

ANALISIS PERILAKU DAN KINERJA STRUKTUR RANGKA DINDING PENGISI DENGAN VARIASI PENEMPATAN DINDING PADA LANTAI DASAR

I Ketut Diartama Kubon Tubuh¹, Made Sukrawa², Dharma Putra²

¹Jurusan Teknik Sipil, Universitas Udayana, Bali

²Dosen Jurusan Teknik Sipil, Universitas Udayana, Bali

e-mail: diartama.k@gmail.com

Abstrak: Analisis perilaku dan evaluasi kinerja struktur rangka dengan dinding pengisi (RDP) telah dilakukan dengan membuat empat model struktur, satu model rangka terbuka (MOF) dan tiga model RDP (M1, M2, dan M3). Pada model RDP dinding pada arah melintang bangunan ditempatkan penuh pada lantai 2, 3 dan 4, dan bervariasi pada lantai dasar. Dinding pada arah memanjang bangunan tidak disertakan dalam pemodelan karena berlubang dan tidak beraturan. Dinding pada lantai dasar ditempatkan penuh pada M1, pada ujung-ujung dan tengah gedung, pada M2, dan kosong pada M3. Dinding dimodel sebagai 3 strut diagonal yang bisa menahan tegangan tekan saja. Perilaku struktur diamati dari hasil analisis elastik linier berupa simpangan tingkat dan rasionya sedangkan kinerja struktur dievaluasi melalui analisis statik non linier Pushover menggunakan SAP2000. Hasil analisis menunjukkan bahwa penyertaan dinding pengisi dalam model meningkatkan kekakuan struktur. Nilai simpangan atap masing-masing model berturut-turut sebesar 8 mm, 10 mm, 12 mm dan 28 mm untuk M1, M2, M3 dan MOF. Mekanisme *soft story* juga terdeteksi pada model RDP dengan penempatan dinding tidak beraturan dengan rasio simpangan maksimum 157% dan 249% pada M2 dan M3, sedangkan pada MOF dan M1 dengan dinding menerus rasio simpangannya masing-masing 101% dan 92%. Dinding yang tidak menerus juga menurunkan kinerja struktur. Hasil analisis Pushover pada arah melintang menunjukkan bahwa M1 mampu menerima gaya geser dasar paling besar 658 ton dengan level kinerja *Operational* (O), sedangkan M2 dengan level kinerja O mampu menerima gaya geser dasar sebesar 437 ton. M3 dan MOF memiliki kemampuan menerima gaya geser dasar paling rendah, masing-masing sebesar 270 ton dan 279 ton dengan level kinerja *Immediate Occupancy* (IO) dan *Life Safety* (LS). Analisis Pushover pada arah memanjang bangunan dimana dinding pengisi tidak dimodel menunjukkan bahwa, MOF memiliki kemampuan menerima gaya geser dasar paling rendah dibandingkan dengan ketiga model RDP. Hal ini menunjukkan bahwa strut pada arah melintang juga mempengaruhi kekakuan struktur arah memanjang. Nilai daktilitas aktual struktur pada arah melintang adalah berturut-turut sebesar 4,6; 2,9; 2,8; 3,4; untuk MOF, M1, M2 dan M3. Sedangkan pada arah memanjang daktilitasnya berturut-turut sebesar 3,2; 3,6; 3,8; 3,9. Semua model struktur memiliki nilai daktilitas lebih kecil dari daktilitas rencana, yakni $\mu = 5$.

Kata kunci: rangka dengan dinding pengisi, *strut* diagonal, *soft story*, kinerja struktur, analisis *Pushover*

BEHAVIOR AND PERFORMANCE ANALYSES OF INFILLED-FRAME STRUCTURE WITH INFILL-WALLS PLACEMENT VARIATION AT THE GROUND FLOOR

Abstract: Behavior analysis and performance evaluation of frame structures with infilled wall (RDP) has been done by making four structure models, a model of open framework (MOF) and three RDP models (M1, M2, and M3). In the RDP models, walls in transverse direction of the building was placed fully on the floor 2,

3 and 4, and varied on the ground floor. The wall in longitudinal direction, however, was not included in the model because of the holes and irregularity. The walls on the ground floor were placed fully for M1, at the ends and middle of the building for M2, and none for M3. The walls were modeled as 3 diagonal struts that can withstand compressive stress only. The behavior of the structure was observed through linear elastic analysis by comparing story drift and its ratios, while the performance of the structure was evaluated through nonlinear static Pushover analysis using SAP2000. The analysis showed that the inclusion of infill walls in the model increases the stiffness of the structure. The values of drift at roof level were 8 mm, 10 mm, 12 mm and 28 mm for M1, M2, M3, and MOF, respectively. Soft story mechanism was detected in the RDP models with irregular wall placement with maximum drift ratio of 157% and 249% for M2 and M3, respectively, while MOF and M1 with continuous wall have drift ratios of 101% and 92%. Discontinuous walls also decrease performance of the structure. Pushover analysis results in the transverse direction showed that M1 is capable of resisting the largest base shear force 658 tons with a level of performance Operational (O), while M2 with O performance levels capable of resisting base shear of 437 tons. M3 and MOF can resist the lowest base shear force of 270 tons and 279 tons with performance level of Immediate Occupancy (IO) and Life Safety (LS). Pushover analysis in the longitudinal direction of the building (where the wall was not modeled) showed that, MOF can resist the least base shear compared to the three RDP models. This suggests that the struts on the transverse direction also affect the stiffness of the structure in the longitudinal direction. The actual value of ductility in the transverse direction of the structure are 4.6; 2.9; 2.8; 3.4; for MOF, M1, M2 and M3, respectively. While in the longitudinal direction the ductility are 3.2; 3.6; 3.8; 3.9. All models ductility values are smaller than the design value, i.e., $\mu = 5$.

