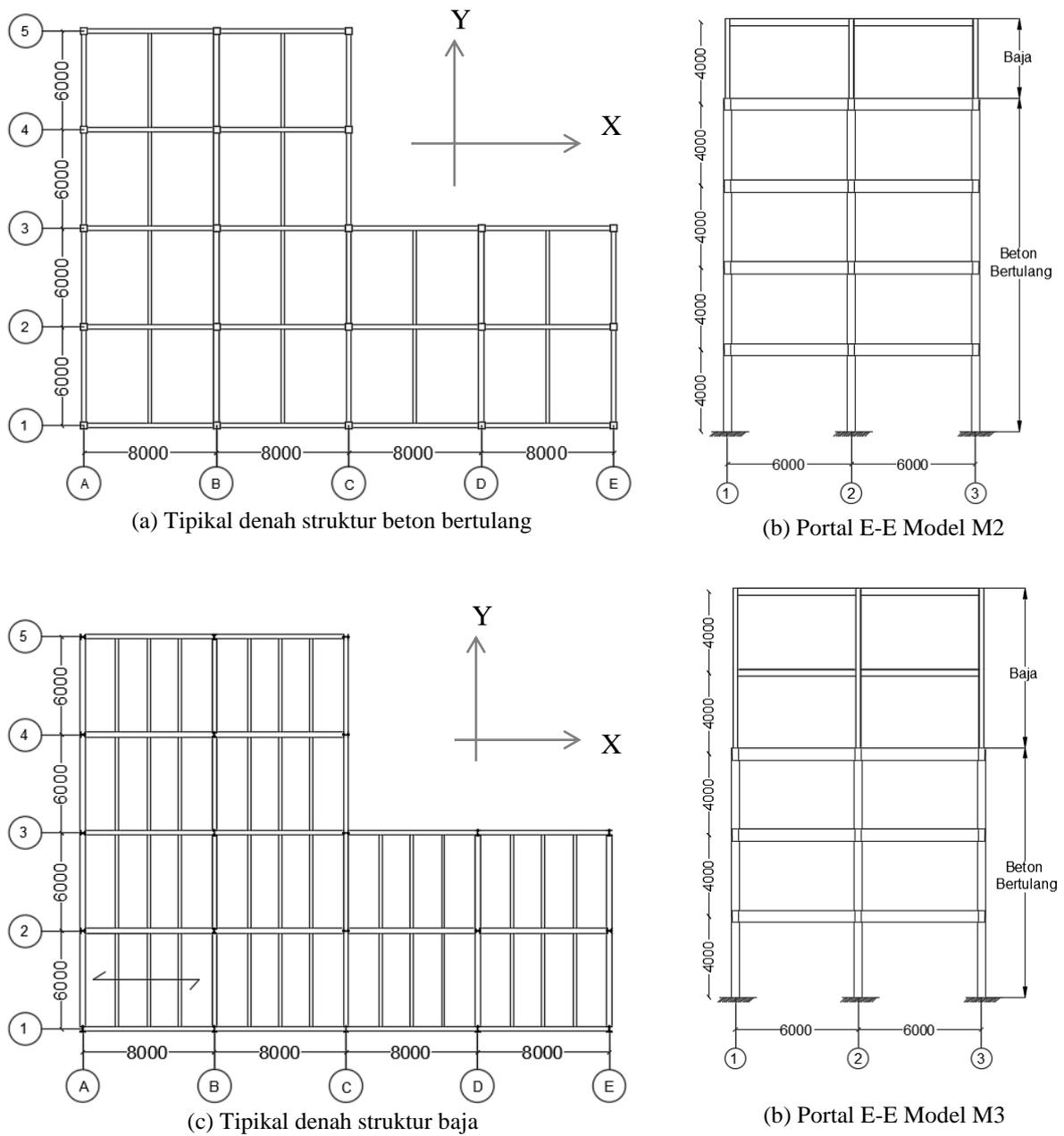
Struktur gedung yang ditinjau dalam penelitian ini merupakan struktur gedung 5 tingkat dengan fungsi perkantoran yang berdiri diatas tanah sedang (SD) di wilayah dengan kategori seismic (KDS) D. Pada awal desainnya struktur ini dianggap terbuat dari struktur beton bertulang 5 tingkat yang telah memenuhi persyaratan SRPMK (model M1). Namun karena pembangunannya secara bertahap dan sebagian sudah difungsikan, maka penggantian material struktur bias terjadi. Dalam penelitian ini akan ditinjau penggantian material strukturnya menggunakan struktur baja pada 1 tingkat teratas (model M2) dan 2 tingkat teratas (M3). Adapun denah tipikal dan portal dari struktur yang ditinjau ditunjukkan pada Gambar 2. Denah struktur berbentuk L dan termasuk kriteria struktur gedung tidak beraturan.

