

PEMODELAN DAN ANALISIS KINERJA STRUKTUR RANGKA BETON BERTULANG-DINDING PENGISI DENGAN DAN TANPA MENGGUNAKAN BASE ISOLATOR

I Ketut Sudarsana, Ida Bagus Dharma Giri dan Putu Hendra Kusuma

Program Studi Sarjana Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Udayana

Email: ksudarsana@unud.ac.id

Abstrak: Penelitian ini mengevaluasi perbandingan kinerja antara struktur rangka beton bertulang-dinding pengisi (RDP) dengan dan tanpa *base isolator*. Studi dilakukan terhadap dua buah model struktur beraturan gedung sekolah empat lantai yaitu struktur dengan perletakan jepit (M1) dan *base isolator* (M2). Struktur terdiri dari 3 bentang dengan panjang 6 m pada Arah X dan 4 m pada Arah Y. Tinggi struktur dari taraf penjepitan adalah 14 m dengan tinggi tiap lantai adalah 3,5 m. Bangunan dianggap berada pada kelas situs D di atas tanah sedang. Pemodelan dan analisis struktur dilakukan dengan bantuan software komersial dimana dinding pengisi dimodelkan sebagai *strut diagonal*. *Base isolator* merupakan tipe *Lead Rubber Bearing* (LRB) yang didesain untuk mendapatkan kekakuan horisontal dan vertikalnya berdasarkan gaya aksial yang bekerja. Analisis kinerja struktur dilakukan dengan analisis *nonlinear static pushover* sedangkan evaluasi kinerja struktur berdasarkan ketentuan FEMA 440. Hasil analisis menunjukkan bahwa simpangan kedua model struktur akibat beban gempa telah memenuhi persyaratan simpangan ijin. Penggunaan *base isolator* dapat mengurangi simpangan antar lantai sebesar 20% dan 35%, masing-masing dalam arah X dan Y, sedangkan waktu getar alami strukturnya meningkat sampai 998,45% dari struktur terjepit. Penggunaan *base isolator* juga meningkatkan gaya geser yang bekerja sebesar 14% dan 5% masing-masing untuk arah X dan Y. Level kinerja kedua model struktur adalah *beyond to E* (failure). Penggunaan *base isolator* dapat mengurangi tegangan yang terjadi pada dinding hingga masing-masing 9,7% dan 2% pada dinding arah X dan Y dan juga menurunkan kekakuan struktur hingga 77,81% dalam arah X dan 56,74% dalam arah Y.

Kata Kunci : *base isolator*, dinding strat, analisis *Pushover*, kinerja struktur

MODELING AND PERFORMANCE ANALYSIS OF INFILLED WALL-REINFORCED CONCRETE FRAME STRUCTURE WITH AND WITHOUT BASE ISOLATOR

Abstract: The research investigates and compares performance of reinforced concrete infilled frames with and without base isolators. Two regular models of a 4-story school building namely fixed-based structure (M1) and base-isolated structure (M2) were studied. It consists of 3 spans with length of 6m and 4m, respectively in X and Y directions, total height of 14m, floor-to-floor height of 3.5m, and located at site class D on medium soil. Structural modeling and analysis were done using commercial program and the infilled wall was modeled as diagonal struts. The base isolators were lead rubber bearing (LRB) types that were designed considering the axial loads of each column to obtain the horizontal and vertical stiffnesses. The performance analysis was done using nonlinear static pushover analysis whilst the evaluation of the structural performances according to FEMA 440. The analysis results show that lateral deformations of both structural models due to the earthquake have met requirements for allowable deformations. Base isolators reduced the floor lateral deformations by 20% and 35% for X and Y directions, respectively whilst increase fundamental periods up to 998.45% of the fixed base structure. It also increased shear forces of the structures by 14% and 15%, respectively in X and Y directions. The performance level of both structures was beyond E (failure). Base isolators can reduce the wall stresses by up to 9.7% and 2% in the X and Y direction, respectively, and can also reduce structural stiffness up to 77.81% in the X direction and 56.74% in the Y direction.

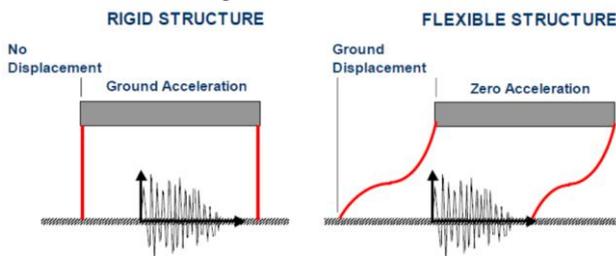
Keywords: *base isolator*, wall strut, pushover analysis, structural performance.