Keywords: infilled-frame, diagonal strut, soft story, structure performance, Pushover analysis

PENDAHULUAN

Dinding pengisi merupakan salah satu komponen dari bangunan gedung yang berfungsi sebagai penyekat/pembatas ruangan. Dalam perencanaan suatu struktur gedung, struktur umumnya didesain sebagai *open frame* dengan dinding pengisi yang dianggap hanya sebagai beban. Padahal, jika ditelaah lebih lanjut keberadaan dinding pengisi memiliki kecenderungan untuk berinteraksi dengan portal yang ditempatinya terutama apabila terdapat beban vertikal maupun horizontal (akibat gempa) yang besar. (Dewobroto, 2005)

Suatu struktur yang terdapat dinding pengisi, terlebih penempatan dindingnya tidak beraturan, jika dianalisis hanya sebagai *open frame* saat mengalami gempa bisa saja struktur tersebut mengalami mekanisme *soft story*. Mekanisme tingkat lunak (*soft story*) umumnya terjadi karena keti-

dakberaturan (*irregularity*) atau ketidakberlanjutan (*discontinuity*) dinding pengisi yang mengakibatkan tidak meratanya distribusi dari gaya-gaya lateral. (Sukrawa & Suastika, 2013)

Struktur rangka dinding pengisi saat mengalami tingkat pembebanan yang relatif kecil, dinding pengisi berkontribusi terhadap kekakuan dan kekuatan struktur secara penuh. Pada kondisi tersebut, kekuatan dinding pengisi masih belum terlampaui dan belum terjadi kegagalan yang dapat menurunkan kekakuan struktur secara keseluruhan meskipun portalnya telah terjadi kerusakan. Namun apabila tingkat pembebanan yang terjadi lebih besar lagi dimana deformasi yang terjadi mengakibatkan kekuatan dinding pengisi terlampaui, akan timbul kerusakan pada dinding sebagai indikasi kegagalan dinding pengisi. Hal tersebut menyebabkan struktur portal dengan dinding pengisi mengalami penurunan kekakuan secara signifikan, se-

dangkan energi gempa yang sebelumnya diterima oleh struktur portal bersama dinding pengisi secara tiba-tiba diterima sepenuhnya hanya oleh portal yang akhirnya menyebabkan terjadinya kegagalan pada struktur portal. (Tjahjanto & Imran, 2009)

Kinerja struktur dapat dilihat dari kemampuan struktur tersebut menerima gaya gempa yang kuat. Struktur diharapkan mampu menyebar gaya-gaya dalam ke seluruh elemen-elemen strukturnya sehingga gaya-gaya dalam tersebut tidak terfokus di beberapa elemen stuktur saja. Sehingga struktur dengan kinerja yang baik masih memiliki kemampuan untuk bertahan dari gempa meskipun sudah mencapai ambang keruntuhan. Untuk mengetahui kinerja struktur yang menerima beban gempa dapat dilakukan evaluasi kinerja struktur dengan analisis statik non linier *Pushover*. Evaluasi kinerja struktur dilakukan dengan terlebih dahulu menentukan *target displacement*. Metode yang digunakan untuk menghitung perpindahan target adalah metode *Coefficient Method FEMA 356* (American Society of Civil Engineers, 2000).

MATERI DAN METODE

Rancangan Studi Analisis

Pada studi analisis ini, ditinjau gedung struktur beton bertulang yang berfungsi sebagai hotel dengan sistem struktur SRPMK. Gedung terdiri dari 7 portal melintang dengan jarak antar portalnya 5 m. Portal melintang memiliki tiga bentang dengan panjang bentang pertama dan ketiga adalah 6 m, sedangkan panjang bentang tengah 3 m. Gedung berlantai 4 dengan tinggi setiap lantainya 3,5 m.

Pada portal melintang, dinding setebal 15 cm dimodel sebagai *strut*, sedangkan untuk portal arah memanjang dinding dianggap sebagai beban karena terdapat bukaan berupa pintu/jendela.

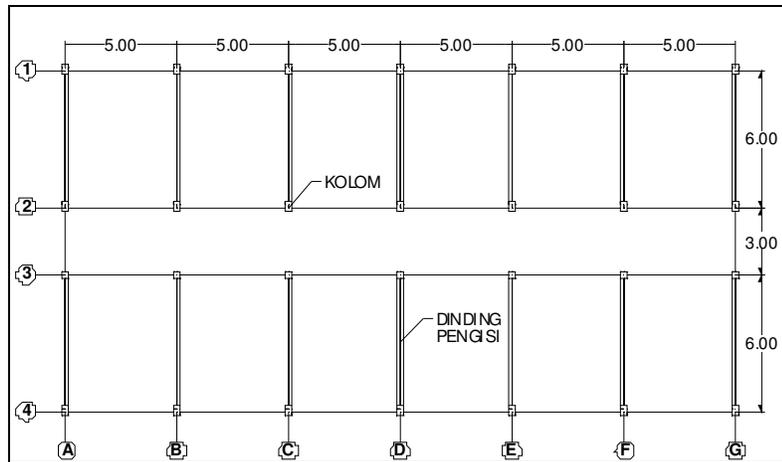
Tiga lantai teratas difungsikan sebagai kamar-kamar, sedangkan pada lantai dasar fungsinya bervariasi mengingat lantai ini yang dijadikan fokus dalam studi analisis, yaitu dari segi penempatan dinding pengisi.

Model MOF adalah struktur rangka yang keseluruhan lantainya terbuka (*open frame*) sehingga dinding pengisinya dianggap sebagai beban saja. Model ini dianalisis untuk mendapatkan dimensi dengan rasio tulangan yang memenuhi persyaratan luas tulangan. Perilaku dan kinerja model ini turut dibandingkan dengan model *infilled frame*.

