

Kinerja Struktur Rangka Beton Bertulang dengan Penambahan Dinding Pengisi Berlubang sebagai Perkuatan Seismik

Ida Ayu Made Budiwati

Jurusan Teknik Sipil, Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran-Bali
E-mail: idabudiwati@gmail.com

Made Sukrawa

Jurusan Teknik Sipil, Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran-Bali
E-mail: msukrawa@yahoo.com

Abstrak

Penelitian ini dilakukan guna memperoleh model struktur rangka beton bertulang dengan dinding pengisi (RDP) berlubang, dengan dan tanpa perkuatan di sekitar lubang (lintel), sebagai perkuatan seismik, dengan membandingkan perilaku dan kinerja struktur RDP dengan berbagai rasio lubang. Pada tahap awal dilakukan validasi model dengan membandingkan perilaku struktur yang dimodel menggunakan elemen shell (RDPsh) dan strut diagonal (RDPst) dengan hasil uji laboratorium yang telah dilakukan oleh peneliti lain. Model validasi menunjukkan bahwa RDPsh menghasilkan diagram beban-simpangan lateral yang lebih mendekati hasil tes dibandingkan dengan RDPst. Disamping itu, persamaan lebar strut untuk dinding berlubang tanpa lintel tidak bisa digunakan untuk dinding berlubang dengan lintel karena lintel menambah kekakuan rangka, memperkuat dinding di sekitar lubang dan mengurangi tegangan maksimum pada sudut lubang sampai 40%. Lebar strut diagonal kemudian dimodifikasi untuk mendapatkan model yang menghasilkan respon sesuai dengan RDPsh. Kemudian model rangka beton bertulang 3, 4, dan 5 lantai dengan dinding pengisi berlubang sentris dengan lintel di sekeliling lubang dibuat dengan variasi rasio lubang 0 – 100%. Hasil analisis pada RDP 3 lantai menunjukkan bahwa, terjadi pengurangan simpangan lateral masing-masing sebesar 65%, 58%, 43%, 22%, dan 5% untuk rasio lubang 0%, 20%, 40%, 60%, dan 80%. Persentase pengurangan yang hampir sama juga terjadi pada rangka 4 dan 5 lantai. Untuk rangka 3-lantai, penambahan dinding pengisi dengan rasio lubang terbesar 60% cukup memadai untuk menahan beban gempa yang disyaratkan SNI 1726:2012. Tetapi, untuk rangka 4 dan 5 lantai, diperlukan dinding dengan rasio lubang maksimum 40%. Penambahan dinding pengisi meningkatkan kemampuan struktur dalam menahan gaya geser dasar akibat gempa. Namun demikian, peningkatan kekuatan ini disertai dengan penurunan daktilitas struktur seiring dengan menurunnya rasio lubang.

Kata-kata Kunci: Analisis kinerja, dinding pengisi berlubang, elemen shell, perkuatan seismik, strut diagonal.

Abstract

This research was conducted to develop a model of seismic retrofitting of reinforced concrete frame using infill wall with central openings, with and without lintels around the opening, by comparing the behaviour and performance of the frame structures with varying opening ratios. Prior to model the strengthened frames, validation was done by comparing the behaviour of computer models using shell element (RDPsh) and diagonal strut (RDPst) to those of laboratory tests conducted by others. The validation models show that the lateral load-displacement diagrams of RDPsh fit the test result better than the strut ones. It was also found that the strut width equation for opening without lintel can not be used for opening with lintels as the lintels stiffen the frame and strengthen the wall around the openings. Based on these results, the width of strut was modified to match the response of model using shell element with lintels around the opening. The RC frames of 3, 4, and 5 storey retrofitted using infill wall with central opening ratio varies from 0 to 100%, was then conducted by modeling the infill wall as an equivalent diagonal strut and shell elements in SAP2000 software. The analysis results of 3-storey frames show that, reduction on lateral drifts of 65%, 58%, 43%, 22%, and 5% was observed for opening ratio of 0%, 20%, 40%, 60%, dan 80%, respectively. Similar results were also found for the 4 and 5 storey frames. From the reinforcement requirements it can be concluded that the strengthening method can be applied with limitation on the wall opening ratios. For 3-storey frames, the addition of infill wall with opening ratio up to 60% is adequate to withstand the quake load specified in the SNI 1726:2012. For 4 and 5-storey frames however, opening ratio of 40% or less is required. Interestingly, the addition of infill wall with lintels can withstand higher base shear forces. However, the increased strength is followed by a decreased ductility in line with decreasing opening ratio.

Keywords: Diagonal strut, infilled frame with opening wall, performance analysis, seismic retrofitting, shell element.