PENDAHULUAN

Struktur rangka dinding pengisi (RDP) memiliki kekakuan elastis lebih besar dari struktur rangka terbuka (SRT) namun pada kondisi inelastis, kontribusi dinding pengisi mungkin tidak *significant* lagi akibat guncangan gempa yang besar mengakibatkan retak dinding yang *significant*. Kerusakan bangunan akibat gempa dapat dicegah dengan meningkatkan kekuatan struktur bangunan terhadap gaya gempa yang bekerja. Namun cara tersebut belum efektif terhadap kerusakan yang diakibatkan oleh adanya *interstory drift* (perbedaan simpangan antar lantai). Untuk mengurangi *interstory drift* dapat dilakukan dengan mereduksi gaya gempa yang diterima oleh bangunan (Teruna, 2005).

Reduksi gaya gempa yang bekerja pada bangunan dapat dilakukan dengan menggunakan isolasi seismik atau *base isolation*. Prinsip sederhana dari *base isolation* adalah memisahkan struktur atas bangunan dengan pondasinya sehingga ketika terjadi gempa bumi, struktur atas akan tetap aman karena pengaruh pergerakan tanah akibat gempa dapat dikurangi.

Bangunan yang sangat kaku akan memiliki periode struktur mendekati nol karena pergerakan tanah akibat dari gempa yang ditransmisikan ke struktur bangunan dengan percepatan yang sama dengan percepatan tanah sehingga perpindahan relatif antara struktur dan tanah bernilai nol. Sedangkan bangunan yang sangat fleksibel akan memiliki periode struktur dengan nilai yang besar (Kelly, 2001). Hal ini dapat divisualisasikan seperti Gambar 1.



Gambar 1. *Transmission of Ground Motions*
 Sumber: Kelly (2001)

Pada Gambar 1 menunjukkan bahwa untuk tipe struktur yang sangat fleksibel, ketika tanah di bawah struktur bergerak akibat dari gempa bumi maka pergerakan yang terjadi tidak akan ditransmisikan ke dalam struktur bangunan sehingga struktur bangunan tetap dalam posisi semula dan perpindahan relatif antara struktur dan tanah akan sama dengan perpindahan tanah (Kelly, 2001).

Teruna (2005) membuktikan bahwa hasil analisis bangunan dengan *base isolator* dapat meningkatkan periode struktur hingga 96% yang mengakibatkan gaya gempa yang bekerja pada bangunan akan

berkurang. Penelitian yang dilakukan oleh Japa (2008) menunjukkan penggunaan sistem isolasi pada seluruh titik kolom terbawah memberikan pengaruh yang efektif dibandingkan dengan penempatan sistem isolasi hanya pada titik kolom tertentu saja terhadap perilaku strukturnya. Soetanto dkk. (2015) melakukan analisis dimana penggunaan *base isolation* pada rumah sederhana dapat menurunkan *drift* yang terjadi rata-rata hingga 83,5% untuk gempa 500 tahun dan rata-rata antara 67,7% untuk gempa 2500 tahun jika dibandingkan rumah sederhana yang menggunakan perletakan sendi. Andrian dkk. (2017) menunjukkan struktur gedung yang ditinjau menggunakan *base isolator* memiliki *displacement* yang lebih besar relatif terhadap tanah daripada struktur gedung *fixed based* sebesar 66,97% dalam arah x dan sebesar 57,53% arah y serta struktur yang menggunakan *base isolator* mampu mengurangi simpangan antar lantainya.

Penelitian penggunaan *base isolator* pada bangunan telah banyak dilakukan, namun kinerja struktur dengan *base isolator* masih perlu dilakukan terutama kinerja struktur rangka beton bertulang dengan dinding pengisi. Dinding pengisi diharapkan tidak rusak karena pengaruh goyangan gempa.

TEORI DAN METODE

Kekakuan Base Isolation

Prinsip dasar isolasi dasar adalah untuk memodifikasi respon bangunan sehingga tanah dapat bergerak di bawah bangunan tanpa mentransmisikan gerakan tanah ke dalam bangunan. Dalam sistem yang ideal, pengaruh pergerakan tanah benar-benar tidak mempengaruhi struktur bangunan di atasnya. Namun dalam kenyataannya, tetap akan ada kontak antara struktur dan tanah (Kelly, 2001).

Sistem dengan model terjepit pada pondasi atau tanpa sistem isolasi dapat diasumsikan sebagai struktur dengan derajat kebebasan tunggal (*Single Degree Of Freedom*) sedangkan struktur dengan isolasi dapat diasumsikan sebagai struktur dengan dua derajat kebebasan (*Two Degree Of Freedom*).

