

Pengaruh Dinding Bata Bertulang Terhadap Kinerja Struktur Rangka Dengan Dinding Pengisi (*Infilled Frame*)

I Ketut Sudarsana^{1*}, Ida Bagus Rai Widiarsa¹, Made Khrisna Adi Negara¹, I Putu Agus Putra Wirawan²

¹Program Studi Teknik Sipil, Universitas Udayana, Indonesia

²Program Studi Teknik Sipil, Universitas Mahasaraswati Denpasar, Indonesia

E-mail: ksudarsana@unud.ac.id

DOI: 10.38043/telsinas.v6i1.4224	Received: 3 Maret 2023	Accepted: 3 April 2023	Publish: 2 Mei 2023
----------------------------------	------------------------	------------------------	---------------------

ABSTRAK: Penelitian ini dilakukan analisis perilaku dan kinerja Rangka Dinding Pengisi (RDP) dengan pemasangan batu bata tanpa dan dengan tulangan. Dinding akan mengalami keruntuhan jika gempa kuat terjadi, hal itu dapat menurunkan kekakuan struktur dan menyebabkan kegagalan tingkat lunak. Penambahan tulangan diharapkan dapat mencegah terjadinya keruntuhan dinding. Validasi pemodelan dilakukan untuk mendapatkan parameter pemodelan sesuai karakteristik material dari hasil uji laboratorium. Pada studi ini dibuat empat model struktur dua dimensi (2D) yaitu model rangka terbuka (RT), model RDP tanpa tulangan (RTT), model RDP bertulang dengan empat buah tulangan vertikal (RV1) dan dua buah tulangan vertikal (RV2). Analisis linier dan non-linier dilakukan untuk mengetahui perilaku dan kinerja struktur. Perilaku struktur menunjukkan perpindahan terkecil sampai terbesar yaitu model RV1 = 4,21 mm, RV2 = 6,14 mm, RTT = 8,2 mm dan RT = 19,2 mm. Kinerja struktur menunjukkan kapasitas dari terbesar sampai terkecil yaitu model RV1 = 678 kN, RV2 = 340 kN, RTT = 290 kN dan RT = 150 kN. Model RV1 memiliki perilaku dan kinerja paling tinggi dari segi kekakuan dan kapasitas, namun model RV2 memiliki daktilitas tertinggi. Penambahan tulangan pada RDP mampu meningkatkan kekakuan struktur dan kapasitas gaya lateral dibandingkan dengan RDP tanpa tulangan.

Kata Kunci: Dinding Bata Bertulang; Kinerja Struktur; Perilaku Struktur; Rangka Dinding Pengisi.

ABSTRACT: This research was conducted to analyze the behavior and performance of Infill Wall Frame (RDP) with masonry bricks without and with reinforcement. The wall will collapse if a strong earthquake occurs, it can reduce the stiffness of the structure and cause soft story failure. The addition of reinforcement is expected to prevent wall collapse. Model validation is carried out to obtain modeling parameters according to material characteristics from laboratory test results. In this study four two-dimensional (2D) structural models were made, namely the open frame model (RT), the RDP model without reinforcement (RTT), the reinforced RDP model with four vertical reinforcements (RV1) and two vertical reinforcements (RV2). Linear and non-linear analyzes were carried out to determine the behavior and performance of the structure. Structural behavior shows the smallest to the largest displacement, namely model RV1 = 4.21 mm, RV2 = 6.14 mm, RTT = 8.2mm and RT = 19.2 mm. The performance of the structure shows the capacity from largest to smallest, namely model RV1 = 678 kN, RV2 = 340 kN, RTT = 290 kN and RT = 150 kN. Model RV1 has the highest behavior and performance in terms of rigidity and capacity, but model RV2 has the highest ductility. The addition of reinforcement in RDP can increase structural rigidity and lateral force capacity compared to RDP without reinforcement.

Keyword: Infill Frame Structure; Reinforced Bricks Wall; Structure Behavior; Structural Performance.

I. PENDAHULUAN

Dinding pengisi dalam menahan gaya horizontal yang besar relatif lemah dan dapat menjadi kontributor kerusakan yang besar dalam struktur bangunan. RDP memiliki mekanisme keruntuhan berupa kegagalan struktur rangka dan disusul dengan keruntuhan pasangan dinding secara tiba-tiba [1]. Jenis kerusakan yang terjadi pada rangka dinding pengisi sangat beragam, mulai dari retak, terbelah atau bahkan hingga runtuh total. Keruntuhan total dinding pengisi adalah hal yang paling berbahaya dan dapat menimbulkan korban jiwa. Maka dari itu diperlukan perencanaan dan penelitian yang masif mengenai struktur rangka dinding pengisi. Jika dinding dianggap sebagai bagian dari struktur, maka dinding disebut sebagai dinding pengisi *infill wall* serta rangka yang ditambahkan dinding pengisi disebut sebagai rangka dengan dinding pengisi *infilled frame* [2], [3]. Struktur rangka dinding pengisi memiliki inersia kearah

in-plane lebih besar daripada struktur rangka terbuka *bare frame* sehingga dinding pengisi menyumbangkan kekakuan pada struktur secara keseluruhan. Interaksi antara dinding pengisi dengan struktur rangka ini perlu dipertimbangkan dalam proses desain karena interaksi kedua komponen struktur ini dapat mengubah kekakuan struktur secara keseluruhan terutama kekakuan lateral yang berkaitan dengan kemampuan struktur dalam memikul beban gempa.