1. Pendahuluan

Perkuatan seismik pada struktur yang telah dibangun biasanya dilakukan untuk tujuan tertentu. Beberapa diantaranya adalah untuk meningkatkan daktilitas, kekuatan, maupun keduanya secara bersamaan. Perubahan desain kemungkinan menjadi alasan untuk melakukan hal ini. Misalkan dalam suatu kondisi di mana diperlukannya perubahan sistem struktur dari SRPMB menjadi SRPMK sehingga dibutuhkan struktur dengan daktilitas yang lebih tinggi. Selain itu, perubahan persyaratan pembebanan juga dapat menuntut kekuatan struktur yang lebih besar. Menurut Sugano (1981, 1992) terdapat beberapa metode perkuatan seismik dengan pengaruh yang berbeda-beda diantaranya penambahan dinding, bresing, *wing wall*, dan penambahan tulangan kolom. Penambahan dinding pengisi sebagai salah satu *alternative* penerapan perkuatan di lapangan dibuat dengan cara menambah dinding pengisi di antara kolom (berupa panel dinding) dengan menambah *anchorage* dengan jarak tertentu sepanjang pertemuan dinding dan kolom. Jenis *anchorage* yang dipasang bisa berupa baja tulangan yang dibor ke dalam kolom beton.

Salah satu metode yang mudah diterapkan untuk struktur yang telah berdiri adalah dengan menambah dinding pengisi sehingga struktur yang tadinya berupa rangka terbuka (RT) menjadi rangka dengan dinding pengisi (RDP) yang sudah terbukti jauh lebih kuat dan lebih kaku (Kakaletsis and Karayannis, 2009). Namun penggunaan dinding penuh terutama pada bagian luar bangunan kemungkinan tidak dapat diterapkan jika pada bagian tersebut diperlukan akses berupa pintu maupun bentuk bukaan lain seperti jendela. Terkait dengan adanya lubang pada dinding pengisi, Sukrawa (2015) pada penelitiannya menjelaskan bahwa tegangan yang besar terjadi pada sudut dinding sehingga diperlukan perkuatan berupa kolom dan balok praktis (lintel). Sehingga perlu ditinjau penggunaan dinding pengisi berlubang dengan penambahan lintel sebagai perkuatan seismik karena dianggap banyak diterapkan di lapangan.

Banyak model RDP berlubang (RDPB) yang telah diusulkan sebagai idealisasi dari perilakunya, salah satunya metode strat diagonal yang direduksi lebarnya (Mondal and Jain, 2008, Asteris *et al.*, 2012). Metode lain yang dapat digunakan adalah model elemen *shell* dengan memperhitungkan bidang kontak dinding dengan struktur (Dorji and Thambiratnam, 2009). Namun dari kedua metode tersebut, belum ada penelitian yang secara spesifik meninjau dinding pengisi berlubang dengan lintel di sekeliling lubang. Pada penelitian ini dinding dimodel menggunakan metode strat diagonal dan elemen *shell* kemudian dibandingkan perilakunya. Setelah didapat perilaku yang sesuai kemudian dilakukan analisis kinerja pada model strat diagonal.

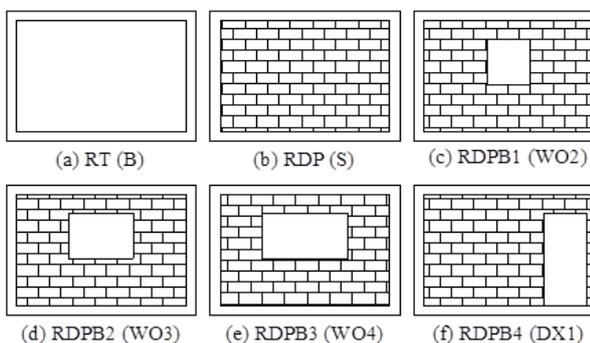
Dalam penelitian ini dibuat model struktur RDP berlubang yang sesuai dengan kondisi di Indonesia seperti sifat-sifat bahan dinding dan pemakaian kolom dan balok praktis di sekitar lubang. Pada tahap awal

akan dilakukan validasi model yaitu membandingkan model komputer dengan hasil uji laboratorium. Setelah itu dibuat model struktur beton bertulang, terdiri atas tiga bentang untuk bangunan 3, 4, dan 5 lantai, dengan variasi lubang 0, 20, 40, 60, 80, dan 100 persen.

2. Validasi Pemodelan Dinding Pengisi

Pada tahap awal dilakukan validasi model dinding pengisi dengan membandingkan model komputer dengan hasil uji laboratorium dari Kakaletsis and Karayannis (2009). Struktur yang dimodel seperti pada **Gambar 1**, berupa rangka sederhana 1 bentang dengan variasi dinding pengisi, meliputi model rangka terbuka (RT), rangka dengan dinding pengisi penuh (RDP), rangka dengan dinding berlubang sentris berupa jendela dengan rasio luas lubang masing-masing 10.4% (RDPB1), 15.8% (RDPB2), dan 20.8% (RDPB3). Disamping itu juga dibuat model rangka dengan lubang pintu eksentris 20.8% (RDPB4) untuk melihat pengaruh posisi lubang. Data material dan geometri struktur yang digunakan mengacu pada eksperimen terkait, diantaranya kolom 150/150 dengan tinggi 1150 mm, balok 100/200 dengan panjang 1350 mm, tebal dinding (t) = 60 mm, kuat tekan beton (f'_c) = 28.51 MPa dan kuat tekan material dinding pengisi (f'_m) = 5.11 MPa. Modulus elastisitas (E_c) = 23692 MPa, didapat berdasarkan SNI 2847:2013 dengan mengasumsikan berat jenis beton sebesar 2200 kg/m³.