Sistem isolasi yang umum digunakan pada bangunan dapat dengan isolator linear ataupun non linear, dimana persamaan dinamis dari struktur dengan menggunakan isolasi linear yang diberikan sebagai berikut:

$$m_s \cdot \ddot{x}_s = -c_s \cdot (\dot{x}_s - \dot{x}_b) - k_s \cdot (x_s - x_b) - m_s \cdot \ddot{x}_g \tag{1}$$

$$m_b \cdot \ddot{x}_b = -c_s \cdot (\dot{x}_b - \dot{x}_s) - k_s \cdot (x_b - x_s) - m_s \cdot \ddot{x}_g \tag{2}$$

Base isolator memiliki kekakuan arah horisontal yang kecil, sehingga struktur mudah bergerak dalam arah horisontal. Hal ini akan memisahkan pengaruh dari pergerakan tanah yang akan diterima oleh struktur di atasnya. Adapun rumus kekakuan

horizontal dan vertikal dari *base isolator* adalah berdasarkan rumus yang terdapat pada Naeim and Kelly (1999).

Kekakuan *base isolator* arah horizontal diperhitungkan sebagai berikut:

$$K_H^n = \left[\frac{2\pi}{T_D} \right]^2 \times \frac{W_i}{g} \tag{3}$$

Desain perpindahan awal *base isolator* diperhitungkan sebagai berikut:

$$D_D = \frac{g \cdot S_{D1} \cdot T_D}{4\pi^2 \cdot B_D} \tag{4}$$

Untuk kekakuan arah vertikal *base isolator* diperhitungkan berdasarkan rumus berikut.

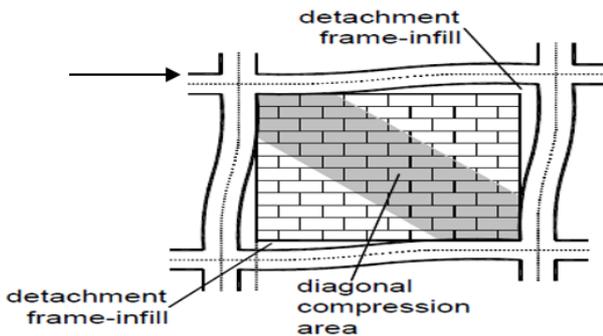
$$K_v = \frac{E_c A_s}{l_r} \tag{5}$$

dengan E_c dirumuskan sebagai berikut:

$$E_c = \frac{6GS^2K}{6GS^2+K} \tag{6}$$

Lebar Dinding Strat

Saat struktur menerima beban gempa maka struktur rangka mengalami deformasi sehingga akan menekan bagian dinding secara diagonal. Sejarak lebar tertentu bagian dinding ini akan berfungsi sebagai elemen strat diagonal yang berinteraksi dengan struktur rangka seperti terlihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Analogi Strat Diagonal
Sumber: Asteris et al. (2012)

Ada beberapa persamaan untuk menghitung lebar strat diagonal dinding pengisi diusulkan pada literatur dan salah satunya perumusan dalam peraturan FEMA-356 yang mengacu dari persamaan Mainstone (1971) yaitu:

$$W_{ds} = 0.175(\lambda_1 h_{col})^{-0.4} r_{inf} \tag{7}$$

dengan λ_1 dirumuskan sebagai berikut:

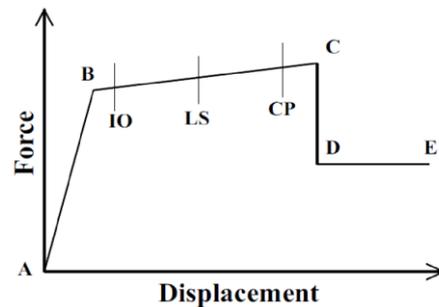
$$\lambda_1 = \left[\frac{E_{me} t_{inf} \sin \sin 2\theta}{4E_{fe} l_{col} h_{inf}} \right]^{\frac{1}{4}} \tag{8}$$

Selain itu Paulay & Priestley (1992) merumuskan persamaan lebar strat yang lebih sederhana dan mudah dalam perhitungannya yaitu:

$$w_{ds} = \frac{d}{4} \tag{9}$$

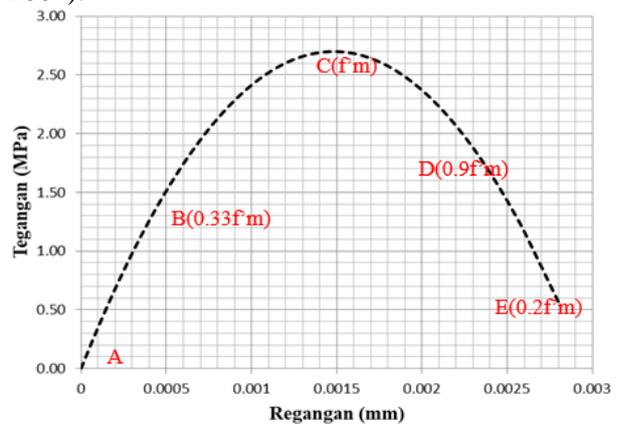
Pendefinisian Sendi Plastis

Perilaku inelastis elemen struktur didefinisikan dengan perilaku sendi plastisnya. Perilaku ini sangat penting ditentukan dalam analisis *pushover* untuk menggambarkan bagian-bagian lemah dari elemen. Perilaku sendi plastis dalam analisis ini mengikuti default program yaitu sendi plastis balok didefinisikan dengan *default concrete beam* akibat kombinasi gaya P dan M3, sedangkan pada kolom mengikuti *default concrete columns* akibat kombinasi P-M2-M3. Sendi plastis ditentukan terjadi pada lokasi yang berpotensi leleh terjadi yaitu pada ujung-ujung balok dan kolom. Secara umum default sendi plastis dapat digambarkan seperti Gambar 3 dimana dari kurva gaya-perpindahan dapat didefinisikan lima titik A-B-C-D-E yang mengidentifikasi kondisi leleh dan pasca leleh terjadi.