Sambungan antara kolom baja dan struktur beton dapat berperilaku sebagai sambungan kaku (*rigid*), semi kaku (*semi rigid*) dan sendi (*flexible*). Perilaku dari ketiga sambungan ini juga akan ditinjau dalam analisis pada Model M2 dan M3 sehingga masing-masing model ini terdiri atas 3 variasi. Keseluruhan model struktur yang dianalisis ditampilkan pada Tabel 1.

Material yang dipergunakan untuk struktur beton bertulang adalah kuat tekan beton (f'_c) 30 MPa, kuat tarik leleh baja tulangan longitudinal (f_{y1}) 400 MPa, dan kuat tarik leleh baja tulangan geser 320 MPa. Sedangkan mutu element baja adalah BJ 41 dengan modulus elastisitas 200 GPa. Dek baja yang digunakan adalah *Lysaght Smartdeck* 51, $f_y=550$ MPa dan tebal dek 1,00 mm.

Tabel 1. Variasi model struktur

Model struktur		Jumlah tingkat beton bertulang	Jumlah tingkat baja	Sambungan
M1	Struktur kontrol	5	0	Semua struktur beton bertulang
M2	M2R	4	1	Rigid
	M2SR	4	1	Semi Rigid
	M2S	4	1	Sendi
M3	M3R	3	2	Rigid
	M3SR	3	2	Semi Rigid
	M3S	3	2	Sendi



Gambar 2. Denah dan portal dari struktur yang ditinjau

2.2 Pemodelan Struktur dan Analisis

Pemodelan struktur gedung dilakukan dengan bantuan software ETABS secara 3D dengan mendefinisikan elemen-elemen struktur balok dan kolom sebagai elemen garis dan pelat lantai sebagai elemen bidang. Pelat beton bertulang didefinisikan sebagai *thin slab* sedangkan pelat lantai baja didefinisikan sebagai *deck*. Pada pertemuan balok induk dan kolom, *end (length) offset* sebesar 0.5 didefinisikan pada ujung-ujung pertemuan balok induk dan kolom untuk memperhitungkan daerah kaku pada pertemuan balok-kolom tersebut. Sedangkan, sambungan balok anak pada balok induk baja sebagai sambungan sendi. Diafragma setiap lantai didefinisikan sebagai diafragma kaku dengan *joint constraint* berupa *diaphragm* diatur agar dalam mode rigid. Pemodelan hubungan rigid pada kolom baja dengan beton dilakukan dengan memberikan *moment restrained* di bagian dasar kolom baja, hubungan sendi dilakukan dengan memberikan *moment release* sedangkan sambungan tipe semi rigid dimodelkan dengan menggunakan *partial fixity*. Kekakuan aksial, geser dan momen pada sambungan semi rigid didesain dan dihitung menggunakan gaya-gaya dalam kolom baja dari analisis linear model dengan sambungan rigid. Perencanaan dan desain sambungan baja menggunakan persamaan pada Fisher dan Kloiber (2006) dan kekakuan sambungan mengacu persamaan Kavinde et. al (2012) dalam Lase dan Prabowo (2016).

Semua model struktur yang ditinjau menerima beban mati, beban hidup, dan beban lateral (gempa). Beban gravitasi dihitung berdasarkan peraturan pembebanan SNI 1727:2013. Besarnya beban gempa rencana diperoleh berdasarkan analisis respon spektrum menggunakan respon spektrum desain menurut SNI 1726:2012. Analisis dan desain struktur dengan memperhitungkan proses pengerjaannya yang bertahap telah dilaporkan pada Sudarsana dkk (2017) dan didapat dimensi seperti Tabel 2, 3 dan 4 berturut-turut untuk Model M1, M2 dan M3.