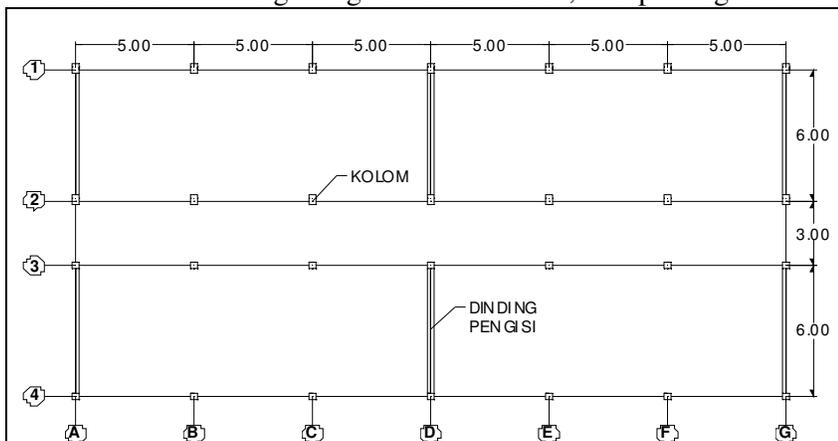
Model M1 adalah model dengan geometri, dimensi dan tulangan elemen-elemen strukturnya identik dengan model MOF, merupakan struktur rangka dinding pengisi (*infilled frame*) penuh pada semua lantai (Gambar 1).

Model M2 adalah model dengan geometri, dimensi dan tulangan elemen-elemen strukturnya identik dengan model MOF, merupakan struktur rangka dinding pengisi (*infilled frame*) tetapi pada lantai dasarnya terdapat tiga penempatan dinding pengisi sehingga tidak menyekat semua ruangan/setengah terbuka (Gambar 2).

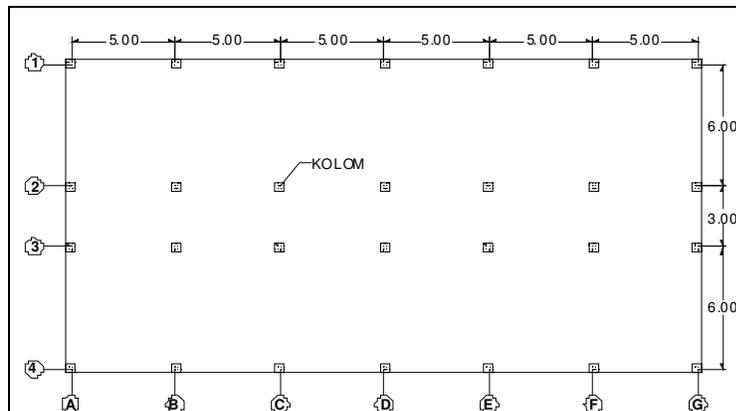
Model M3 adalah model dengan geometri, dimensi dan tulangan elemen-elemen strukturnya identik dengan model MOF merupakan struktur rangka dinding pengisi (*infilled frame*) tetapi pada lantai dasarnya terbuka tanpa dinding (Gambar 3).



Gambar 1. Denah lantai dasar gedung untuk model M1, setiap ruangan disekat dinding



Gambar 2. Denah lantai dasar gedung untuk model M2, dengan tiga penempatan dinding



Gambar 3. Denah lantai dasar gedung untuk model M3, terbuka tanpa dinding

Data Material dan Pembebanan

Digunakan material beton bertulang dengan mutu sebesar 25 MPa dan mutu

tulangan longitudinal serta tulangan geser sebesar 400 MPa dan 320 MPa. Material dinding pengisi adalah bata ringan AAC

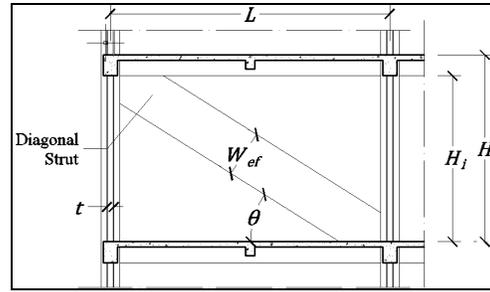
(Autoclaved Aerated Concrete) dengan mutu $f_c = 2,97$ MPa, modulus elastisitas $E_c = 1633,5$ MPa, berat volume $\rho = 596$ kg/m³ dan regangan ultimate $\epsilon_u = 0,0066$; merujuk pada hasil penelitian Tjahjanto dan Imran (2009).

Beban yang bekerja berupa berat sendiri struktur, beban mati tambahan sebesar 145 kg/m² pada lantai dan 126 kg/m² pada atap, serta beban dinding. Beban hidup berdasarkan PPIUG 1983 yaitu sebesar 100 kg/m² pada atap dan 250 kg/m² pada lantai, namun 300 kg/m² pada lantai yang terdapat koridor. Beban gempa yang dikerjakan mengacu pada SNI 1726:2012 dengan parameter lokasi di Denpasar, Bali. Kombinasi pembebanan yang digunakan berdasarkan SNI 1726:2012.

Equivalent Diagonal Strut

Equivalent Diagonal Strut adalah metode untuk analisis inelastis portal dinding pengisi yang diajukan oleh Saneinejad – Hobbs (1995). Pengaruh beban lateral bolak-balik akibat gempa dapat diatasi dengan terbentuknya *strut* pada arah lain yang juga mengalami tekan. Apabila properti mekanik berupa dimensi dan modulus elastis dari *strut* diketahui, maka portal dinding pengisi dapat dianalisis sebagai portal terbuka (*open frame*) dengan dinding pengisi yang diwakili oleh *strut*. Sifat mekanis yang dicari dengan metode tersebut didasarkan atas kondisi keruntuhan yang bersifat nonlinier dan sekaligus diperoleh juga resistensi atau kuat nominal dari *strut*. (Dewobroto, 2005)

Dimensi *strut* berupa panjang, lebar dan tebal. Tebal *strut* adalah tebal dinding pengisi tersebut dan panjang diagonalnya adalah hasil sisi miring dari panjang dan lebar dinding pengisi. Lebar *strut* dihitung berdasarkan persamaan pada FEMA 273 (Building Seismic Safety Council, 1997). Parameter perhitungan lebar *strut* ditunjukkan pada Gambar 4.