Gambar 3. Kurva deformasi plastis
Sumber: Computer and Structures (2014)

Pada dinding strat, sendi plastis didefinisikan pada ujung-ujung dinding strat. Pendefinisian sendi plastis pada dinding strat yang digunakan adalah *axial P hinge* dengan input data titik-titik A-B-C-D-E seperti ditunjukkan pada Gambar 4. 0,33f_m digunakan untuk Titik B dimana titik ini mewakili batas linier dari kurva tegangan-regangan atau sesaat sebelum dinding mulai retak (Ewing & Kowalsky, 2004).



Gambar 4. Titik A-B-C-D-E untuk sendi plastis strat
Sumber: Ewing & Kowalsky (2004)

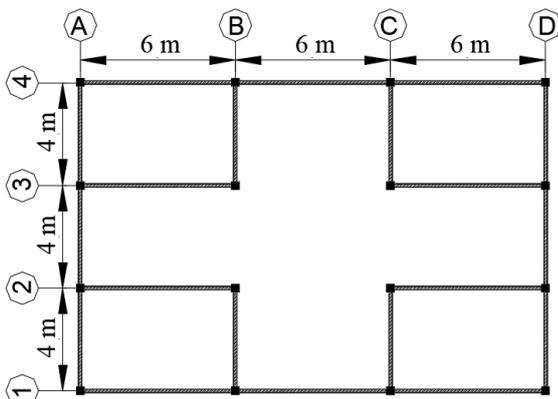
Kinerja Struktur

Hasil analisis static nonlinear pushover yang berupa kurva hubungan gaya geser dasar dan perpindahan dipakai sebagai dasar untuk menentukan level kinerja struktur. Perhitungan level kinerja ini dapat mengikuti ketentuan FEMA 440 yang merupakan modifikasi dari FEMA 356 yaitu dengan metode *Displacement Modification*. *Performance levels* dibedakan dalam 4 kategori (FEMA, 2000) yaitu:

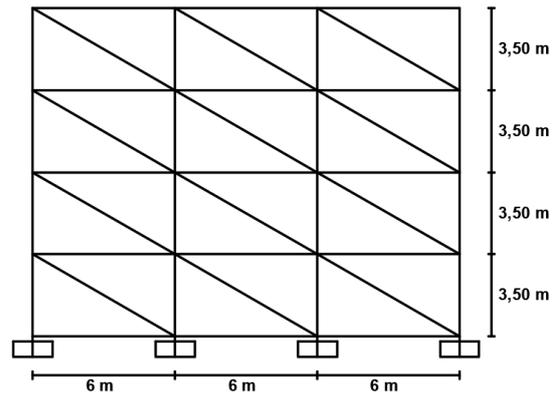
- a. *Full Operational (FO)*, dimana struktur dan nonstruktur tidak mengalami kerusakan, jadi struktur dapat sepenuhnya dimanfaatkan kembali.
- b. *Immediatety Occupancy (IO)*, dimana kerusakan minor terjadi namun bangunan dapat segera dipergunakan.
- c. *Life Safety (LS)*, dimana struktur mengalami kerusakan sedang namun tidak roboh sehingga tidak mengakibatkan kehilangan jiwa manusia.
- d. *Collapse Prevention (CP)*, dimana baik struktur maupun nonstruktur dari bangunan mengalami kerusakan parah namun tidak sampai runtuh total.

Data Struktur

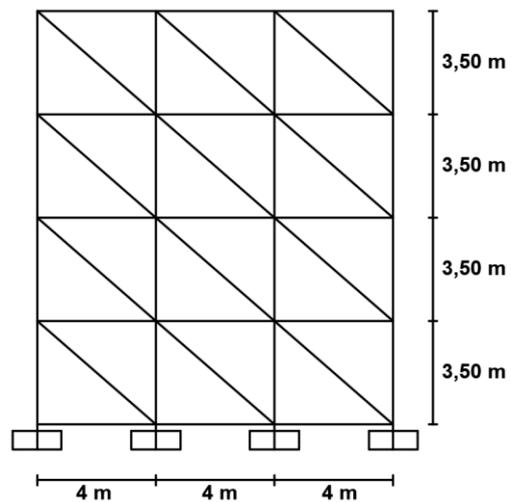
Struktur yang ditinjau dalam penelitian ini merupakan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus beton bertulang dari sebuah Gedung sekolah yang berada di wilayah kelas situs D di atas tanah sedang. Struktur rangka beraturan ini terdiri dari empat buah lantai dengan 3 bentang arah X dan Y dengan lebar masing-masing 6 m dan 4 m dan tinggi tiap lantainya sebesar 3,5 m. Denah tipikal semua lantai termasuk atap dan portal untuk keempat lantai ditunjukkan pada Gambar 5,6 dan 7.