Beberapa penelitian yang ada saat ini telah membahas metode pemodelan untuk menentukan kinerja dinding pengisi yaitu secara makro dengan pemodelan dinding pengisi menggunakan metode *strut diagonal* dan secara mikro yaitu dinding pengisi diasumsikan sebagai elemen bidang dengan bidang kontak antara dinding dan rangka disebut elemen *interface* [4]–[7]. Kinerja dan perilaku struktur dapat meningkat ketika dinding diperhitungkan dalam struktur dibandingkan dengan struktur rangka terbuka. Dinding dapat terus berkontribusi untuk meningkatkan kinerja struktur jika dinding tidak rusak ketika beban lateral bekerja. Tekanan besar dari rangka utama dapat menyebabkan kerusakan pada dinding karena mutu material dinding lebih kecil dan dinding mengalami keruntuhan. Hal ini diperlukan tambahan pelindung dinding agar tetap berada posisinya dan tetap dapat berperan memperkaku struktur ketika beban gempa bekerja.

Penelitian pengaruh dinding pengisi bertulang terhadap perilaku struktur masih sangat sedikit, meskipun sudah mulai dilakukan pengujian-pengujian laboratorium terhadap *panel frame* dengan dinding pengisi batako bertulang *Reinforced Masonry Wall* (RMW). Oleh karena itu, penelitian ini sangat perlu dilakukan untuk mendapatkan perilaku dan kinerja struktur beton bertulang akibat beban gempa sehingga hasilnya dapat dimanfaatkan dalam pemodelan dan analisis struktur secara keseluruhan. Konsep pemasangan dinding pengisi dalam dunia konstruksi yaitu bata atau batako *masonry* berongga/*hollow* ditambahkan besi tulangan berdiameter tertentu berpola vertikal melalui rongga bata tersebut yang dihubungkan dengan tulangan secara horizontal pada *bed joint* atau antar bata atas dan bawah yang kemudian ditanam dengan semen mortar, sehingga kedua tulangan ini membentuk *grid* [8].

II. LANDASAN TEORI

Rangka Dinding Pengisi (*Infilled Frame*)

Rangka dinding pengisi merupakan rangka struktur dengan komponen utamanya adalah balok dan kolom dengan pasangan dinding batako atau bata merah ditempatkan didalam rongga panel rangka tersebut. Selain dari bahan bata merah atau batako, dinding pengisi juga bisa terbuat dari papan kayu, *plywood*, batu kapur yang memiliki berat yang lebih ringan. Dinding pengisi pada komponen struktur cukup penting, mengingat fungsi utamanya sebagai pemisah antar ruangan serta “benteng” bagi keadaan di luar ruangan pada bangunan. Keberadaan bata merah atau batako pada struktur rangka akan menghasilkan interaksi yang mengubah kekakuan rangka struktur, terutama saat mengalami beban eksternal seperti beban gempa dan beban angin. Interaksi antara portal struktur maupun dinding dapat menimbulkan efek tertentu secara negatif maupun positif. Kolom tingkat terendah tidak mampu menahan beban karena kolom tingkat di atas lebih keras dan kaku akibat terjadinya interaksi yang spontan antara dinding pengisi dengan rangka struktur [9]. Untuk mengetahui interaksi antara rangka struktur maupun dinding pengisi secara ilmiah dapat dilakukan dengan pendekatan secara sistematis melalui pemodelan struktur tersebut pada program *software* di komputer.

Terdapat dua metode dalam melakukan pemodelan dinding pengisi yaitu metode elemen *shell* maupun metode *strut diagonal*. Metode *strut diagonal*, dinding pengisi diasumsikan sebagai batang tekan yang terhubung dalam *joint* balok dan kolom rangka struktur, serta dipasang secara diagonal dengan menggunakan elemen *frame* dalam program *software*. Perumusan lebar *strut diagonal* yang ditinjau dari parameter betang balok, tinggi kolom, maupun sudut yang dibentuk telah diusulkan oleh beberapa peneliti [2], [3], [10].

Model *shell* dirancang dengan berbasis pada eksperimen dengan bidang *interface* atau kontak antara struktur dengan dinding dirancang sebagai komponen *gap* [11]. Kekakuan dari elemen *gap* diformulasikan oleh Dorji and Thambiratnam [11] sebagai berikut:

$$Kg = 0,0378Ki + 347 \quad (1)$$

$$Ki = Ei.t \quad (2)$$

Dengan:

- Ki : kekakuan dari panel dinding pengisi (N/mm)
Kg : kekakuan elemen *Gap* (N/mm)
Ei : nilai modulus elastisitas dari dinding pengisi (MPa)

Reinforced Masonry Wall (RMW)

Reinforced masonry wall (RMW) atau dinding pasangan bertulang adalah rangka struktur yang penerapannya seperti dinding geser, dengan material yang digunakan berupa bata *hollow* atau bata tanah liat dan dipasang besi baja yang dianggap mampu menahan gaya tertentu secara horizontal, baik berupa beban lateral/gempa ataupun beban angin [12]. Pendapat lain juga mengatakan bahwa *reinforced masonry wall* merupakan konsep dari struktur komposit, dengan dinding yang menerima beban dan beban itu disalurkan menuju besi baja yang memiliki ukuran melintang tertentu [13]. Kedua bahan utama ini tergabung menjadi satu dan mampu menerima gaya eksternal secara komposit selain dari menerima gaya tekan ditambah pula gaya tarik dan gaya geser yang bekerja pada struktur. Kehadiran kedua komponen ini dianggap memberikan efek yang positif bagi kinerja struktur, sehingga bangunan tidak dapat dengan mudah mengalami keruntuhan secara total dalam kurun waktu yang singkat. Disamping itu, kehadiran baja tulangan pada dinding pasangan diharapkan dapat memegang dinding tetap berada pada posisinya walaupun telah mengalami kerusakan saat terjadi gempa kuat sehingga jatuhnya bahan dinding dari sebuah ketinggian dapat dikurangi.