Berdasarkan data pada eksperimen diketahui modulus elastisitas dinding pengisi (E_m) = 670.3 MPa. Jika dibandingkan dengan data penelitian lain, nilai tersebut sangat kecil sehingga untuk nilai E_m dicari dengan menggunakan persamaan dari FEMA 356 yaitu $550f'_m$ sehingga didapat nilai E_m = 2810 MPa.



Gambar 1. Model Validasi

Pemodelan dinding dilakukan dengan dua cara yaitu sebagai strat diagonal dan elemen *shell*. Strat diagonal merupakan elemen batang yang hanya mampu menahan gaya tekan saja. Lebar dari strat diagonal ditentukan berdasarkan persamaan dari FEMA-356 sebagai berikut:

$$a = 0.175(\lambda_1 h_{col})^{-0.4} r_{inf} \quad (1)$$

$$\lambda_1 = \left[\frac{E_{ms} t_{inf} \sin 2\theta}{4 E_{fs} I_{col} h_{inf}} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (2)$$

dengan a adalah lebar strat, h_{col} adalah tinggi kolom, r_{inf} adalah panjang diagonal dinding, E_{me} adalah modulus elastisitas dinding, t_{inf} adalah tebal dinding, θ adalah sudut dari diagonal strat, E_{fe} adalah modulus elastisitas beton struktur, I_{col} adalah inersia kolom, dan h_{inf} adalah tinggi dinding.

Ketentuan lebar strat untuk dinding berlubang, sampai saat ini belum jelas. Asteris *et al.* (2012) mengusulkan persamaan analitis berupa faktor reduksi yang dinyatakan sebagai rasio antara lebar efektif strat diagonal pada dinding pengisi berlubang dan dinding penuh yang dapat digunakan untuk menghitung kekakuan lateral awal struktur RTBB dengan dinding berlubang. Adapun faktor reduksi kekakuan dinding yang diusulkan oleh Asteris *et al.* (2012) mengikuti persamaan berikut:

$$\lambda = 1 - 2\alpha_w^{0.54} + \alpha_w^{1.14} \quad (3)$$

dengan λ adalah faktor reduksi lebar strat dan α_w adalah rasio luas lubang terhadap luas area dinding. Berdasarkan **Persamaan (1)** dan **(3)** didapat lebar strat diagonal seperti pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Lebar strat diagonal dengan faktor reduksi asteris

Kode Model	α_w	Faktor Reduksi (λ)	Lebar Strut Tereduksi (mm)
RDP	0	1	159.0
RDPB1	0.1041	0.4865	77.4
RDPB2	0.1582	0.3833	61.0
RDPB3	0.2081	0.3102	49.3
RDPB4	0.2081	0.3102	49.3

Model elemen *shell* dibuat dengan mengacu pada penelitian Dorji *and* Thambiratnam (2009), dengan bidang kontak antara dinding dengan struktur dimodel sebagai elemen gap. Kekakuan dari elemen gap dirumuskan oleh Dorji *and* Thambiratnam (2009) sebagai berikut:

$$K_g = 0.0378E_m t + 347 \quad (4)$$

dengan t adalah tebal dinding pengisi. Model elemen *shell* dengan penambahan balok dan kolom praktis (lintel) di sekeliling lubang juga dibuat untuk dibandingkan dengan model elemen *shell* tanpa lintel.

Tabel 2. Faktor reduksi EI

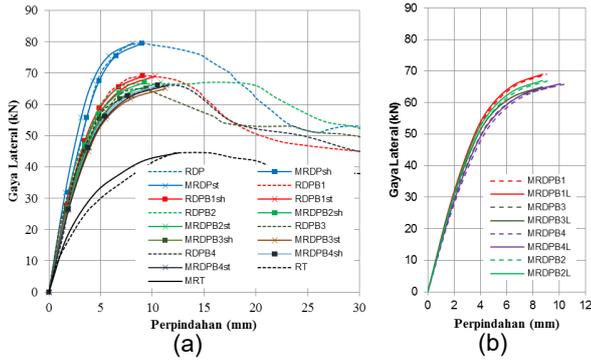
Persentase Beban (%)	Faktor Reduksi E	Faktor Reduksi I RDP		Faktor Reduksi I RDPB		Faktor Reduksi I RT	
		Kolom	Balok	Kolom	Balok	Kolom	Balok
0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
40	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.90	0.90
70	0.90	1.00	1.00	0.95	0.90	0.75	0.75
85	0.80	1.00	1.00	0.90	0.80	0.60	0.60
95	0.70	0.90	0.85	0.80	0.60	0.55	0.45
100	0.60	0.70	0.60	0.70	0.40	0.50	0.30

Dimensi penampang lintel yang digunakan disesuaikan dengan tebal dinding yaitu 60/60 menggunakan beton 10 MPa.