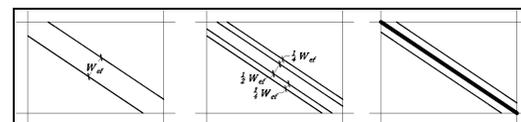
Gambar 4. Parameter perhitungan lebar *equivalent diagonal strut*

$$\lambda_n = \sqrt{\frac{E_s \cdot t \cdot \sin 2\theta}{4 \cdot E_c \cdot I_c \cdot H_i}} \dots \dots \dots (1)$$

$$W_{ef} = 0,175 \cdot (\lambda_n \cdot H)^{-0,4} \cdot \sqrt{H^2 + L^2} \dots \dots \dots (2)$$

adalah tinggi dari kolom terhitung dari as ke as tingkat, dan merupakan modulus elastisitas kolom dan modulus elastisitas pasangan dinding pengisi. Sedangkan θ adalah tinggi dan tebal dari dinding pengisi dan θ sudut yang dibentuk antara *strut* dengan balok, diperhitungkan dalam satuan radian.

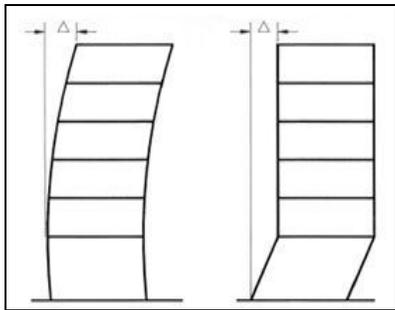
Sebuah *strut* dengan lebar W_{ef} dan tebal t memiliki luasan penampang A_s . Kemudian dibagi menjadi tiga buah dengan pembagian luas penampang untuk diagonal pertama pada bagian tengah setengah dari W_{ef} , sedangkan diagonal di kiri dan kanannya seluas seperempat A_s . Model multi *strut* seperti ini disarankan oleh Chrysostomou (Asteris, 2008). Model seperti ini dipilih sebagai model yang paling tepat untuk memperhitungkan distribusi gaya dari balok dan kolom pada dinding. (Bell & Davidson, 2001) dan (Vaseva, 2009)



Gambar 5. Pemodelan multi *strut*
 (a) *Strut* tunggal, (b) Pembagian luas penampang *strut* tunggal, (c) Model multi *strut*

Mekanisme *Soft Story*

Keruntuhan tingkat lunak (*soft story*) merupakan keruntuhan yang mengindikasikan reduksi kekakuan lateral dibandingkan kekakuan lateral lantai-lantai di atasnya. Keruntuhan ini dapat terjadi pada semua lantai, tetapi umumnya sangat kritis terjadi pada lantai dasar karena gaya yang terbesar terjadi di lantai ini, dimana terjadi diskontinu kekuatan dan kekakuan struktur pada sambungan dengan lantai kedua. Kondisi diskontinu dapat disebabkan oleh struktur pada lantai dasar lebih lemah dibandingkan di atasnya atau lebih lentur sehingga menghasilkan deformasi lateral akibat gempa yang sangat besar pada lantai dasar sehingga beban terkonsentrasi pada sambungan dengan lantai dua. (Ikhsansaleh, 2010)



Gambar 6. Keruntuhan daktail dan keruntuhan tingkat lunak
Sumber: Ikhsansaleh, 2010

Pada Tabel 11 poin 1a SNI 1726:2012 diatur ketentuan mengenai pemeriksaan *soft story* yaitu dimana ketidakberaturan struktur vertikal tidak berlaku jika tidak ada rasio simpangan (*drift ratio*) antar lantai akibat gaya seismik lateral disain yang nilainya lebih besar dari 130 persen rasio simpangan antar lantai tingkat di atasnya.

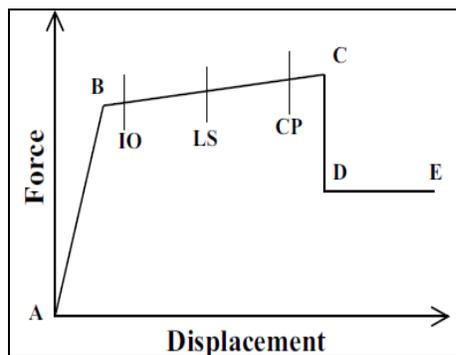
Analisis *Pushover*

Analisis statik non linier *Pushover* menurut ATC-40 (California Seismic Safety Commission, 1996) adalah suatu analisis statik non linier dimana pengaruh gempa rencana terhadap struktur bangunan gedung dianggap sebagai beban-beban statis

yang bekerja pada pusat massa masing-masing lantai, yang nilainya ditingkatkan secara berangsur-angsur sampai melampaui pembebanan yang menyebabkan terjadinya pelelehan (sendi plastis) pertama di dalam struktur bangunan gedung, kemudian dengan peningkatan beban lebih lanjut mengalami perubahan bentuk pasca elastis yang besar sampai mencapai kondisi plastis. Analisis dilakukan dengan memberikan suatu pola beban lateral statis pada struktur, yang kemudian ditingkatkan secara bertahap sampai suatu perpindahan target, kemudian menghasilkan kurva *Pushover*. (Utomo, Susanto, Tujono, & Wibowo, 2012)

Sendi Plastis Balok dan Kolom

Pada elemen kolom menggunakan tipe sendi *default* P-M2-M3, dengan pertimbangan bahwa elemen kolom terdapat hubungan gaya aksial dengan momen (diagram interaksi P-M). Sedangkan untuk elemen balok menggunakan *default* V2 dan *default* M3, dengan pertimbangan bahwa balok efektif menahan gaya geser pada sumbu lemah dan momen terhadap arah sumbu kuat, sehingga diharapkan sendi plastis terjadi pada balok. Sendi diasumsikan terletak pada masing-masing ujung pada elemen balok dan kolom. (Wibowo, Purwanto, & Yanto, 2010)



Gambar 7. Model sendi plastis untuk balok dan kolom
Sumber: CSI, 2007

Hubungan gaya dengan perpindahan ditampilkan pada Gambar 6 menunjukkan model sendi plastis menurut FEMA 356.