Dalam melaksanakan pemodelan dan analisis struktur dinding pengisi menggunakan *software*, memerlukan properti material beton, baja tulangan dan pasangan bata merah atau batako. Nilai modulus elastisitas beton yang digunakan pada rangka struktur dapat mengacu pada rumus empiris yang mengandung faktor kuat tekan beton berdasarkan SNI 2847-2019 [14]. Sedangkan nilai modulus elastisitas dinding pengisi didapat berdasarkan ketentuan pada FEMA 356 [15]. Untuk tulangan pada dinding pengisi menggunakan nilai modulus elastisitas pada kondisi zona elastis yaitu diambil sebesar 200 GPa.

Kinerja dan Daktilitas Struktur

Kinerja atau *performance* struktur merupakan kondisi yang tunjukkan struktur saat menerima beban yang bekerja terutama adalah beban lateral seperti gempa dan angin. Secara umum ATC 40 mengelompokkan *level* kinerja struktur dibedakan atas kondisi *Yield (B)*, *immediate occupancy (IO)*, *Damage Control (DC)*, *life safety (LS)*, dan *Collapse (C)* [16]. Adanya dinding pengisi bata bertulang perlu diperhitungkan dalam perencanaan bangunan tahan gempa berdasarkan kinerja (*performance-based seismic design*) agar bangunan baru ataupun bangunan yang perkuatan (*upgrade*) bangunan lama, tetap memiliki level kinerja yang dapat menghindari resiko kehilangan jiwa (*life safety*), atau kinerja bangunan untuk segera ditempati kembali (*immediate occupancy*) serta kerugian yang ditimbulkan baik berupa harta maupun benda (*economic loss*) [17], [18]. Pada pemodelan dan analisis kinerja struktur, sifat material yang non-linier dalam kurva tegangan dan regangan secara otomatis dapat diperhitungkan/dianalisis oleh *software* dengan mengaktifkan fasilitas analisis non-linier. Begitu juga dengan perilaku *inelastic* elemen struktur balok dan kolom dapat mengikuti perilaku yang sudah ditetapkan dalam FEMA 273. Sendi plastis merupakan daerah pada elemen struktur (balok, kolom dan dinding) berperilaku pasca-leleh. Sifat sendi plastis adalah istilah dari sifat kaku-plastis atau inelastis yang umumnya berlokasi di ujung-ujung bentang elemen rangka struktur.

Banyaknya sendi plastis yang terjadi sebelum struktur mengalami keruntuhan merupakan indikasi sifat daktil dari sebuah struktur. Daktilitas merupakan kemampuan dari sebuah struktur untuk menyerap dan memencarkan energi gempa sebelum mengalami keruntuhan. Pengendalian lokasi terjadinya sendi plastis dalam struktur merupakan dasar dari konsep desain kapasitas (*capacity design*). Tingkat daktilitas sebuah struktur dapat diukur berdasarkan perbandingan atau rasio antara simpangan maksimum sebelum runtuh dan simpangan leleh awal dari struktur. Struktur beton umumnya memiliki nilai daktilitas seperti ditunjukkan pada Persamaan (3). Besarnya beban gempa dari sebuah struktur dapat dikurangi sesuai dengan tingkat daktilitas yang diperhitungkan dalam proses desain. Faktor reduksi beban gempa ini dapat diambil sesuai dengan Persamaan (4).

$$1 < \mu = \frac{\delta_m}{\delta_y} < \mu_m \quad (3)$$

$$R = f1. \mu \quad (4)$$

Dengan:

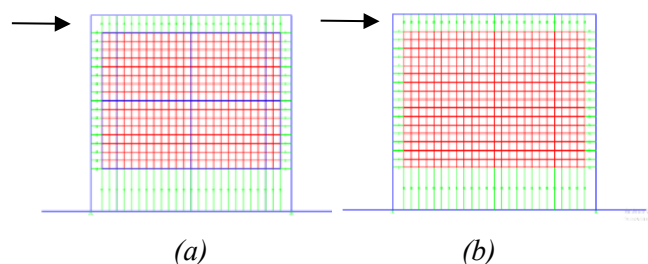
- δm = nilai deformasi maksimum struktur akibat dari beban lateral rencana pada saat mencapai kondisi di ambang runtuh
 δy = deformasi struktur pada saat mencapai titik leleh pertama nilai fl
 μ = nilai daktilitas suatu struktur dan nilai
 μm = nilai daktilitas maksimum.
R = faktor reduksi beban gempa
fl = faktor kuat lebih

III. METODE PENELITIAN

Studi pengaruh dinding bata bertulang terhadap kinerja struktur rangka beton bertulang dilakukan dengan menganalisis empat buah model struktur portal 2 dimensi 4 tingkat yaitu yaitu model rangka terbuka (RT), model dinding pengisi tanpa tulangan (RTT), dan model dinding pengisi bata bertulang (RV1 dan RV2). Namun sebelum melakukan studi perilaku dan kinerja struktur dilakukan validasi model struktur RDP dengan mininjau parameter material seperti modulus elastisitas dan inersia elemen struktur sesuai dengan hasil laboratorium. Hasil pengujian laboratorium yang digunakan sebagai validasi adalah eksperimen dari Kakaletsis dan Karayannis [2]. Data struktur validasi dijelaskan pada subbab berikutnya dan hasil validasi disajikan pada pembahasan.