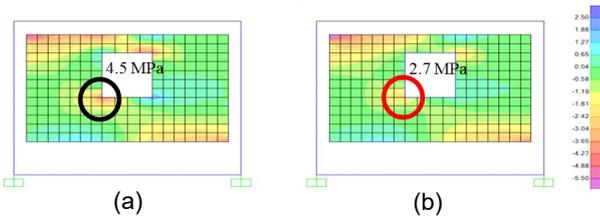
Pada penelitian Kakaletsis dan Karayannis (2009) benda uji dibebani siklik dan beban vertikal pada bagian atas kolom. Namun dalam penelitian ini beban siklik digantikan dengan beban lateral yang ditingkatkan per 10 kN secara bertahap sampai mencapai beban puncak (maksimum). Dengan memperhitungkan kenonlinieran material, modulus elastisitas direduksi secara bertahap sesuai dengan diagram tegangan regangan beton maupun dinding dan tingkat bebannya. Modulus dihitung sebagai *secant modulus*. Retak pada penampang struktur juga diperhitungkan dengan mereduksi inersia dari masing-masing penampang. Faktor reduksi E dan I yang digunakan mengacu data pada SNI 2847:2013, ditampilkan pada **Tabel 2**. Data tersebut juga disesuaikan dengan hasil pengujian laboratorium Kakaletsis dan Karayannis (2009).

Hasil berupa kurva gaya dan perpindahan model dibandingkan dengan hasil eksperimen seperti pada **Gambar 2(a)**. Hasil eksperimen Kakaletsis dan Karayannis (2009) diplot sebagai *outer bound* hasil pengujian spesimennya yang dibebani beban siklik. Berdasarkan perbandingan tersebut terlihat bahwa model strat menunjukkan perilaku yang tidak sama dengan elemen *shell*. Jika dibandingkan dengan model elemen *shell*, model strat menunjukkan respon yang lebih kaku pada model dinding penuh. Namun pada model dinding berlubang responnya menjadi lebih lemah. Hal ini disebabkan oleh faktor reduksi pada **Persamaan (3)** yang belum mampu memberikan hasil yang sesuai. Pada **Gambar 2(b)** ditampilkan kurva gaya-perpindahan model elemen *shell* dengan dan tanpa lintel. Berdasarkan perbandingan tersebut terlihat bahwa model dengan lintel memberikan respon yang sedikit lebih kaku dibandingkan model tanpa lintel. Pengaruh penambahan lintel juga terlihat pada tegangan yang terjadi di sudut lubang seperti pada **Gambar 3**. Tegangan tekan pada sudut lubang berkurang sekitar 40% akibat penambahan lintel.

Pada penelitian terdahulu (Sukrawa, 2015) sudah dilakukan validasi model RDP berlubang WO4 dan menunjukkan hasil yang serupa dengan WO3 yaitu model dengan lintel memiliki tegangan lebih kecil pada bagian sudut lubang dibandingkan model tanpa lintel.



Gambar 2. Kurva gaya-perpindahan (a) Model strat, shell, dan eksperimen dan (b) Model shell dengan dan tanpa lintel



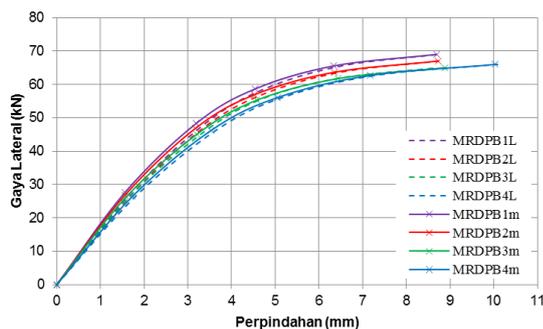
Gambar 3. Kontur tegangan pada dinding (a) Model shell tanpa lintel (b) Model shell dengan lintel

Dari hasil perbandingan antara model strat dan shell yang menunjukkan bahwa faktor reduksi lebar strat memberikan hasil yang lebih lemah dan untuk memodel pengaruh penambahan lintel pada model strat, maka lebar strat dimodifikasi. Lebar strat yang ditampilkan pada Tabel 3 ini dibuat dengan memodifikasi lebar strat agar memberikan respon yang serupa dengan model shell dengan lintel. Pada Gambar 4 ditampilkan kurva gaya-perpindahan dari model strat yang disesuaikan dengan model elemen shell dengan lintel.