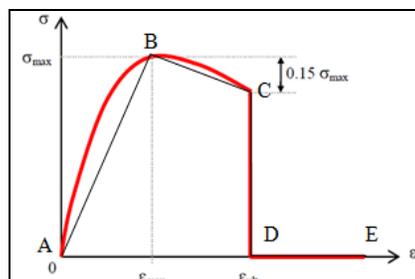
Grafik tersebut juga berlaku untuk hubungan momen dengan rotasi. *Hinge properties* yang digunakan dianalisis dengan program SAP2000 pada fitur *automatic hinge*, sesuai material dan *acceptance criteria* yang digunakan. *Acceptance criteria* pada Table 6-7 dan 6-8 FEMA 356 adalah untuk balok dan kolom dengan material beton.

Pada program SAP2000, warna untuk setiap kondisi sendi plastis adalah sebagai berikut :

- A: awal pembebanan, belum terbentuk sendi plastis.
- B: batas elastis, sendi plastis pertama terbentuk dalam warna merah muda. ●
- IO: *Immediate Occupancy*, sendi plastis terbentuk dalam warna biru tua. ●
- LS: *Life Safety*, sendi plastis terbentuk dalam warna biru muda. ●
- CP: *Collapse Prevention*, sendi plastis terbentuk dalam warna hijau. ●
- C: *Collapse*, sendi plastis terbentuk dalam warna kuning. ●
- D: *residual point*, sendi plastis terbentuk dalam warna oranye. ●
- E: runtuh, sendi plastis terbentuk dalam warna merah. ●

Sendi Plastis Strut

Pada elemen *strut* yang dimodel sebagai *truss*, pendefinisian sendi plastis dengan program SAP2000 dinyatakan dalam hubungan tegangan-regangan material. Untuk membatasi deformasi pasca puncak, diberikan kondisi *ultimate* pada hubungan tegangan-regangan material yaitu tercapainya regangan pada saat tegangan mengalami penurunan sebesar 15% terhadap tegangan maksimum. Setelah mencapai regangan *ultimate*, element *truss* dianggap tidak berkontribusi terhadap kekakuan struktur. Untuk mengakomodasi asumsi tersebut, dilakukan perpanjangan kurva tegangan regangan yaitu untuk regangan yang lebih besar dari regangan *ultimate* nilai tegangan adalah nol, ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Hubungan tegangan-regangan tipikal material dinding pengisi
 Sumber: Tjahjanto & Imran, 2009

Pada program SAP2000 nilai dari A, B, C, D, dan E dimasukkan dengan mendefinisikan *hinges properties* berupa hubungan tegangan-regangan dengan memasukkan nilai tersebut sesuai dengan tegangan dan regangan material. Posisi dari sendi plastis dianggap terjadi pada tengah bentang *strut*.

Hasil analisis *Pushover* berupa kurva *Pushover*, skema kelelahan, level kinerja dan daktilitas aktual. Kurva *Pushover* menyatakan hubungan gaya geser dasar yang bekerja pada struktur dengan perpindahan atap yang terjadi. Skema kelelahan merupakan mekanisme terjadinya sendi plastis untuk setiap langkah peningkatan beban lateral. Level kinerja diperoleh dengan menentukan perpindahan target dimana metode yang digunakan untuk menghitung perpindahan target adalah *Coefficient Method* FEMA 356 yang parameternya disesuaikan dengan SNI 1726:2012.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dimensi Elemen Struktur dan Lebar Strut

Dimensi elemen struktur hasil desain menggunakan SAP2000 berdasarkan ketentuan SNI 03-2847-2002 ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Dimensi elemen struktur

Lt.	Kolom (mm)	Balok Induk (mm)	Balok Anak (mm)	Pelat (mm)
4	300 × 300	250 × 350	150 × 300	100

3	300 × 300	300 × 400	150 × 300	120
2	350 × 350	300 × 400	150 × 300	120
1	350 × 350	300 × 400	150 × 300	120

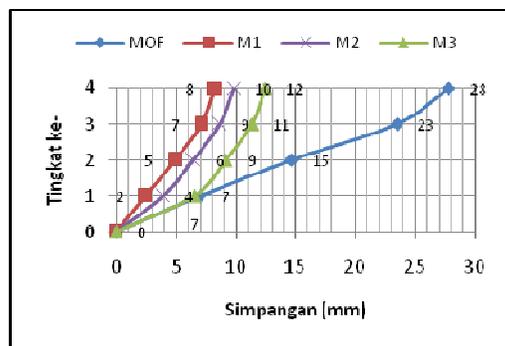
Lebar *strut* yang dihitung dengan persamaan (1) dan (2) ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Lebar *strut*

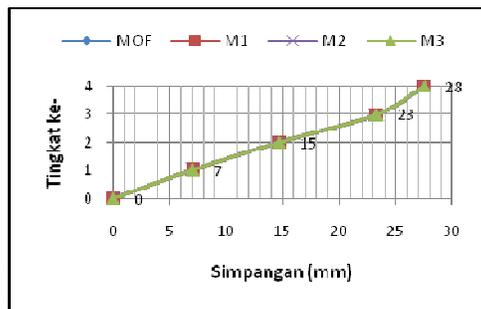
Lt.	1/2	1/4
(mm)	(mm)	(mm)
1, 2	765	382,5
3	719	359,5
4	720	360

Simpangan Antar Tingkat

Perbandingan simpangan struktur pada arah X ditampilkan pada Gambar 8, dan untuk arah Y ditampilkan pada Gambar 9.