Tabel 2. Dimensi penampang M1

Elemen Struktur	Dimensi (mm)	Rasio Tulangan (%)
Kolom Lt 1-3	500/500	1,93
Kolom Lt 4	400/400	2,51
Kolom Lt 5	300/300	5,36
BA Lt 5	250/400	0,80
BA Lt 1-4	250/400	1,00
BI Lt 5	250/550	1,32
BI Lt 4, L= 6 m	250/550	1,32
BI Lt 1-3, L= 6 m	300/650	1,13
BI Lt 1-4, L= 8 m	300/700	1,31

Tabel 3. Dimensi penampang M2

Elemen Struktur	Dimensi	Stress Ratio M2		
		M2R	M2SR	M2S
Kolom	HWF 300.300	0,515	0,543	0,710
BI Lt 5	IWF 200.400	0,642	0,677	0,785
BA Lt 5	IWF 175.350	0,764	0,798	0,821

Tabel 4. Dimensi penampang M3

Elemen Struktur	Dimensi	Stress Ratio M3		
		M3R	M3SR	M3S
Kolom Lt 5	HWF 300.300	0,602	0,609	0,615
Kolom Lt 4	HWF 350.350	0,515	0,527	0,544
BI Lt 5	IWF 200.400	0,633	0,630	0,609
BA Lt 4 & 5	IWF 175.350	0,766	0,765	0,760
BI Lt 4	IWF 250.400	0,704	0,704	0,757

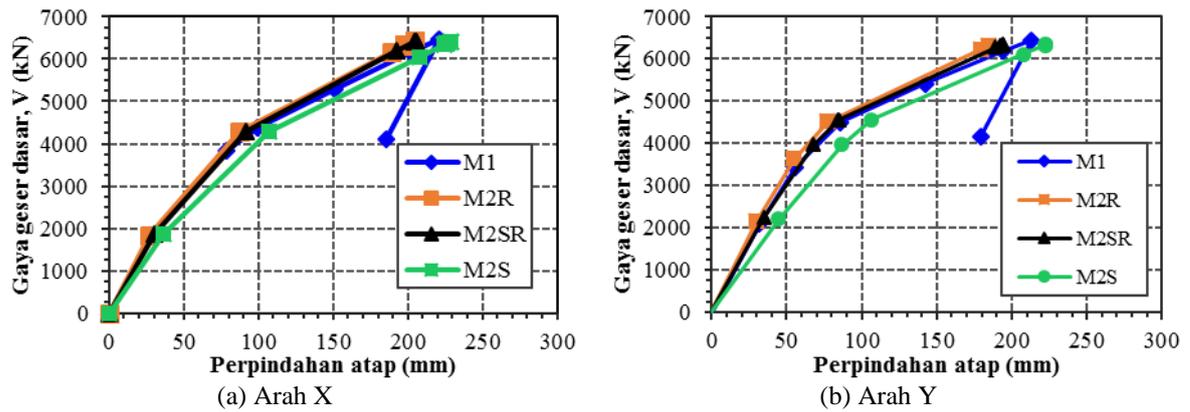
Semua lantai beton memiliki tebal 120 mm dan pelat atap 100 mm. Rasio tulangan balok dan kolom yang digunakan pada model disajikan dalam Tabel 2. Semua tulangan pada balok anak dan induk memenuhi syarat ρ_{min} dan ρ_{maks} berturut-turut sebesar 0,306 % dan 2,03%. Sedangkan rasio tulangan kolom yaitu $\rho = 0,0193$ memenuhi persyaratan $0,01 < \rho < 0,06$ sesuai SNI 2847:2013. Dimensi struktur beton bertulang dan rasio tulangan pada M2 dan M3 yang diberikan adalah sama dengan dimensi pada M1. Masing-masing nilai stress ratio pada semua elemen memenuhi persyaratan kurang dari 0,950 sesuai SNI 1729:2015 seperti ditampilkan pada Tabel 3 dan Tabel 4.