Tabel 3. Lebar strat DPB dengan lintel dimodifikasi dari model DPB tanpa lintel

Kode Model	Rasio Lubang (%)	Lebar Strat Modifikasi (mm)	(%)
RDP	-	159.0	100
RDPB1	10.41	114.5	72
RDPB2	15.82	106.5	67
RDPB3	20.81	95.4	60
RDPB4	20.81	*73.1	46

* model lubang eksentris menunjukkan respon yang lebih lemah dari model lubang sentris



Gambar 4. Kurva gaya-perpindahan model shell dengan lintel dan strat modifikasi

3. Model Struktur Bertingkat

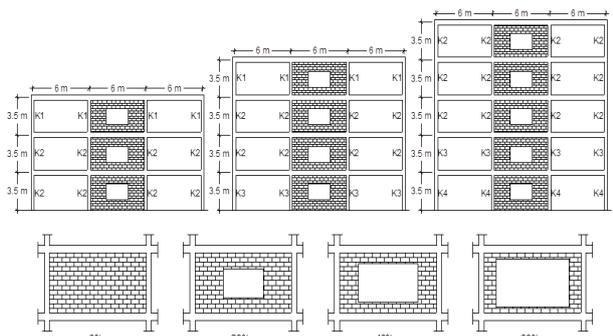
Model struktur beton bertulang 3 bentang dengan variasi tingkat 3, 4, dan 5 dibuat dan didesain dengan perencanaan gempa SNI 1726:2002 dengan menggunakan beban auto load UBC 97 yang tersedia pada program SAP2000. Struktur didesain sebagai sistem rangka pemikul momen biasa (SRPMB) yang berada pada wilayah gempa 5 dengan tanah keras. Material yang digunakan adalah beton dengan $f'_c = 25$ MPa Dimensi struktur yang digunakan seperti pada Gambar 5 dan dengan menggunakan dimensi kolom sebagai berikut:

1. Kolom K1 (250/250).
2. Kolom K2 (300/300).
3. Kolom K3 (350/350).
4. Kolom K4 (400/400).
5. Balok 250/400 pada semua tingkat.

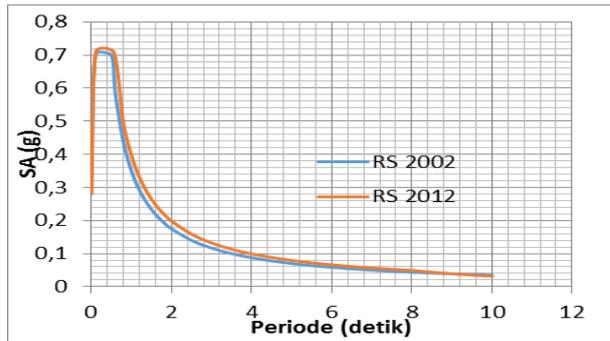
Analisis berdasarkan perencanaan gempa SNI 1726:2012 dengan menggunakan beban auto load IBC 2009 kemudian dilakukan pada struktur yang sama. Dengan mendesain struktur sebagai sistem rangka pemikul momen khusus (SRPMK), diketahui bahwa struktur mengalami tegangan berlebihan. Perbandingan kurva respons spectra gempa berdasarkan SNI 1726:2002 dan SNI 1726:2012 dapat dilihat pada Gambar 6.

Penambahan dinding pengisi dilakukan pada bentang tengah dengan memodel dinding sebagai elemen shell dengan lintel dan strat diagonal. Material dinding berupa pasangan bata dengan $f'_m = 3$ MPa memiliki tebal 150 mm. Sementara material lintel berupa beton dengan $f'_c = 10$ MPa memiliki dimensi penampang 150/150.

Analisis kinerja kemudian dilakukan pada model strat diagonal. Pushover non-linear static analysis dilakukan dengan beban dorong yaitu beban gravitasi dan beban lateral menggunakan *uniform acceleration*. *Displacement-controlled* dipilih dalam analisis dengan menetapkan target perpindahan. *Hinge properties* yang diinput yaitu *deformation controlled Moment M3 tipe Moment-Rotation* untuk balok; *deformation control Axial P* untuk strat dengan tipe *force-displacement*, sedangkan untuk kolom dipilih *Interacting P-M3*. Hasil dari analisis pushover berupa kurva perbandingan antara gaya lateral dengan perpindahan yang terjadi pada struktur dan mekanisme terjadinya sendi plastis pada tiap elemen struktur.



Gambar 5. Dimensi struktur bertingkat dan variasi rasio lubang pada dinding pengisi