Gambar 5. Denah tipikal Struktur



Gambar 6. Portal tepi grid 1 dan 4 arah memanjang gedung



Gambar 7. Portal grid A dan D arah melintang gedung

Pengurangan luas lantai sebagai akses tangga atau lantai tidak diperhitungkan dalam analisis untuk penyederhanaan seperti terlihat pada Gambar 5. Pada penelitian ini dibuat dua buah model struktur yaitu model struktur dengan perletakan jepit (M1) dan model struktur dengan menggunakan *base isolator* (M2). Pada Model M2, seluruh titik kolom terbawah yaitu antara pondasi dan sloof ditambahkan *base isolator* tipe *lead rubber bearing* (LRB).

Data Material dan Dimensi Struktur

- a) Material beton
 - Kuat tekan beton rencana (f'_c) : 25 MPa
 - Modulus elastisitas beton (E_c) : 23,5 GPa
 - Berat volume beton bertulang : 2,4 kN/m³
- b) Material baja tulangan
 - Berat jenis baja : 7,85 kN/m³
 - Modulus elastisitas baja (E_s) : 200 GPa
 - f_y tulangan longitudinal (f_{yl}) : 400 MPa
 - f_u tulangan longitudinal (f_{ul}) : 520 MPa
 - f_y tulangan transversal (f_{ys}) : 240 MPa
 - f_u tulangan transversal (f_{us}) : 370 MPa

- c) Dinding pasangan bata
 - Kuat tekan pasangan bata (f'_m) : 3,91 MPa
 - Modulus elastisitas (E_m) : 2932,5 MPa
 - Tebal dinding (t) : 150 mm
 - Berat jenis pasangan bata : 2,5 KN/m³
- d) Karet isolator
 - Modulus karet : 2500 MPa
 - Kekuatan tarik : 13,5 MPa
 - Regangan maksimum karet : 700%
 - Modulus geser karet : 0,55 MPa
 - Damping kritis : 14%
 - Berat jenis karet : 1150 kg/m³
- e) Dimensi struktur
 - Dimensi kolom : 450/450 mm
 - Dimensi balok induk lantai : 300/500 mm
 - Dimensi balok induk atap : 250/450 mm
 - Dimensi balok anak : 200/350 mm
 - Dimensi balok sloof : 200/400 mm
 - Tebal pelat lantai : 120 mm
 - Tebal pelat atap : 100 mm

- Type 3 (tengah) : 844.347,46 N/mm
- c) Berat tiap isolator
 - Type 1 (sudut) : 1218,315 N
 - Type 2 (tepi) : 1395,524 N
 - Type 3 (tengah) : 1639,187 N

Simpangan Struktur dan Simpangan Antar Lantai

Simpangan struktur dari setiap model yang ditinjau dihitung dari hasil analisis linear struktur. Struktur yang ditinjau pada penelitian ini merupakan struktur rangka pemikul momen dengan kategori risiko gempa IV sehingga simpangan antar lantai tingkat desain tidak boleh melampaui 0,010hsx. Nilai δ_i merupakan simpangan yang diperbesar pada tingkat ke-i yang diperoleh dengan mengalikan simpangan antar lantai dengan kuantitas (Cd/Ie), yang mana nilai faktor pembesaran defleksi (Cd) yaitu 5,5 dan faktor keutamaan gempa (Ie) sama dengan 1,5 untuk model M1 dan 1,0 untuk M2.

Simpangan struktur dan simpangan antar tingkat dari model yang ditinjau akibat beban gempa ditampilkan pada Gambar 8 dan 9. Hanya data simpangan total dan simpangan antar tingkat dalam Arah X yang ditampilkan pada tulisan ini sebagai ilustrasi perilaku struktur mempertimbangkan kondisi elastis dan juga denah yang hamper simetris.