Evaluasi kinerja struktur dilakukan dengan analisis statik pushover. Pada elemen balok induk, sendi plastis didefinisikan akibat lentur terhadap Arah local 3, sementara kolom mengalami keruntuhan akibat gaya aksial dan momen lentur terhadap Arah local 2 dan 3 (P-M-M). Selanjutnya, dilakukan pendefinisian kasus beban gravitasi nonlinier sebagai awal perilaku nonlinear struktur yang kemudian dilanjutkan dengan aplikasi beban dorong ke arah Arah X dan Y. Beban lateral yang telah didefinisikan sebagai beban percepatan yang ditingkatkan secara bertahap (*multiple states*).

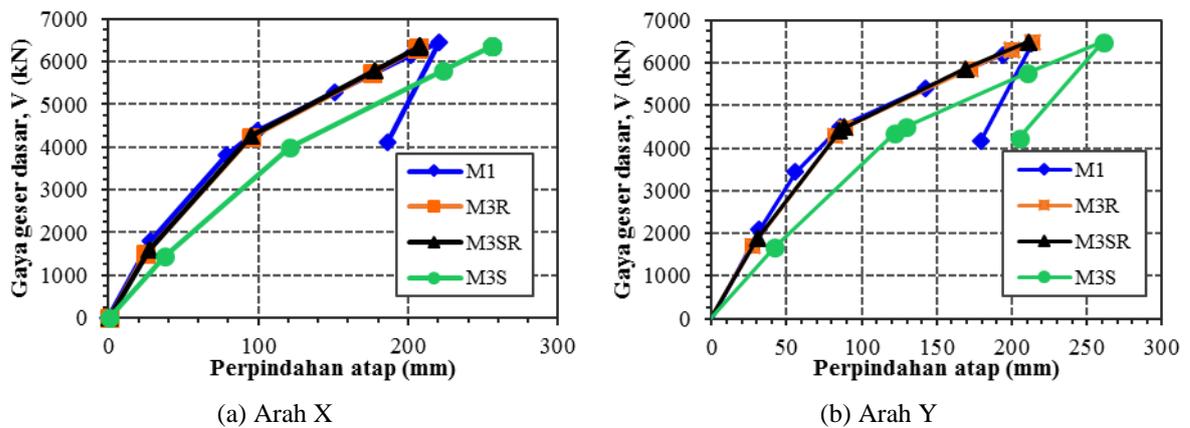
3 HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Kurva kapasitas struktur

Analisis *static nonlinear pushover* dilakukan untuk mengevaluasi kinerja semua model struktur yang ditinjau. Kurva kapasitas struktur dari hasil analisis ditampilkan pada Gambar 3 dan 4 baik untuk arah X maupun Arah Y. Berdasarkan perbandingan kurva kapasitas pada Gambar 3 dan 4 terlihat bahwa gaya geser paling besar pada kondisi elastis diterima M3S. Penambahan tingkat menggunakan struktur baja dengan sambungan sendi menyebabkan semakin besar pula perpindahan atap. Kurva kapasitas model semirigid selalu berada diantara sambungan sendi dan rigid. Kecenderungan ini terjadi pada model dengan penambahan 1 dan 2 tingkat dengan struktur baja.



Gambar 3. Perbandingan kurva kapasitas M1 dengan M2 arah X dan Y



Gambar 4 Perbandingan kurva kapasitas M1 dengan M3 arah X dan Y

3.2 Target Perpindahan dan level Kinerja

Target perpindahan (δ_t) yang terjadi akibat beban dorong yang diberikan ditinjau pada titik kontrol yang berada pada atap (Grid A-1). Target perpindahan struktur dihitung dengan metode FEMA 440 yang kemudian dibandingkan dengan target perpindahan elastis menurut SNI 1726:2012 yang diperoleh dari perkalian antara perpindahan kondisi elastis dengan faktor pembesar perpindahan (C_d). Pada seluruh struktur C_d yang digunakan sesuai SNI 1726:2012 adalah sebesar 5,5. Tabel 5 menunjukkan bahwa target perpindahan struktur pada saat dicapai level kinerjanya masih lebih besar daripada target perpindahan menurut SNI 1726:2012.