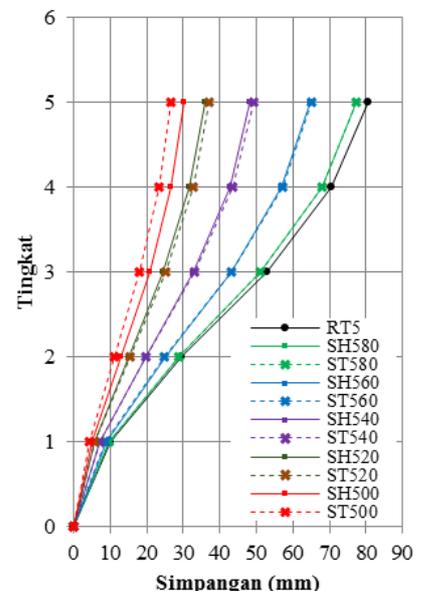
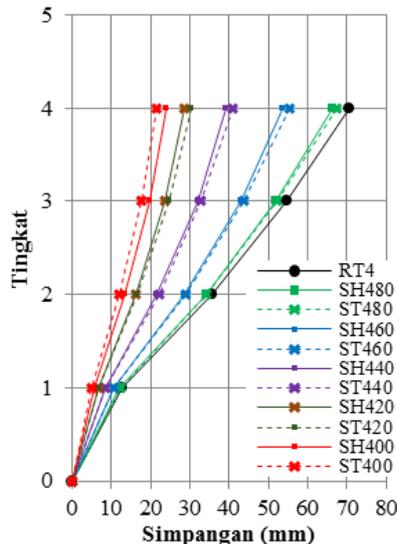
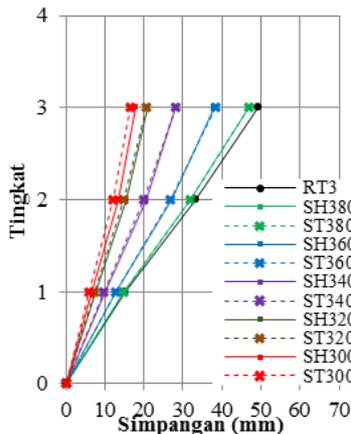
Gambar 6. Kurva respon spektra gempa SNI 2002 dan SNI 2012

4. Hasil dan Pembahasan

Seperti pada model validasi, model strat diagonal dimodifikasi agar memiliki respon yang serupa dengan model elemen *shell* dengan lintel. Lebar strat diagonal yang telah dimodifikasi ditampilkan pada Tabel 4. Hasil berupa simpangan pada masing-masing tingkat ditampilkan pada Gambar 7. Dari simpangan puncak dapat dibandingkan pengaruh penambahan dinding pengisi dengan variasi rasio lubang terhadap struktur RT. Perbandingan simpangan rata-rata model strat dan *shell* dengan model rangka terbuka ditampilkan pada Tabel 5.

Tabel 4. Lebar strat modifikasi

Persentase Lubang (%)	Lebar Strat (mm) pada Kolom				(%)
	K1	K2	K3	K4	
0%	620.2	662.2	699.1	732.0	100.0
20%	325.6	347.7	367.0	384.3	52.5
40%	170.6	182.1	192.3	201.3	27.5
60%	62.0	66.2	69.9	73.2	10.0
80%	10.5	11.3	11.9	12.4	1.7

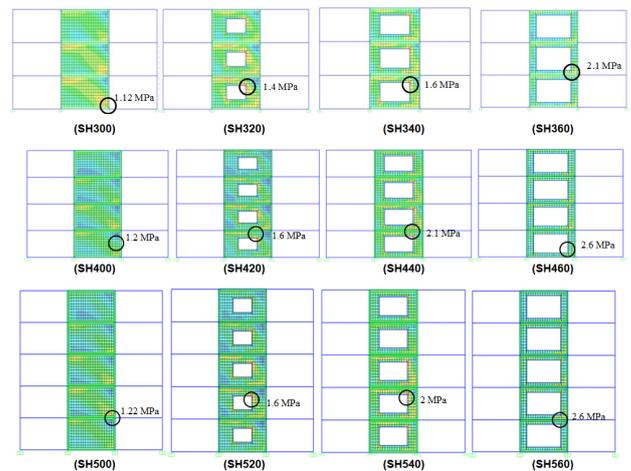


Gambar 7. Simpangan masing-masing tingkat

Tabel 5. Perbandingan simpangan model RDPB dengan RT

Jumlah Tingkat	Persentase Pengurangan Simpangan (%)					
	0%	20%	40%	60%	80%	100%
3	65	58	43	22	5	0
4	68	58	43	23	5	0
5	65	55	40	20	4	0

Tegangan tekan maksimum yang terjadi pada dinding menjadi semakin besar jika rasio lubangnya bertambah, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8. Pada Tabel 6 juga terlihat bahwa tegangan pada rasio lubang yang sama tidak jauh berbeda antara model 3, 4, dan 5 tingkat. Secara keseluruhan, tegangan tekan yang terjadi belum melewati batas kuat tekan material dinding pengisi.



Gambar 8. Kontur tegangan dan tegangan tekan maksimum dinding model rangka 3, 4, dan 5 tingkat

Tabel 6. Tegangan tekan (MPa) maksimum pada dinding

Portal Tingkat	Rasio Lubang				
	0%	20%	40%	60%	80%
3	1.1	1.4	1.6	2.1	0.9
4	1.2	1.6	2.1	2.6	1.1
5	1.2	1.6	2.0	2.6	1.1

Penambahan dinding pengisi juga memengaruhi kebutuhan tulangan dari masing-masing elemen struktur. Kebutuhan tulangan pada kolom seperti pada **Tabel 7, 8, dan 9** didapat berdasarkan analisis beban gempa rencana SNI 1726:2012, sementara tulangan terpasang diambil dari kebutuhan tulangan dari desain SNI 1726:2002. Berdasarkan perbandingan dari kedua analisis terlihat bahwa luas tulangan yang dibutuhkan oleh model dengan rasio lubang 80% telah melebihi luas tulangan terpasang. Model dengan rasio lubang 60% juga memiliki kebutuhan tulangan yang lebih besar pada model 4 dan 5 tingkat.