Data Struktur Validasi

Validasi model dilakukan dengan mengacu pada penelitian yang dilakukan oleh Kakaletsis dan Karayannis [2], yaitu model RT (Rangka Terbuka), model RDPTT (Rangka Dinding Pengisi Tanpa Tulangan) dan model RDPBB (Rangka Dinding Pengisi Bata Bertulang). Pembebanan dilakukan dengan memberikan beban lateral arah X yang diberikan secara *incremental* pada titik temu balok dan kolom bagian kiri sesuai pada Gambar 1.



Gambar 1. Model (a) RDPBB dan (b) RDPTT

Data dimensi dari model validasi adalah balok *sloof* sebesar 500x150 mm, balok atap 100x200 mm, dan kolom 150x150 mm. Sedangkan diameter masing-masing tulangan horizontal dan vertikal pada model RDPBB adalah 10 mm dan 20 mm. Adapun data material dari model pengujian [2] dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Data Material

No.	Material	Mutu
a)	Beton	
	Kuat tekan beton ($f'c$)	28,51 MPa
	Modulus elastisitas beton (E_c)	26995 MPa
	Berat jenis beton bertulang	2400 kg/m ³
b)	Dinding	
	Kuat tekan pasangan dinding ($f'm$)	5,11 MPa
	Modulus elastisitas dinding (E_m)	783,84 MPa
c)	Tulangan	
	Tegangan leleh baja (f_y)	240 MPa
	Tegangan putus baja (f_u)	370 MPa
	Modulus elastisitas baja (E_s)	200000 MPa
	Berat volume baja (γ_s)	7850 kg/m ³

Pada model validasi dilakukan reduksi modulus elastisitas (E) dan momen inersia (I) untuk mengikuti sifat nonlinier material saat dilakukan eksperimen. Variasi beban, momen inersia (I) dan

modulus elastisitas (E_c dan E_m) pada model RT, RDPTT, dan RDPBB diberikan pada Tabel 3. Inersia kolom dikurang mulai beban 40 kN (sekitar 50% beban maksimum) sampai sebesar mencapai 70% inersia awal saat beban maksimum, sedangkan inersia balok diambil tetap selama pembebanan dengan memperhatikan kondisi balok ditumpu oleh dinding. Modulus elastisitas beton (E_c) dan pasangan dinding (E_m) dikurangi mulai peningkatan awal beban 10 kN sampai kondisi beban maksimum seperti diberikan pada Tabel 3.

Tabel 2. Variasi Beban, Penurunan Inersia dan Modulus Elastisitas Model RT

Beban (kN)	Inersia		E_c (MPa)
	Kolom	Balok	
0	1	1	26995
10	1	1	26539
20	1	1	24258
26	1	1	20767
30	0.95	1	17996
32	0.9	1	16016
39	0.85	1	12055
40	0.8	1	8542
44,5	0.7	1	3432

Tabel 3. Variasi Beban, Penurunan Inersia dan Modulus Elastisitas Model RDPBB dan RDPTT

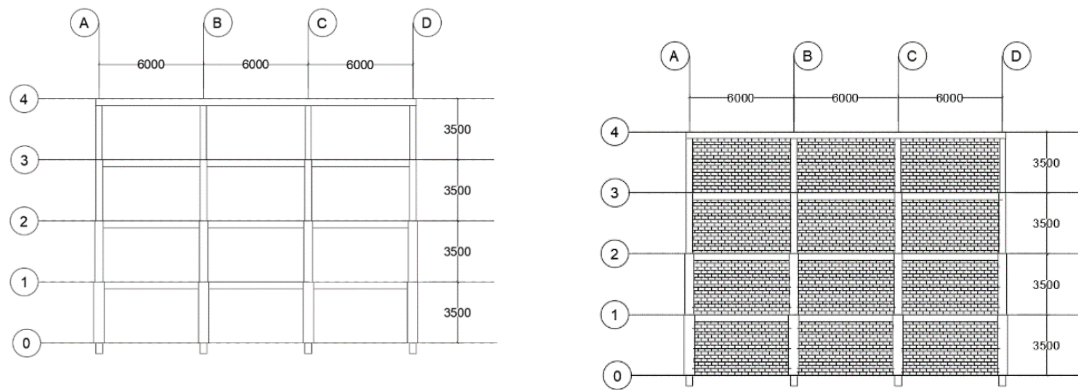
Beban (kN)	Inersia		E_c (MPa)	E_m (MPa)
	Kolom	Balok		
0	1	1	26995	783
10	1	1	26862	756
20	1	1	26081	698
30	1	1	24613	655
40	1	1	22512	584
44	0.95	1	20551	535
50	0.9	1	19092	507
60	0.85	1	15974	425
70	0.8	1	11384	329
79.5	0.7	1	3777	137