Tabel 5. Target perpindahan struktur

Model struktur	Target Perpindahan (mm)			
	FEMA 440		SNI 1726:2012	
	X	Y	X	Y
M1	168,59	168,20	111,71	110,92
M2R	151,98	150,73	111,71	110,92
M2SR	162,06	162,18	107,11	105,32
M2S	185,43	190,66	110,01	108,63
M3R	155,35	155,86	122,12	124,91
M3SR	156,52	156,92	104,89	102,01
M3S	177,59	178,32	105,24	102,62

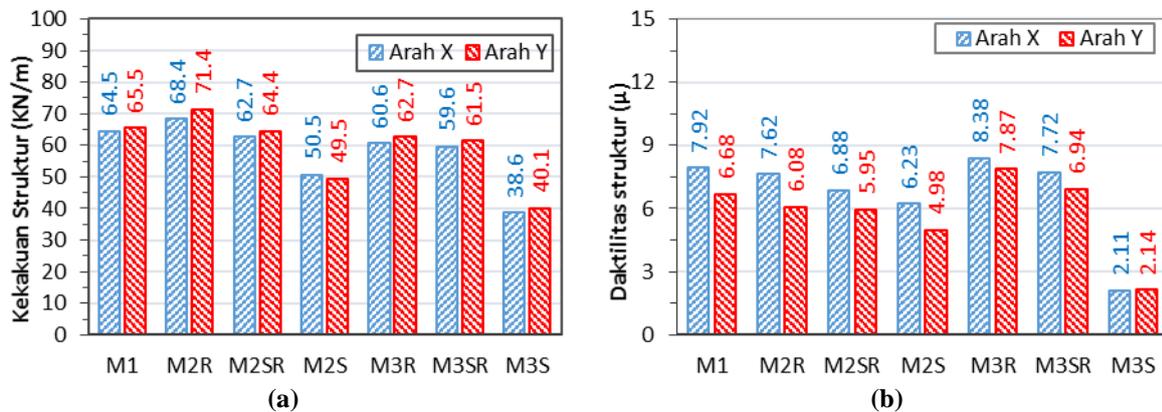
Level kinerja yang dihasilkan berdasarkan target perpindahan FEMA 440 ditampilkan pada Tabel 6. Struktur awal (M1) yang menggunakan seluruhnya beton bertulang, memiliki level kinerja struktur *collapse prevention*. Sedangkan semua model struktur lainnya dengan dengan penambahan 1 tingkat atau 2 tingkat struktur baja, memiliki level kinerja *Immediate Occupancy (IO)*. Apabila perpindahan yang didapat berdasarkan SNI1726:2012 dipakai acuan menghitung level kinerja maka semua model yang ditinjau memiliki level kinerja IO baik untuk Arah X maupun Arah Y seperti terlihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Level kinerja struktur

Model struktur	Level Kinerja			
	FEMA 440		SNI 1726:2012	
	X	Y	X	Y
M1	CP	CP	IO	IO
M2R	IO	IO	IO	IO
M2SR	IO	IO	IO	IO
M2S	IO	IO	IO	IO
M3R	IO	IO	IO	IO
M3SR	IO	IO	IO	IO
M3S	IO	IO	IO	IO

3.3 Kekakuan dan daktilitas struktur

Kekakuan model struktur pada Arah X dan Y disajikan dalam Gambar 5. Kekakuan model struktur beton bertulang sebesar 64,5 N/mm pada Arah X dan 65,5 N/mm pada Arah Y. Penambahan dengan 1 tingkat baja dengan sambungan rigid meningkatkan kekakuan struktur sebesar 106,1% pada Arah X dan 109,1% pada Arah Y. Selain M2R, model lain memiliki kekakuan yang lebih kecil dari M1. Model dengan kekakuan terkecil yaitu M3S dengan persentase 59,8% dan 61,2% terhadap M1 pada arah X dan Y. Penggunaan variasi sambungan rigid menghasilkan kekakuan terbesar, sambungan sendi memiliki kekakuan terkecil dan sambungan semirigid selalu diantara sambungan rigid dan sendi. Penambahan dengan 1 tingkat baja memiliki nilai kekakuan lebih besar daripada penambahan dua tingkat baja. Prosentase perbandingan kekakuan struktur terhadap kekakuan struktur Model M1 pada arah X berturut-turut untuk M2R, M2SR, dan M2S adalah 106,1%; 97,2%; 78,4 %, sedangkan berturut-turut untuk M3R, M3SR, dan M3S adalah sebesar 94,0%; 92,5%; dan 59,8%. Perbedaan kekakuan struktur pada Arah X dan Y untuk tiap model struktur tidak terlalu signifikan seperti pada Gambar 5a.