Pembebanan pada Struktur

Beban-beban yang diperhitungkan bekerja pada struktur adalah beban mati (D), mati tambahan (*superimpose dead*), hidup (L), dan gempa (Ex dan Ey). Beban gempa dianalisis dengan metode static ekuivalen menggunakan fasilitas *auto lateral load* pada SAP 2000, sedangkan beban hidup sesuai dengan fungsi gedung sebagai sekolah adalah sebesar 1,92 kN/m² pada lantai dan 0,96 kN/m² pada pelat atap. Sedangkan kombinasi beban yang digunakan yaitu:

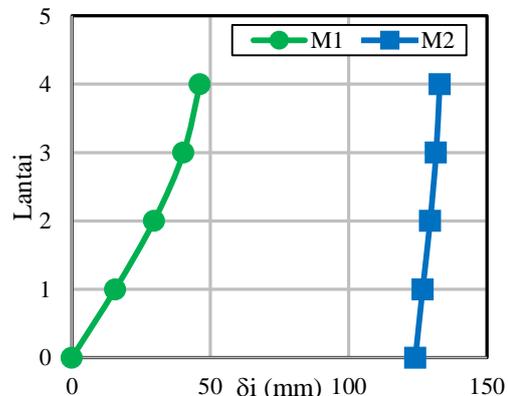
1. 1,4 D
2. 1,2 D+1,6 L
3. 1,2 D+1,0 L+1,0 Ex+0,3 Ey
4. 1,2 D+1,0 L+1,0 Ey+0,3 Ex
5. 0,9 D+1,0 Ex+0,3 Ey
6. 0,9 D+1,0 Ey+0,3 Ex

HASIL DAN PEMBAHASAN

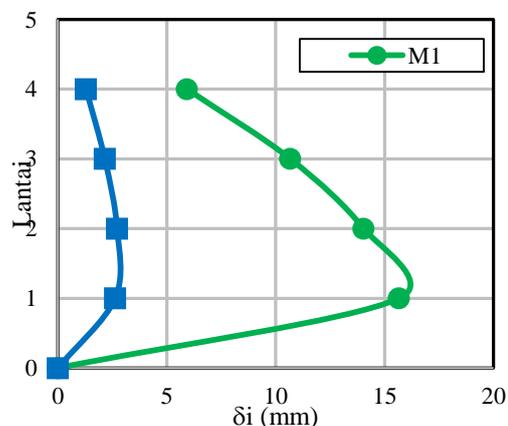
Perencanaan Base Isolator

Berdasarkan data material karet isolator dan besarnya reaksi perletakan yang didapat dari analisis linear struktur perletakan jepit dilakukan perhitungan berdasarkan persamaan pada Naeim and Kelly (1999) sehingga didapat kekakuan horisontal, kekakuan vertikal, dan berat tiap tipe isolator adalah sebagai berikut.

- a) Kekakuan horisontal
 - Type 1 (sudut) : 522,68 N/mm
 - Type 2 (tepi) : 685,79 N/mm
 - Type 3 (tengah) : 946,18 N/mm
- b) Kekakuan vertikal
 - Type 1 (sudut) : 462.022,37 N/mm
 - Type 2 (tepi) : 609.058,29 N/mm



Gambar 8. Simpangan struktur arah X akibat beban gempa arah X



Gambar 9. Simpangan antar tingkat arah X akibat beban gempa arah X

Gambar 9 menunjukkan simpangan antar tingkat kedua model struktur (M1 dan M2) telah memenuhi persyaratan simpangan ijin (SNI, 2012). Simpangan antar lantai terbesar pada model dengan perletakan jepit terdapat pada lantai 1 yaitu sebesar 15,67 mm dalam arah X. Untuk model dengan adanya penambahan *base isolator* memiliki simpangan antar lantai terbesar terdapat pada lantai 2 yaitu sebesar 2,72 mm pada arah X, sedangkan simpangan yang terjadi pada lantai dasar adalah sebesar 2,63 mm dalam arah X dan 4,13. Sehingga dapat disimpulkan bahwa dengan adanya penambahan *base isolator* pada tiap titik kolom struktur dapat mengurangi simpangan antar lantai dalam arah X sebesar 20%.

Tegangan Dinding Strat

Tegangan dinding pada strat dinyatakan dengan besarnya gaya aksial terbesar yang terjadi pada analisis linier pada dinding strat dibagi dengan luas penampang strat yang digunakan. Hal ini bertujuan untuk mengetahui bagaimana pengaruh penggunaan *base isolator* pada tiap kolom struktur terhadap tegangan yang terjadi pada dinding. Tegangan dinding strat yang ditinjau adalah pada dinding arah X dan arah Y. Tegangan dinding arah X dan arah Y untuk tiap model disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Tegangan Dinding Strat Arah X dan Arah Y

Model Struktur	Arah X			
	Gaya Aksial (N)	Luas Penampang Strat (mm ²)	Tegangan Dinding (N/mm ²)	Persentase (%)
M1	80.614,28	260.482,5	0,31	100%
M2	73.582,85	260.482,5	0,28	90,30%
Arah Y				
M1	98.327,89	199.315,5	0,50	100%
M2	87.299,67	199.315,5	0,44	88%

Berdasarkan Tabel 1 diatas, didapat nilai tegangan yang terjadi untuk dinding arah X dan arah Y lebih kecil dibandingkan dengan kuat tekan pasangan dinding yaitu sebesar 3,91 MPa. Hal ini menunjukkan bahwa dinding strat pada model M1 maupun M2 belum terjadi kerusakan akibat tegangan tekan.