Tabel 7. Perbandingan luas tulangan kolom model 3 tingkat

Tingkat	Tulangan Terpasang (mm ²)	Tulangan Perlu (mm ²)					
		ST300	ST320	ST340	ST360	ST380	RT3
1	3132	900	900	900	2268	3708	4122
2	2682	1332	1395	1575	2259	2979	3231
3	3338	1100	1275	1650	2431	3544	3794

Tabel 8. Perbandingan luas tulangan kolom model 4 tingkat

Tingkat	Tulangan Terpasang (mm ²)	Tulangan Perlu (mm ²)					
		ST400	ST420	ST440	ST460	ST480	RT4
1	1752	1225	1225	1225	1874	3038	3369
2	2826	900	900	1404	2385	3960	4608
3	2565	1341	1449	1611	2349	3123	3384
4	3213	1213	1444	1744	2475	3525	3763

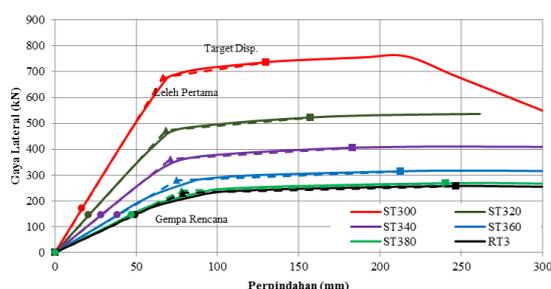
Tabel 9. Perbandingan luas tulangan kolom model 5 tingkat

Tingkat	Tulangan Terpasang (mm ²)	Tulangan Perlu (mm ²)					
		ST500	ST520	ST540	ST560	ST580	RT5
1	1600	1600	1600	1600	1696	2352	2480
2	1225	1225	1225	1225	1225	2315	2805
3	2691	900	900	1440	2403	3888	4536
4	2178	900	1233	1458	1899	2682	2970
5	1917	1449	1503	1566	1737	2079	2178

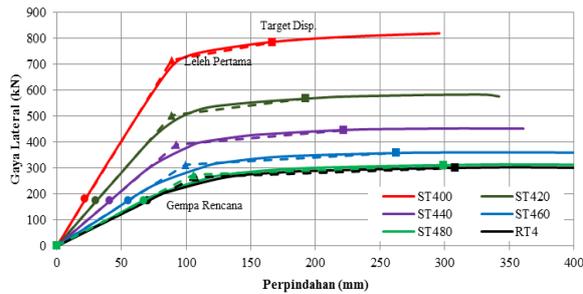
Dari hasil analisis kinerja didapat kurva seperti pada **Gambar 9, 10, dan 11**. Jika dibandingkan antara target displacement masing-masing model, terlihat bahwa model dengan rasio lubang 80% memberikan pengaruh yang kecil terhadap kinerja struktur. Dari ketiga model juga dapat dilihat bahwa tinggi tingkat memengaruhi efektivitas dinding. Perbandingan beban puncak pada model dinding penuh terhadap model RT yaitu 187%, 162%, dan 152% berturut-turut untuk model 3, 4, dan 5 tingkat. Hal tersebut menandakan semakin tinggi suatu struktur, maka semakin berkurang pengaruh dinding pengisi dalam meningkatkan kekuatan struktur.

Perbandingan antara gaya lateral gempa rencana dengan leleh pertama menunjukkan bahwa penurunan rasio lubang dapat meningkatkan kekuatan struktur. Pada model 3 tingkat, peningkatan kekuatan struktur berdasarkan perbandingan gempa rencana dengan leleh pertama dari rasio lubang 100% sampai 0% berturut-turut adalah 0%, 4%, 22%, 58%, 107%, dan 149%. Sementara untuk model 4 dan 5 tingkat berturut-turut 0%, 4%, 18%, 48%, 90%, 157%, dan 0%, 3%, 17%, 46%, 84%, 150%

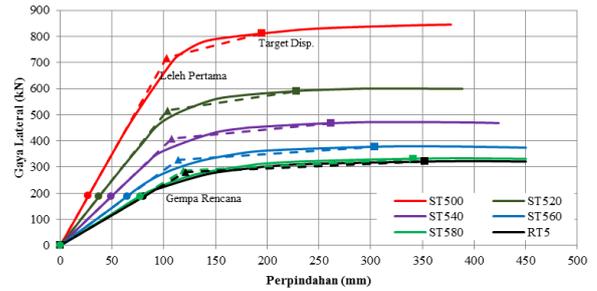
Daktilitas struktur dapat diketahui dengan membandingkan simpangan maksimum atau pada saat menjelang runtuh dengan simpangan pada saat leleh pertama. Namun karena pada kurva pushover tidak didapatkan simpangan maksimum yang jelas, maka daktilitas dicari dengan membandingkan simpangan pada target displacement dengan simpangan pada leleh pertama seperti yang ditampilkan pada **Tabel 10**. Pada tabel terlihat bahwa semakin kecil rasio lubang pada dinding maka semakin kecil pula daktilitas strukturnya.