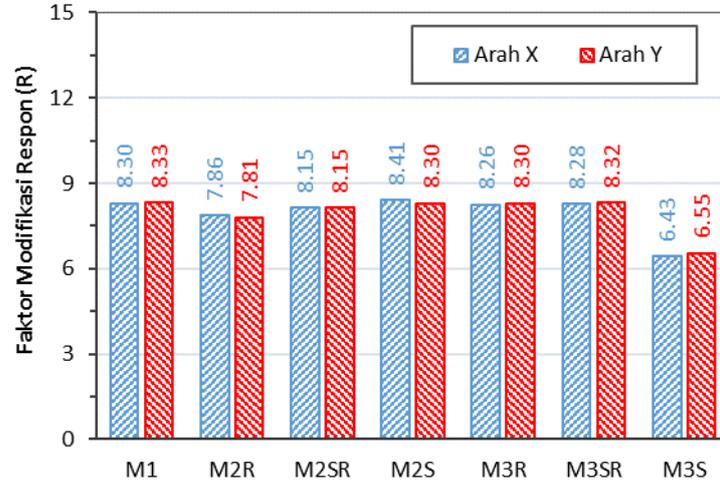
Gambar 5. Perbandingan (a) kekakuan struktur, (b) daktilitas struktur

Faktor daktilitas (μ) yang ditampilkan pada Gambar 5b merupakan faktor daktilitas perpindahan yang diperoleh dari rasio antara perpindahan pada waktu terjadinya leleh pertama (δ_y) dan perpindahan ultimit (δ_u). Struktur beton bertulang yang didesain sebagai sistem rangka momen khusus ($\mu = 5.0$) digunakan sebagai pembanding dari daktilitas model struktur lainnya. Semua model struktur memiliki nilai μ lebih dari 5 kecuali model M3S. Selain model M3S, struktur dengan penambahan 1 dan 2 tingkat struktur baja masih termasuk struktur daktil. Struktur M3S termasuk dalam struktur dengan daktilitas terbatas. Pada struktur dengan penambahan 1 tingkat struktur baja (M2R, M2SR dan M2S), daktilitas struktur yang diperoleh lebih kecil model M1, sedangkan pada struktur dengan penambahan 2 tingkat baja, struktur dengan sambungan rigid menghasilkan daktilitas lebih dari M1 hingga 105,75%. Sedangkan model dua tingkat baja dengan sambungan sendi memiliki daktilitas parsial hingga 26,7% dibandingkan M1. Variasi sambungan mempengaruhi nilai daktilitas aktual model struktur, dimana nilai daktilitas berkurang dari sambungan rigid, semi rigid ke sambungan sendi.

3.4 Parameter-parameter beban gempa

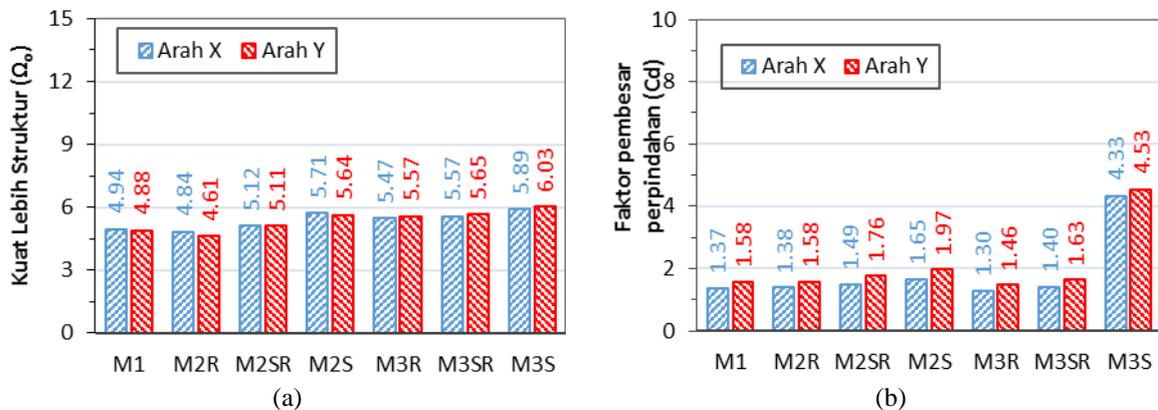
Parameter beban gempa yang diperlukan dalam desain antara lain faktor modifikasi respon (R), faktor kuat lebih struktur (Ω_0) dan faktor pembesar perpindahan (Cd). Ketiga factor ini dapat diperoleh dari hasil analisis beban dorong terhadap struktur.