Gambar 9. Simpangan struktur arah X pada portal D akibat D+L+Ex



Gambar 10. Simpangan struktur arah Y pada portal D akibat D+L+Ey

Gambar 9 menunjukkan simpangan atap model MOF pada arah X merupakan yang terbesar dari model lainnya yaitu 28

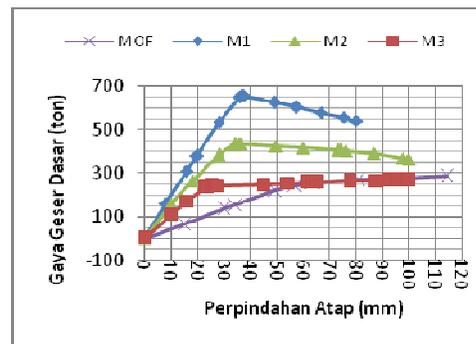
mm. Pada model M1 yang merupakan *full infilled-frame*, simpangan pada atap yang terjadi sebesar 8 mm, hanya 28,57% dari simpangan MOF. Jika dinding pengisi pada lantai dasarnya dikosongkan (model M3), simpangan atap yang terjadi membesar 1,5 kali dari model M1 yaitu sebesar 12 mm. Pada M2 dimana dinding pengisi pada lantai dasar hanya terdapat pada ujung-ujung dan bagian tengah gedung, simpangan yang terjadi sebesar 10 mm, membesar 1,25 kali dari model M1.

Untuk simpangan arah Y yang ditampilkan pada Gambar 10 memperlihatkan grafik simpangan model MOF, M1, M2 dan M3 yang berimpit. Portal memanjang dari keempat model merupakan *open frame* sehingga simpangan pada atapnya relatif sama yaitu sebesar 28 mm.

Simpangan antar tingkat keempat model menunjukkan bahwa model M2 dan M3 mengalami *soft story*. Rasio simpangan lantai dasar dengan lantai ke-2 kedua model tersebut melebihi 130%, yaitu sebesar 157% pada M2 dan 249% pada M3. Rasio simpangan pada model struktur M1 dan MOF sebesar 101% dan 92%, sehingga tidak termasuk dalam kategori *soft story*.

Kurva Pushover

Kurva *Pushover* menunjukkan hubungan antara gaya geser dasar dengan perpindahan atap. Kurva *Pushover* akibat PUSH X untuk model MOF, M1, M2 dan M3 ditampilkan pada Gambar 11 dan akibat PUSH Y untuk keempat model tersebut ditampilkan pada Gambar 12.



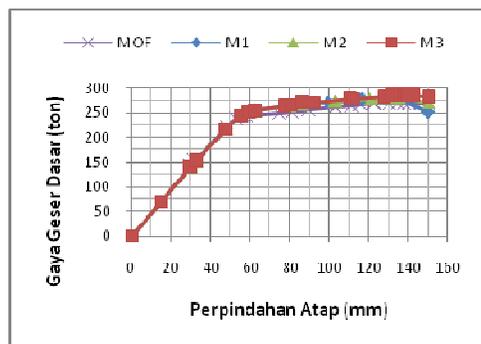
Gambar 11. Kurva *Pushover* model MOF, M1, M2 dan M3 akibat PUSH X

Dari Gambar 11 dapat dilihat M1 yang merupakan struktur *full-infilled frame*, mampu menerima beban lateral maksimum sampai dengan 658 ton dengan perpindahan atap sebesar 37 mm.

Model M2, struktur dengan penempatan dinding lantai dasarnya dikosongkan sebagian, menerima beban lateral maksimum sampai dengan 437 ton dengan perpindahan atap sebesar 36 mm. Dapat diamati beban maksimum yang mampu diterima M2 tidak sebesar yang dicapai M1 karena penempatan dinding lantai dasar yang tidak sepeuh M1.

Model M3 yang pada lantai dasarnya tanpa dinding, mampu menerima beban lateral sebesar 237 ton dengan perpindahan atap sebesar 23 mm. Pada peningkatan beban selanjutnya, struktur mengalami penurunan kekakuan yang signifikan ditunjukkan dari kemiringan kurva yang hampir datar. Saat simpangan atap mencapai 100 mm, beban yang mampu diterima hanya mengalami peningkatan 33 ton, yaitu sebesar 270 ton.

Model MOF kekakuannya merupakan yang terlemah dari ketiga model lainnya ditunjukkan dari kemiringan kurva yang paling landai. Hal ini dikarenakan tidak dimodelnya dinding sebagai *strut*. Memasuki kondisi inelastis, kekakuan struktur menurun secara signifikan dengan beban yang mampu diterima 279 ton pada simpangan atap 100 mm.



Gambar 12. Kurva *Pushover* model MOF, M1, M2 dan M3 akibat PUSH Y

Dari Gambar 12 terlihat kurva *Pushover* pada kondisi elastis dari keempat model berimpit. Struktur arah Y dari model M1, M2 dan M3 merupakan struktur *open frame* yang dinding pengisinya dianggap sebagai beban saja. Memasuki kondisi inelastis, kemampuan MOF menerima beban paling rendah dibandingkan ketiga model lainnya. Hal ini menunjukkan adanya pengaruh dari kekakuan *strut* pada portal melintang.

Evaluasi Kinerja Struktur

Hasil evaluasi kinerja struktur berupa level kinerja yang ditentukan saat struktur mencapai perpindahan targetnya ditampilkan pada Tabel 3 untuk arah X dan Tabel 4 untuk arah Y.