Data Elemen Struktur

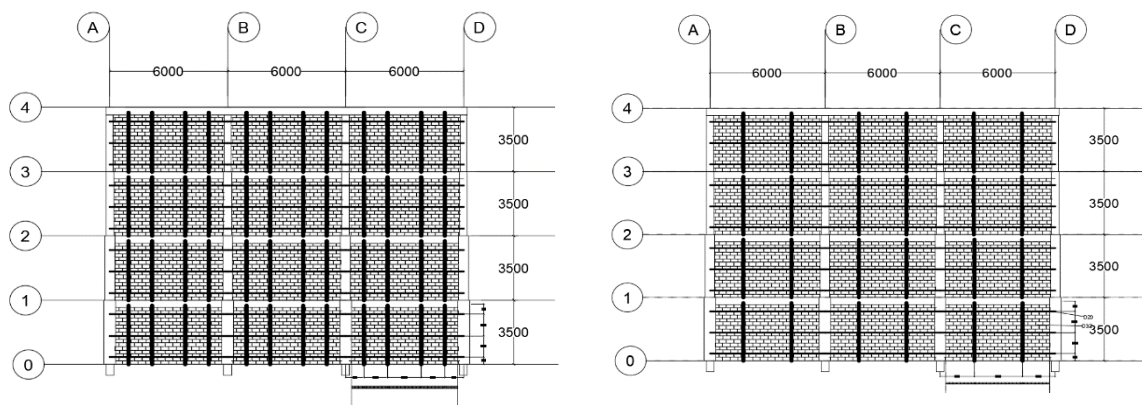
Struktur yang dalam studi ini berupa struktur dua dimensi empat lantai yang hanya memperhitungkan perilaku akibat beban lateral arah X. Dimensi pada struktur ditunjukkan pada Tabel 4. Empat jenis model struktur masing-masing diberi nama model RV1 (struktur dinding pengisi bata bertulang versi pertama), model RV2 (struktur dinding pengisi bata bertulang versi kedua), model RT (struktur rangka terbuka), dan model RTT (struktur dinding pengisi tanpa tulangan). Perbedaan yang mendasar dari model RV1 dan RV2 ialah jumlah pemasangan tulangan vertikalnya, untuk model RV1 dipasang empat buah tulangan vertikal pada setiap penampang dinding, sedangkan model RV2 dipasang dua buah tulangan vertikal pada setiap penampang dinding. Model RT, RTT, RV1 dan RV2 ditunjukkan pada Gambar 2 sampai Gambar 4.

Tabel 4. Dimensi Struktur

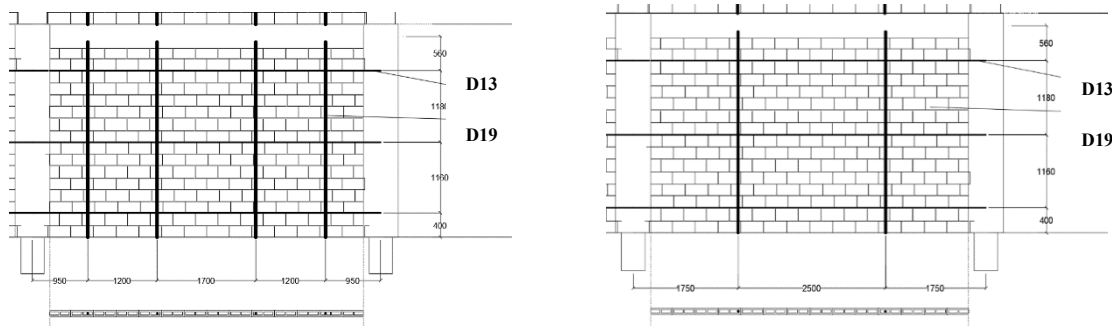
Lantai	Dimensi (mm)	
	Kolom	Balok
1	600x600	400x300
2	500x500	400x300
3	400x400	400x300
4	350x350	400x300



(a)
Gambar 2. Desain Struktur (a) RT dan (b) RTT



(a) (b)
Gambar 3. Desain Struktur (a) RV1 dan (b) RV2



(a) (b)
Gambar 4. Detail Penulangan Desain Struktur RV1 dan RV2

Data Pembebanan

Model struktur hanya menerima beban gempa, sementara beban sendiri pada struktur sudah secara otomatis diperhitungkan dalam program SAP2000 dengan meng-input angka 1 pada *field multiple selfweight* pada *load case DEAD*. Untuk dapat membuat model struktur untuk menahan gaya lateral khususnya gaya gempa, pada model diberikan beban gempa secara otomatis berdasarkan kaidah SNI 1726:2019 [19] pada lokasi tertentu, sehingga dalam program SAP2000 dipilih pembebanan lateral gempa jenis *Auto Lateral Load IBC 2009*. Diasumsikan penempatan portal berada pada daerah Kota Denpasar, situs tanah sedang. Direncanakan struktur sebagai gedung perkantoran dengan nilai kategori resiko II, nilai faktor keutamaan gempa (I_e) sebesar 1, kelas situs = D, nilai koefisien modifikasi respon (R) = 8,

faktor pembesaran defleksi (C_d) = 5,5. Sedangkan nilai masing-masing SDs dan SD1 ialah 0,984 dan 0,367.