Gambar 6 menunjukkan nilai R semua model struktur yang ditinjau. Bila dibandingkan dengan nilai R pada SNI 1726:2012 untuk struktur rangka beton bertulang pemikul momen khusus yang besarnya 8, maka Semua model struktur dapat dikategorikan struktur daktail, kecuali struktur dengan penambahan 2 tingkat struktur baja dan sambungan sendi (M3S) dimana nilai R termasuk dalam kategori daktilitas menengah (R=4,5). Menurut FEMA P-695, nilai R struktur gabungan baja-beton adalah 6,0 sehingga semua model struktur (M2 dan M3) pada penelitian ini melebihi R yang ditetapkan oleh FEMA P-695.



Gambar 6. Faktor modifikasi respon

Gambar 7a menampilkan nilai kuat lebih struktur (Ω_o) masing-masing model pada arah X dan Y. Menurut SNI 1726:2012 dan FEMA P-695, nilai kuat lebih struktur (Ω_o) untuk struktur rangka beton bertulang pemikul momen khusus dan struktur rangka baja pemikul momen menengah adalah sebesar 3,0. Gambar 7a menunjukkan rentang nilai kuat lebih struktur (Ω_o) adalah 4,61 – 6,03 sehingga seluruh model memiliki nilai Ω_o lebih dari nilai yang ditetapkan pada SNI 1726: 2012 dan FEMA P-695.



Gambar 7. Perbandingan (a) kuat lebih struktur, (b) faktor pembesar perpindahan

Faktor pembesar perpindahan (Cd) juga dihitung berdasarkan hasil analisis beban dorong dengan menggunakan Persamaan 3 dan hasilnya ditampilkan pada Gambar 7b untuk semua model struktur yang ditinjau pada arah X dan Y. Nilai Cd terbesar diperoleh pada model struktur M3S yaitu 4,33 dan 4,53 masing-masing untuk arah X dan Y, sedangkan model struktur lainnya nilai Cd berkisar antara 1,30-1,97 baik untuk arah X maupun arah Y. Bila dibandingkan dengan ketentuan SNI 1726:2012 untuk struktur rangka beton bertulang pemikul momen khusus dengan nilai Cd sebesar 5,5 dan struktur rangka baja pemikul momen menengah dengan nilai Cd sebesar 4, maka seluruh model struktur memiliki nilai Cd kurang dari yang disyaratkan SNI 1726:2012 untuk kedua sistem struktur tersebut. Hanya model M3S dapat memenuhi nilai $Cd > 4$ untuk struktur rangka baja pemikul momen menengah.

4 KESIMPULAN

Analisis static nonlinear pushover telah dilakukan pada 7 model struktur untuk menevaluasi kinerja struktur gabungan antara beton bertulang dan struktur baja dengan memperhitungkan tiga kondisi sambungan kolom