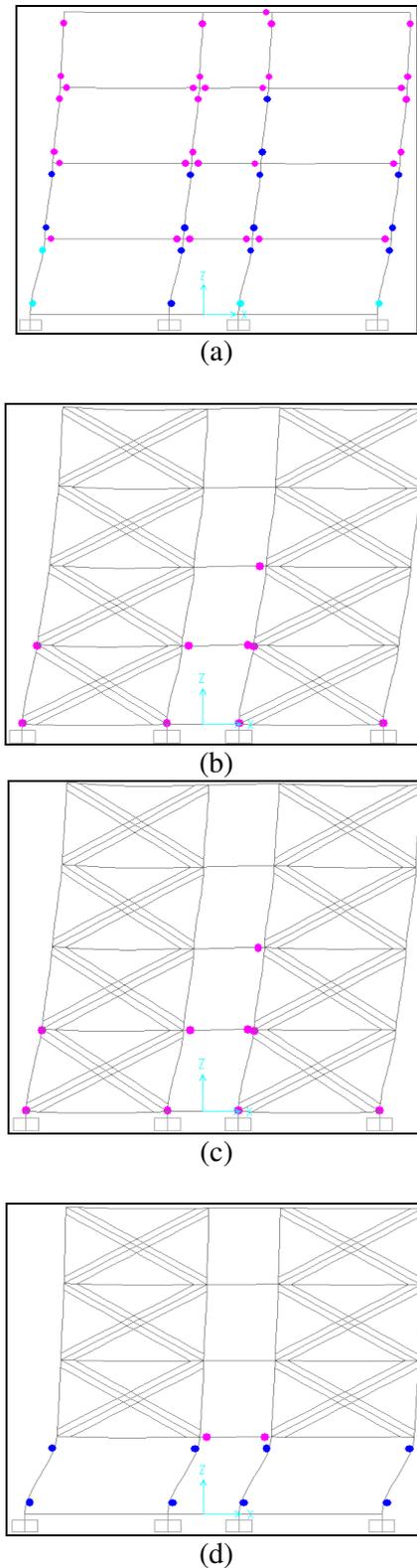
Tabel 3. Perbandingan hasil evaluasi kinerja struktur akibat PUSH X

	MOF	M1	M2	M3
(mm)	147	27	28	47
(ton)	297	517	379	251
Jumlah Sendi Plastis	236 B-IO, 67 IO-LS, 24 LS-CP	27 B-IO	26 B-IO	10 B-IO, 56 IO-LS
Level Kinerja	LS	O	O	IO

Tabel 4. Perbandingan hasil evaluasi kinerja struktur akibat PUSH Y

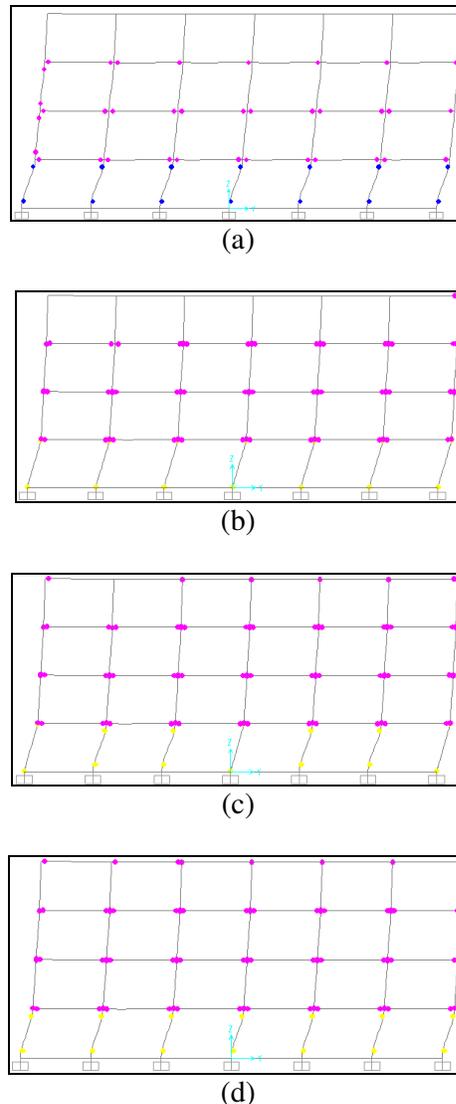
	MOF	M1	M2	M3
(mm)	88	140	140	140
(ton)	255	269	278	285
Jumlah Sendi Plastis	173 B-IO, 56 IO-LS	272 B-IO, 56 C-D	285 B-IO, 56 C-D	294 B-IO, 56 C-D
Level Kinerja	IO	C	C	C

Kelelahan struktur saat mencapai perpindahan target hasil analisis *Pushover* dapat dilihat pada Gambar 13 dan Gambar 14.



Gambar 13. Kelelahan struktur pada portal G saat mencapai perpindahan target akrobat PUSH X

(a) MOF, (b) M1, (c) M2, (d) M3



Gambar 14. Kelelahan struktur pada portal 4 saat mencapai perpindahan target akrobat PUSH Y

(a) MOF, (b) M1, (c) M2, (d) M3

Daktilitas Aktual Struktur

Daktilitas aktual struktur dapat dihitung dari hasil analisis *Pushover* dengan membandingkan simpangan struktur pada kondisi di ambang keruntuhan dengan simpangan struktur pada saat terjadinya leleh pertama. Nilai daktilitas () yang direncanakan sebesar 5 dengan faktor kuat lebih () berdasarkan SNI 03-1726-2002 sebesar 1,6 sehingga faktor reduksi gempa () adalah sebesar

8. Nilai daktilitas aktual struktur ditampilkan pada Tabel 5 dan Tabel 6.

Tabel 5. Daktilitas aktual struktur arah X

Model	μ_d		R
MOF	34	157	4,6
M1	20	57	2,9
M2	18	50	2,8
M3	23	78	3,4

Tabel 6. Daktilitas aktual struktur arah Y

Model	μ_d		R
MOF	32	103	3,2
M1	33	117	3,6
M2	33	126	3,8
M3	33	128	3,9

SIMPULAN DAN SARAN

Simpulan

Dari hasil analisis di atas diperoleh kesimpulan sebagai berikut.