Pemodelan Dinding Bata Bertulang Dengan Elemen *Shell*

Dilakukan pemodelan dinding pengisi pada program *software* dengan menggunakan elemen *shell* serta menambahkan elemen penghubung berupa *joint* antara balok maupun kolom dengan dinding pengisi dengan perintah *mesh area*. Elemen *gap* dibuat berupa *link element* pada program serta meng-*input* nilai kekakuan elemen *gap* sesuai dengan besaran kuat tekan dinding bata rencana serta modulus elastisitasnya. Dalam memodel tulangan pada dinding pengisi, diidentifikasi tulangan sebagai *circular sections* berbahan *steel* atau baja dengan meng-*input* mutu maupun diameter tulangan yang diperlukan.

Pemodelan Dinding Bata Bertulang Dengan *Strut Diagonal*.

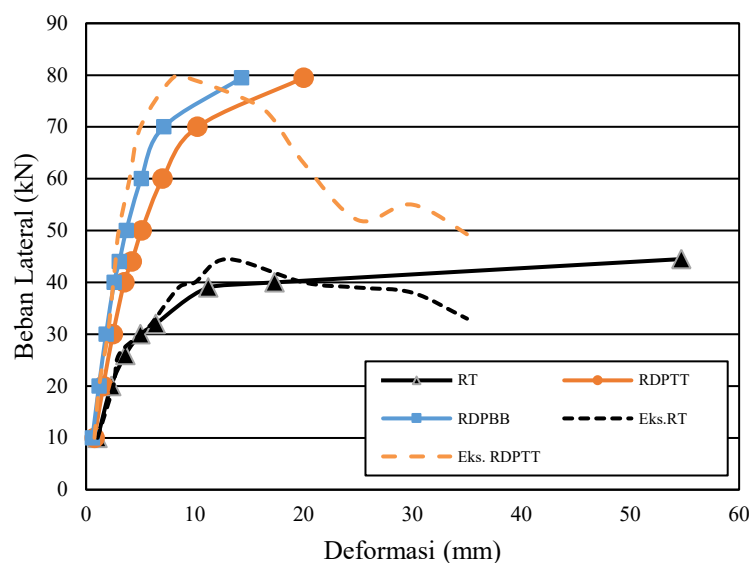
Pemodelan dinding bata bertulang dengan menggunakan metode *strut diagonal* hampir menyerupai dengan pemodelan dinding pengisi tanpa tulangan. Namun belum ada perumusan yang empiris dalam menentukan lebar *strut diagonal* pada penggunaan dinding bata bertulang. Maka dari itu lebar *strut diagonal* pada dinding bata bertulang dapat ditentukan dengan melakukan *trial and error*. Metode *trial and error* dilakukan dengan membandingkan perilaku struktur dengan menggunakan metode elemen *shell* maupun perilaku struktur metode *strut diagonal* dengan *margin of error* yang diharapkan kurang dari 1%.

Strut diagonal pada program *software* diidentifikasi sebagai balok atau *beam* yang hanya menerima gaya normal tanpa adanya gaya lentur yang terjadi. Maka dari itu dilakukan *release* pada momen M2 dan M3 agar momen pada balok tidak diperhitungkan. Dan dilakukan pula *Tension Limit* sama dengan nol pada *strut*, sehingga balok *strut* hanya bersifat tekan.

IV. PEMBAHASAN

Validasi Pemodelan

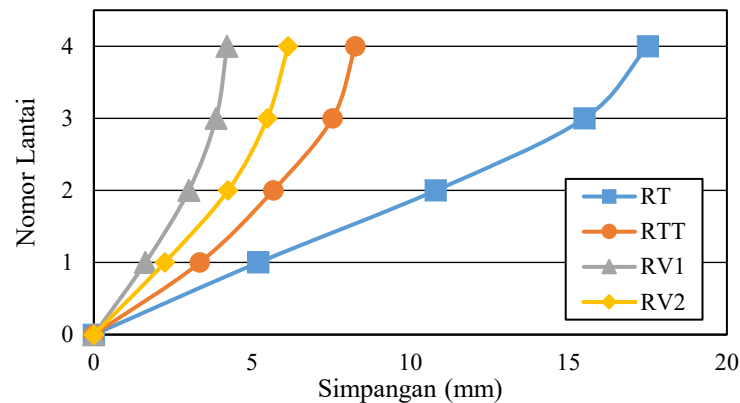
Model validasi terdiri dari model RT, RDPTT, dan RDPBB dianalisis dalam model 2D menggunakan program SAP2000 dengan membandingkan ketiga model tersebut dengan hasil eksperimen yang ditunjukkan pada Gambar 5. Model RT memiliki selisih simpangan 12% dan beban 3% dibandingkan hasil eksperimen dan model RDPTT memiliki selisih simpangan sebesar 28% dan beban 12% dibandingkan dengan model eksperimen. Hasil validasi menunjukkan bahwa hasil beban-simpangan model validasi sudah sesuai dengan hasil eksperimen.