Tegangan dinding strat dalam arah X dan arah Y yang terjadi pada M1 berturut-turut adalah sebesar 0,31 MPa dan 0,50 MPa, sedangkan tegangan dinding strat pada M2 dalam arah X dan arah Y berturut-turut sebesar 0,28 MPa (9,70% lebih kecil dibandingkan M1) dan 0,44 MPa (12,00% lebih kecil dibandingkan M1). Hal ini menunjukkan dengan adanya penambahan *base isolator* pada tiap

titik kolom struktur dapat mengurangi tegangan yang terjadi pada dinding strat diagonal.

Waktu Getar Alami Struktur

Waktu getar alami struktur adalah salah satu parameter yang dapat menunjukkan kekakuan suatu struktur. Struktur akan semakin fleksibel dan deformasi puncak yang terjadi akan semakin besar apabila nilai waktu getar alami struktur semakin besar. Waktu getar alami kedua model didapat dari waktu getar paling besar dari semua mode yang diperhitungkan. Nilai dan persentase perbandingan waktu getar alami dari kedua model dalam penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 2.

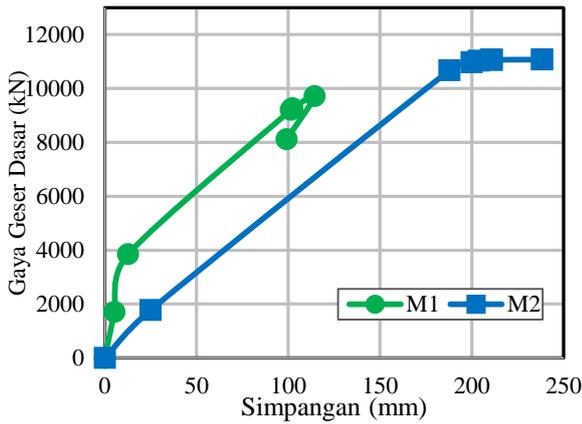
Tabel 2. Nilai waktu getar alami struktur

No.	Model	Waktu Getar Alami (detik)	Selisih (%)
1	M1	0,24766	-
2	M2	2,47275	998,45%

Dari Tabel 2 didapatkan hasil waktu getar alami struktur model dengan menggunakan *base isolator* lebih besar dari model dengan perletakan jepit. Didapatkan model dengan *base isolator* memiliki waktu getar alami struktur sebesar 2,47275 detik. Sedangkan model dengan perletakan jepit memiliki waktu getar alami struktur sebesar 0,24766 detik. Nilai dari waktu getar struktur dengan perletakan jepit ini menunjukkan bahwa struktur tersebut sangat efektif jika adanya penggunaan *base isolator* dikarenakan struktur eksisting tersebut memiliki waktu getar struktur yang kecil. Hasil ini sesuai dengan penelitian dari Teruna (2005) dimana penggunaan *base isolator* dapat meningkatkan waktu getar alami struktur.

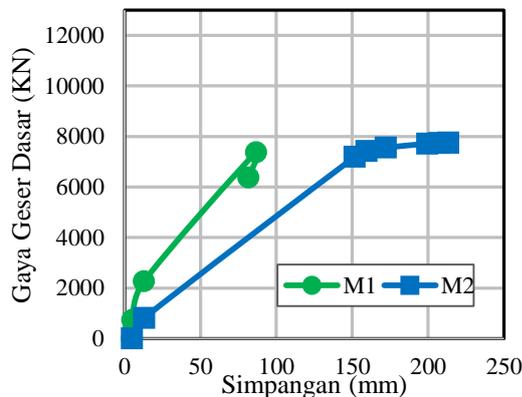
Kinerja Struktur

Setelah melakukan analisis statik nonlinier (*pushover*), maka diperoleh kurva *pushover* yang merupakan hubungan antara gaya geser dasar dan perpindahan. Kurva berbentuk linier ketika struktur masih dalam kondisi elastis, tetapi setelah mengalami leleh, bentuk kurva akan berubah menjadi nonlinier karena terjadi penurunan kekakuan struktur seiring dengan pertambahan beban yang diberikan. Gambar 10 dan 11 menampilkan kurva *pushover* model M1 dan M2 akibat pembebanan *pushover* arah X dan arah Y.