baja dengan beton yaitu sambungan kaku, semi rigid dan sendi. Hasil analisis yang diperoleh dan pembahasan yang telah dilakukan maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Level kinerja pada semua struktur dengan penambahan struktur baja menghasilkan level kinerja *immediate occupancy* (IO), sedangkan struktur awal berupa beton bertulang adalah *collapse prevention* (CP).
2. Penggunaan variasi sambungan menyebabkan perubahan nilai kekakuan struktur, dimana sambungan rigid memiliki kekakuan terbesar, sambungan sendi memiliki kekakuan terkecil dan sambungan semirigid berada diantara sambungan rigid dan sendi.
3. Penambahan 1 tingkat baja menghasilkan nilai kekakuan lebih besar dibandingkan dengan penambahan 2 tingkat baja.
4. Variasi sambungan mempengaruhi nilai daktilitas aktual struktur, dimana nilai daktilitas berkurang dari sambungan rigid, semi rigid ke sambungan sendi. Tingkat daktilitas penuh dihasilkan model sambungan rigid dan semirigid, sedangkan model sambungan sendi menghasilkan tingkat daktilitas parsial.
5. Daktilitas model struktur beton bertulang dan dengan penambahan 1 tingkat baja memiliki daktilitas lebih besar dari penambahan tingkat menggunakan 2 tingkat baja pada model dengan sambungan rigid dan semi rigid. Pada model dengan sambungan sendi terjadi sebaliknya.
6. Nilai R semua model struktur pada penelitian ini melebihi R menurut FEMA P-695 sebesar 6,0 dengan R maksimum terdapat pada M2S sebesar 8,41 dan R terkecil pada M3S sebesar 6,43. Struktur dengan sambungan rigid dan semi rigid tidak menghasilkan perbedaan nilai R yang signifikan, namun sangat jelas berbeda untuk struktur yang menggunakan sambungan sendi
7. Seluruh model memiliki nilai Ω_o melebihi nilai Ω_o SNI 1727:2012 maupun FEMA P-695 yaitu nilai Ω_o berada diantara 4,61 hingga 6,03.
8. Semua model struktur memiliki nilai faktor pembesar perpindahan (Cd) kurang dari 2 kecuali struktur dengan penambahan 2 tingkat baja dan sambungan sendi (M3S) yang menghasilkan faktor pembesar perpindahan (Cd) lebih besar dari 4

5 DAFTAR PUSTAKA

- FEMA 440, 2005, *Improvement Of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures*, Washington, DC: Federal Emergency Management Agency.
- FEMA P-695, 2009, *Quantification of Building Seismic Performance Factors*, Washington, DC: Federal Emergency Management Agency.
- Fisher, J. M. & Kloiber, L. A. (2006). *Design Guide 1: Base Plate and Anchor Rod Design (2nd ed.)*, Chicago, IL: American Institute for Steel Construction
- Kavinde, A. M., Grilli, D. A., Zareian, F. (2012). "Rotational Stiffness of Exposed Column Base Connections: Experiments and Analytical Models", *Journal of Structural Engineering*, 138, 549-560.
- Lase, Y. dan Prabowo A., 2015, Tinjauan Nilai Ω_o pada Perancangan Sambungan Rigid Dasar Kolom Rangka Baja Di Atas Rangka Beton Bertulang dengan Analisis Pushover, *Seminar dan Pameran HAKI 2015*
- Prabowo, A., 2016, Pushover Analysis of Hybrid Steel and Reinforced Concrete Moment Resisting Frames System on The Building Vertical Extention, *The 3rd International Conference on Earthquake Engineering and Disaster Mitigation 2016 (ICEEDM-III 2016)*
- Prabowo, A., dan Lase, Y., 2016, Tinjauan Nilai Faktor Modifikasi Respon (R) dan Faktor Kuat Lebih (Ω_o) pada Struktur Gabungan Rangka Baja dan Rangka Beton Bertulang dengan Analisis Pushover, *Jurnal Teknik Sipil Vol.23 75-88*.
- Putra, I W. E., 2014, *Analisis Kinerja Struktur Gedung Bertingkat dengan Material Beton Bertulang dan Baja*, (Tugas Akhir yang tidak dipublikasikan, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Udayana, 2014)
- SNI 1726, 2012, *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung*, Badan Standardisasi Nasional Indonesia, Badan Standardisasi Nasional : Jakarta.
- SNI 1729, 2015, *Spesifikasi untuk bangunan baja struktural*, Badan Standardisasi Nasional : Jakarta.
- Sudarsana, IK., Sutarja, I N., Mahayani, G.A.R., 2017, *Analisis Perilaku Rangka Struktur Beton Bertulang Tida Beraturan dengan Penambahan Tingkat menggunakan Struktur Baja*, Prosiding SENATS 2, Sanur-Bali, 8 Juli, SM169-SM178.