Gambar 5. Grafik Validasi Model

Perilaku Struktur Empat Tingkat Dengan Elemen *Shell*

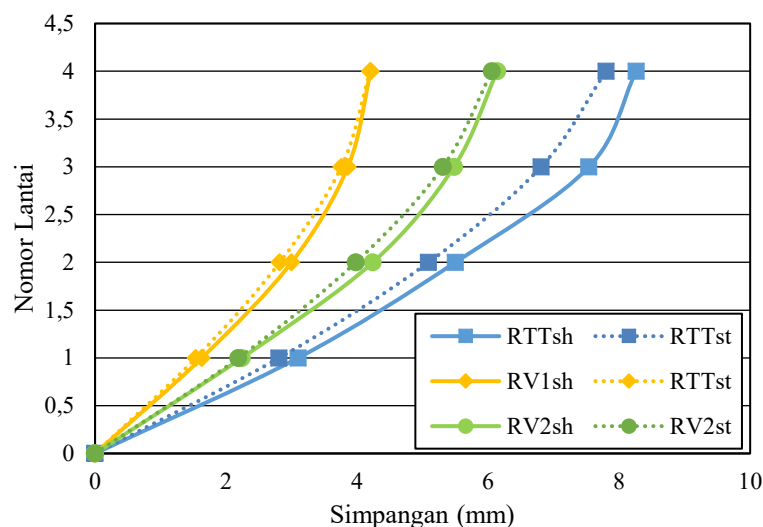
Pada perilaku struktur, ditinjau simpangan setiap lantai pada masing-masing model RT, RTT, RV1, dan RV2. Model RT memiliki simpangan terbesar yaitu 19.2 mm dan model RV1 memiliki simpangan terkecil yaitu 4.21 mm. Terlihat bahwa model RV1, RV2 dan RTT memiliki kekakuan 78%, 68% dan 57% lebih besar dibandingkan model RT. Model RV1 lebih kaku 31% dibandingkan dengan RV2 dikarenakan jumlah pemasangan tulangan pada pasangan bata lebih banyak. Begitu juga dengan model RV2 lebih kaku 26% dibandingkan dengan model RTT. Dapat disimpulkan bahwa penambahan penulangan pada pasangan bata dapat meningkatkan kekakuan struktur RDP.



Gambar 6. Simpangan Struktur Akibat Beban Lateral X

Penentuan Lebar *Strut* Diagonal Pada Struktur

Pemodelan struktur dengan menggunakan elemen *shell* hanya mampu mengidentifikasi hasil secara linier. Maka dari itu agar mendapatkan hasil secara non-linier, diperlukan pemodelan struktur dengan metode *strut* diagonal dengan lebar *strut*nya ditentukan berdasarkan hasil perilaku struktur yang diperoleh melalui metode elemen *shell*. Sehingga perilaku struktur dengan metode *strut* diagonal menyerupai perilaku struktur dengan menggunakan elemen *shell*. Perbandingan perilaku struktur *strut* diagonal dengan elemen *shell* dapat ditunjukkan melalui Gambar 7.



Gambar 7. Simpangan Struktur Akibat Beban Lateral X

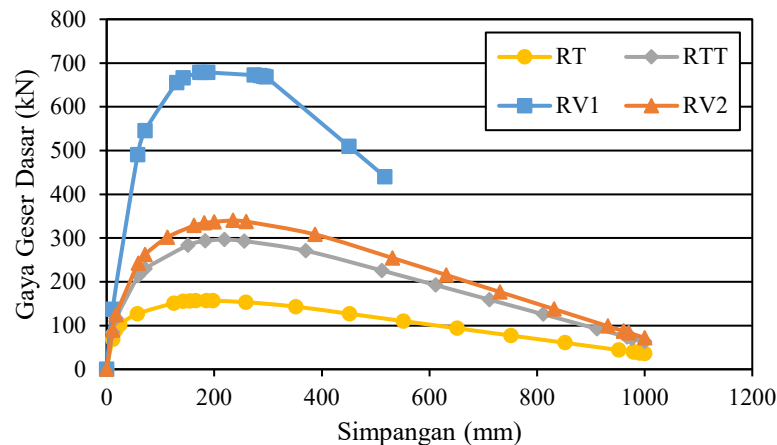
Diperoleh kemiripan perilaku struktur model *strut* diagonal terhadap perilaku struktur model elemen *shell*, dengan perbandingan kedua nilai simpangan masing-masing model *strut* diagonal maupun elemen *shell* kurang dari 1%. Sehingga didapatkan nilai lebar *strut* yang ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Lebar Strut Diagonal

Model	Lebar Strut (mm)
RTT	30
RV1	120
RV2	40

Kinerja Struktur

Analisis kinerja struktur berupa kurva gaya geser dasar-simpangan. Model RT dapat menerima beban sampai 156 kN dan simpangan 185,57 mm, model RTT dapat menerima beban sampai 297 kN dan simpangan 218, 85 mm, model RV1 dapat menerima beban sampai 679 kN dan simpangan 173, 04 mm dan RV2 dapat menerima beban 340 kN dan simpangan 234, 99 mm. Model RV1 memiliki kapasitas 335% lebih besar dari model RT yang memiliki kapasitas terkecil. Model RV1 memiliki kekuatan 100% lebih besar dari model RV2, namun model RV2 36% lebih daktail dari RV1. Hal ini dikarenakan jumlah tulangan pada pasangan bata lebih sedikit dari model RV1. Model RV2 lebih kuat 14% dari model RTT. Dapat disimpulkan bahwa model RDP dengan tulangan dapat meningkatkan kekuatan dan daktilitas struktur. Hasil analisis *pushover* yaitu berupa kurva kapasitas setiap model yang ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Kurva Kinerja Struktur

Tabel 6. Performance Point Struktur

Model	Simpangan (mm)		Daktilitas
	Leleh Pertama	Leleh Pertama	
RT	24,3	69	8.86
RTT	10.95	58	14.15
RV1	10.92	40	16.41
RV2	10.93	48	24.66

V. KESIMPULAN

Perilaku struktur yang ditinjau dari nilai simpangan maksimum akibat beban gempa statis yaitu menunjukkan nilai simpangan pada masing-masing model RT = 19,2 mm, RTT = 8,2 mm, RV1 = 4,21 mm, dan RV2 = 6,14 mm, sedangkan kinerja struktur yang ditentukan berdasarkan kurva kapasitas dari analisis *pushover* yang dihasilkan akibat beban lateral arah X pada masing-masing model RT, RTT, RV1, RV2 adalah 156 kN, 297 kN, 679 kN, 340 kN. Nilai target perpindahan yang terjadi, masing-masing model RT, RTT, RV1, dan RV2 ialah 69 mm, 58 mm, 40 mm dan 48 mm. Sedangkan pada level kinerja struktur, hanya model RT yang berstatus CP (*Collapse Prevention*) dan untuk model lainnya berstatus LS (*Life Safety*).