- Dari simpangan atap, diperoleh bahwa struktur rangka dinding pengisi lebih kaku dari struktur rangka terbuka dengan simpangan MOF merupakan yang terbesar sebesar 28 mm, 3,5 kali lebih besar dari simpangan atap M1 yaitu 8 mm. Simpangan M2 dan M3 berturut-turut 10 mm dan 12 mm, lebih besar 1,25 dan 1,5 kali dari M1.
- Dari simpangan antar tingkat, struktur M2 dan M3 mengalami mekanisme *soft story* dengan rasio simpangan lantai dasar dengan lantai ke-2 melebihi 130%, yaitu sebesar 157% pada M2 dan 249% pada M3. Pada model struktur M1 dan MOF memiliki rasio 101% dan 92%, sehingga tidak termasuk dalam kategori *soft story*.
- Kurva kapasitas untuk arah X ketiga model menunjukkan bahwa M1 memiliki kemampuan menerima beban lateral yang paling besar yaitu mencapai 658 ton. Kemudian disusul dengan M2 dengan kemampuan menerima beban lateral mencapai 437 ton, dan M3 hanya sebesar 270 ton pada simpangan atap 100 mm. MOF

memiliki kemampuan menerima beban lateral hampir sama dengan M3 yaitu 279 ton pada simpangan atap 100 mm.

- Untuk arah Y, terlihat kurva kapasitas keempat model berimpit. Namun pada kondisi inelastis, terlihat kurva MOF memiliki kemampuan menerima beban lateral maksimum yang paling rendah dibanding M1, M2 dan M3. Hal ini menunjukkan adanya pengaruh kekakuan *strut* arah melintang terhadap struktur arah memanjang.
- Dari perbandingan hasil evaluasi kinerja struktur arah X, berdasarkan jumlah sendi plastis yang terjadi pada perpindahan targetnya, M1 dan M2 memiliki level kinerja yang sama yaitu O (operasional). Sedangkan M3 dan MOF masing-masing memiliki level kinerja IO (*Immediate Occupancy*) dan LS (*Life Safety*). Pada arah Y, ketiga model *infilled frame* sama-sama mencapai level kinerja C (*collapse*), sedangkan MOF mencapai level kinerja IO. Dapat diamati pula bahwa sendi plastis pada elemen-elemen struktur lebih dahulu terjadi daripada *strut*.
- Nilai daktilitas aktual struktur untuk arah X model MOF, M1, M2 dan M3 berturut-turut 4,6; 2,9; 2,8; 3,4. Sedangkan untuk arah Y keempat model berturut-turut 3,2; 3,6; 3,8; 3,9. Nilai daktilitas aktual seluruh model tidak mencapai nilai daktilitas yang direncanakan yaitu $\mu = 5$.
- Pemodelan dinding pengisi pada struktur akan meningkatkan kekakuan lateral struktur. Di samping itu, mekanisme *soft story* bisa dideteksi dengan memodel dinding yang penempatannya tidak beraturan.

Saran

Perlu adanya studi mengenai perilaku dan kinerja struktur rangka dinding pengisi berlubang karena kenyataannya pada bangunan gedung terdapat pintu dan jendela yang merupakan bukaan pada dinding pengisi. Pada studi analisis ini, dinding berlubang hanya dianggap sebagai

beban karena metode pemodelan dinding pengisi dengan *equivalent diagonal strut* tidak tepat untuk memodelkan dinding dengan bukaan tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

- American Society of Civil Engineers. (2000). *Prestandard and Commentary for The Seismic Rehabilitation of Buildings (FEMA 356)*. Washington D.C.: FEMA.
- Asteris, P. G. (2008). Finite Element Micro-Modelling of Infilled Frames. *Electronic Journal of Civil Engineering*.
- Badan Standardisasi Nasional. (2012). *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung (SNI 1726:2012)*. Jakarta: BSN.
- Badan Standardisasi Nasional. (2002). *Tata Cara Perencanaan Struktur Beton Bertulang untuk Bangunan Gedung (SNI 03-2847-2002)*. Jakarta: BSN.
- Bell, D. K., & Davidson, B. J. (2001). Evaluation of Earthquake Risk Building with Masonry Infill Panels. *NZSEE 2001 Conference*. Auckland.
- Building Seismic Safety Council. (1997). *NEHRP Guidelines for The Seismic Rehabilitation of Buildings (FEMA 273)*. Washington D.C.: FEMA.
- California Seismic Safety Commission. (1996). *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings (ATC-40)*. Redwood City: ATC.
- Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah. (2002). *Standar Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung (SNI 03-1726-2002)*. Bandung: Puskim.
- Dewobroto, W. (2005). Analisa Inelastis Portal - Dinding Pengisi dengan "Equivalent Diagonal Strut". *Jurnal Teknik Sipil ITB*.
- Dewobroto, W. (2005). Evaluasi Kinerja Struktur Baja Tahan Gempa dengan Analisa Pushover. *Civil Engineering National Conference, 17-18 Juni 2005*. Semarang: Unika Soegijapranata.
- Direktorat Penyelidikan Masalah Bangunan. (1983). *Peraturan Pembebanan Indonesia untuk Gedung 1983*. Bandung: Yayasan Lembaga Penyelidikan Masalah Bangunan.
- Ikhsansaleh, D. (2010, December 10). Review Kegagalan Struktur Beton Akibat Gempa. *Console Talk FT UI: Terbaik 1*. Jakarta, DKI Jakarta, Indonesia: Teknik FT UI.
- Sukrawa, M., & Suastika, N. (2013). Design Aspect of Including Infill Wall in Reinforced Concrete Frame Design. *The 4th International Conference of EACEF, June, 26-28 2013*. Singapore: National University of Singapore.
- Tjahjanto, H. H., & Imran, I. (2009). Kajian Performance Struktur Portal Beton Bertulang dengan Dinding Pengisi. *Seminar dan Pameran HAKI*. HAKI.
- Utomo, C., Susanto, R. I., Tujono, S., & Wibowo, H. (2012). Evaluasi Struktur dengan Pushover Analysis pada Gedung Kalibata Residences Jakarta. *Jurnal Karya Teknik Sipil*.
- Vaseva, E. (2009). Seismic Analysis of Infilled R/C Frame with Implementation of A Masonry Panel Models. *11th National Congress on Theoretical and Applied Mechanism*. Borovets.
- Wibowo, Purwanto, E., & Yanto, D. (2010). Menentukan Level Kinerja Struktur Beton Bertulang Pasca Gempa. *Media Teknik Sipil*, 49-54.