Gambar 9. Kurva pushover model 3 tingkat



Gambar 10. Kurva pushover model 4 tingkat



Gambar 11. Kurva pushover model 5 tingkat

Tabel 10. Daktilitas struktur

Portal Tingkat	Persentase Lubang					
	0%	20%	40%	60%	80%	100%
simpangan leleh pertama (mm)	66.4	68.3	71.0	74.8	77.8	78.5
3 simpangan target displacement (mm)	129.8	157.0	182.9	213.0	240.3	246.8
Daktilitas	2.0	2.3	2.6	2.8	3.1	3.1
simpangan leleh pertama (mm)	88.9	88.8	92.3	99.6	105.7	107.2
4 simpangan target displacement (mm)	166.6	192.5	222.1	262.7	299.5	308.0
Daktilitas	1.9	2.2	2.4	2.6	2.8	2.9
simpangan leleh pertama (mm)	102.9	103.7	107.7	114.1	119.0	121.1
5 simpangan target displacement (mm)	194.9	228.2	262.2	304.4	341.5	352.7
Daktilitas	1.9	2.2	2.4	2.7	2.9	2.9

5. Kesimpulan

Dari analisis yang telah dilakukan dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Diagram beban-simpangan lateral yang diperoleh dari model validasi menggunakan elemen *shell* lebih mendekati diagram hasil uji laboratorium dibandingkan dengan menggunakan model strat diagonal. Penambahan lintel di sekeliling lubang mampu menambah kekakuan rangka dan mengurangi tegangan maksimum pada sudut lubang sampai 40%.
2. Pada rangka 3 lantai, penambahan dinding pengisi berlubang menghasilkan penurunan simpangan masing-masing sebesar 65%, 58%, 43%, 22%, dan 5% untuk rasio lubang 0%, 20%, 40%, 60%, dan 80%. Persentase pengurangan yang hampir sama juga terjadi pada rangka 4 dan 5 lantai.
3. Dari kebutuhan tulangan pada rangka 3-lantai, penambahan dinding pengisi dengan rasio lubang sampai dengan 60% sudah memadai untuk menahan beban gempa yang disyaratkan dalam SNI 1726:2012. Sedangkan pada rangka 4 dan 5 lantai, diperlukan penambahan dinding dengan rasio lubang maksimum 40%.
4. Analisis *push over* menunjukkan bahwa penambahan dinding pengisi meningkatkan kemampuan struktur dalam menahan gaya geser dasar akibat gempa. Namun demikian, peningkatan kekuatan ini disertai dengan penurunan daktilitas struktur seiring dengan menurunnya rasio lubang.

6. Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini terlaksana dengan biaya dari DIPA PNBPU Universitas Udayana melalui program Hibah Unggulan Program Studi tahun 2015.

Daftar Pustaka

- Asteris, P.G., Giannopoulos, I.P., and Chrysostomou, C.Z. 2012. Modeling of Infilled Frames with Openings. *The Open Construction and Building Technology Journal* 2012, pp. 81-91
- Badan Standardisasi Nasional, 2012, *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung-SNI 1726:2012*. Jakarta : BSN.
- Badan Standardisasi Nasional, 2013, *Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung-SNI 2847:2013*
- Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah, 2002, *Standar Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung-SNI 1726:2002*
- Dorji, J., and Thambiratnam, D.P., 2009, Modelling and Analysis of Infilled Frame Structures under Seismic Loads. *The Open Construction and Building Technology Journal*, 2009, 3, 119-126
- Federal Emergency Management Agency, 2000, FEMA 356 – *Prestandard and Commentary for the*

Seismic Rehabilitation of Buildings. Washington DC.: FEMA.

- Kakaletsis, D.J., and Karayannis, C.G., 2009, Experimental Investigation of Infilled Reinforced Concrete Frames with Openings. *ACI Structural Journal*. Title no. 106-S14.
- Mondal, G., and Jain, S.K., 2008, Lateral Stiffness of Masonry Infilled Reinforced Concrete (RC) Frames with Central Opening. *Earthquake Spectra*, Volume 24, No. 3, pages 701–723, August 2008; Earthquake Engineering Research Institute.
- Sugano, S., 1981, Seismic Strengthening of Existing RC Buildings in Japan. *Bull. New Zealand National Society for Earthquake Engineering*, Vol. 14, No. 4., pp.209-222
- Sugano, S., 1992, Research and Design for Seismic Retrofit of Existing Building in Japan. *Proc. of International Symposium on Earthquake Disaster Prevention*, Mexico City, May, pp.91-106
- Sukrawa, M., 2015, Earthquake Response of RC Infilled Frame with Wall Openings in Low-Rise Hotel Buildings. *Procedia Engineering* 125, pp. 933-939