Secara umum bahwa model dinding pengisi bata bertulang, baik model RV1 maupun model RV2 mampu menahan gaya lateral yang lebih besar dengan kinerja struktur yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan model dinding pengisi (RTT) tanpa tulangan maupun dibandingkan dengan model rangka struktur terbuka (RT). Semakin banyak tulangan yang ditambahkan pada dinding, semakin besar pula beban yang dapat ditahan tetapi daktilitasnya mengecil. Nilai optimum penambahan tulangan pada sistem struktur rangka dinding pengisi perlu di studi lebih lanjut untuk mendapatkan kapasitas maksimum dan daktilitas yang maksimum juga.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] P. G. Asteris, D. J. Kakaletsis, C. Z. Chrysostomou, and E. E. Smyrou, "Failure modes of in-filled frames," *Electronic Journal of Structural Engineering*, vol. 11, no. 1, pp. 11–20, 2011.
- [2] D. J. Kakaletsis and C. G. Karayannis, "Experimental investigation of infilled reinforced concrete frames with openings," *ACI Struct J*, vol. 106, no. 2, pp. 132–141, 2009, doi: 10.14359/56351.
- [3] T. Paulay and M. J. N. Priestly, *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*. New York: John Wiley & Son, 1992.
- [4] A. Zine, A. Kadid, and A. Zatar, "Effect of masonry infill panels on the seismic response of reinforced concrete frame structures," *Civil Engineering Journal (Iran)*, vol. 7, no. 11, 2021, doi: 10.28991/cej-2021-03091764.
- [5] I. P. A. P. Wirawan, I. K. D. K. Tubuh, and I. G. G. Wiryadi, "Studi Analitikal Perilaku dan Kinerja Struktur Rangka Dinding Pengisi dengan Bukaan Sentris," Denpasar, 2022. doi: 10.22146/jcef.XXXXX.
- [6] I. K. D. K. Tubuh, I. G. G. Wiryadi, I. P. A. P. Wirawan, and N. L. M. A. M. Pradnyadari, "Modeling and Validation of Experimental Test Results on Infilled Frame with Eccentric Reinforced Opening," in *5th International Conference on Sustainable Development*, Denpasar: Universitas Mahasaraswati Denpasar, 2021, pp. 189–198.
- [7] M. Sukrawa *et al.*, "Studi Analitikal Perilaku Dan Kinerja Struktur Rangka Dinding Pengisi (RDP) Dengan Variasi Ketebalan Dinding," *Jurnal Spektran*, vol. 8, no. 2, pp. 139–148, 2020.
- [8] Eurocodes, *EU Legislation/Standardisation for Construction*. U.K., 2009.
- [9] W. Dewobroto, "Analisis Inelastis Portal-Dinding Pengisi dengan Equivalent Diagonal Strat," *Jurnal Teknik Sipil (ITB)*, vol. 12, no. 4, Oct. 2005.
- [10] V. Sigmund and D. Penava, "Experimental Study of Masonry Infilled R/C Frames with Opening," *15th World Conference on Earthquake Engineering*, no. 2008, pp. 1–11, 2012.
- [11] J. Dorji, "Seismic Performance of Brick Infilled RC Frame Structures in Low and Medium Rise Buildings in Bhutan," Queensland University of Technology, Queensland, 2009.
- [12] S. J. Lee, T. S. Eom, and E. Yu, "Investigation of Diagonal Strut Actions in Masonry-Infilled Reinforced Concrete Frames," *Int J Concr Struct Mater*, vol. 15, no. 6, 2021, doi: 10.1186/s40069-020-00440-x.
- [13] M. Mavros, "Experimental and Numerical Investigation of the Seismic Performance of Reinforced Masonry Structures," University of California, San Diego, 2015.
- [14] Badan Standarisasi Nasional, *SNI 2847:2019 Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung dan penjelasan*. Jakarta, 2019, p. 695.
- [15] American Society of Civil Engineers, *FEMA 356 Prestandard and Commentary for The Seismic Rehabilitation of Buildings*, no. November. USA, 2000.
- [16] ATC-40, *Seismic Evaluation and Retrofit Of Concrete Building*, 1st ed., no. 1. Redwood, California: Twin Dolphin Drive, 1996.
- [17] K. Nuraga *et al.*, "Analisis Daktilitas Struktur Gedung Rangka Beton Bertulang Dengan Metode Analisis Pushover (Studi: Gedung Tugu Reasuransi Indonesia Jakarta)," 2021.
- [18] I. Putu Agus Putra Wirawan, "Analisis Perilaku Dan Kinerja Struktur Baja Dengan Sistem Struktur Diagrid Dan Inverted V-Braced," 2021.
- [19] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 1726:2019 Tata Cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung*. Jakarta, 2019, p. 238.