Gambar 10. Kurva Pushover Arah X

Gambar 10 menunjukkan kurva *pushover* dari model struktur M1 dan M2 pada Arah X. Dari Gambar 10 terlihat bahwa dalam kondisi elastis, M2 dapat menerima beban hingga 1.778,772 kN dengan perpindahan sebesar 25 mm, sedangkan M1 hanya mampu menerima beban hingga 1.699,571 kN dengan perpindahan sebesar 5,3 mm. Setelah terjadi leleh pertama, simpangan struktur mengalami peningkatan hingga mencapai beban maksimum untuk M2 sebesar 11.072 kN dengan simpangan mencapai 238,33 mm, sedangkan untuk M1 mampu mencapai beban maksimum sebesar 9.707 kN (14,06% lebih kecil dari M2) dengan simpangan mencapai 114,41 mm (108% lebih kecil dari M2). Ini menunjukkan bahwa struktur dengan *base isolator* lebih fleksibel dibandingkan dengan struktur dengan perletakan jepit. Pada grafik terlihat dengan adanya penggunaan *base isolator* pada tiap kolom struktur dapat menambah simpangan struktur dengan menahan beban maksimum yang lebih besar dari struktur dengan perletakan jepit.



Gambar 11. Kurva Pushover Arah Y

Target Perpindahan

Perhitungan target perpindahan (δ_t) mengacu pada FEMA 440 dengan input parameternya yang telah diadopsi dalam software SAP2000 ver.19. Hasil

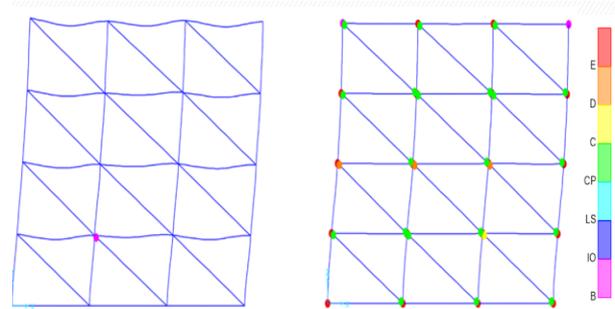
perhitungan setelah melakukan analisis statis nonlinier pushover disajikan pada Tabel 3. Perpindahan target terbesar terjadi pada M2 baik untuk Arah X maupun Arah Y, begitu pula dengan gaya geser dasar yang mampu dipikul oleh struktur.

Tabel 3. Target perpindahan menurut FEMA 440 DM

Parameter	PUSH X		PUSH Y	
	M1	M2	M1	M2
V_T (KN)	4801,85	5982,61	4390,32	4924,40
Δ_T (mm)	21,76	101,95	35,83	102,31

Mekanisme Terbentuknya Sendi Plastis

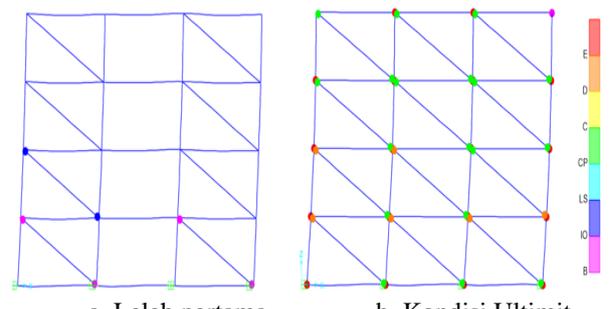
Sendi plastis yang terjadi pada elemen struktur selama analisis pushover dapat menggambarkan mekanisme keruntuhan dari struktur. Sendi plastis pertama yang terjadi mengindikasikan salah satu elemen struktur sudah mencapai leleh, dengan beban gempa meningkat maka jumlah sendi plastis juga meningkat begitu juga kapasitas dari sendi plastis meningkat sampai mencapai kondisi ultimit. Bila salah satu sendi plastis mencapai kapasitas ultimit maka struktur dianggap mencapai keruntuhan. Gambar 12 dan 13 adalah sendi plastis pada portal arah X dari model M1 dan M2 sedangkan Gambar 14 dan 15 adalah mekanisme sendi plastis dalam Arah Y. Mekanisme ini dapat mengidentifikasi perilaku keruntuhan struktur. Sedangkan level kinerja struktur ditentukan berdasarkan target perpindahan.



a. Leleh pertama (step 1)

b. Kondisi Ultimit (step 5)

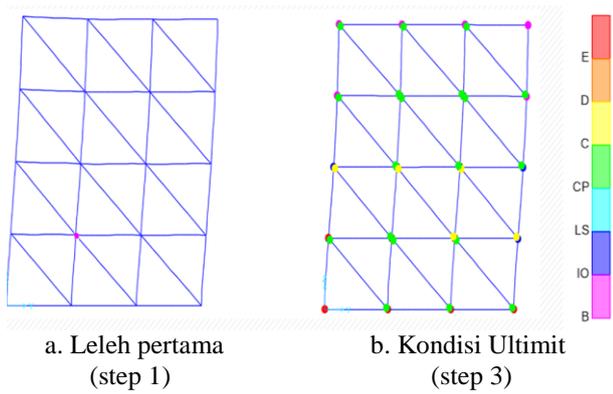
Gambar 12. Tahapan kelelahan model M1 akibat Push X



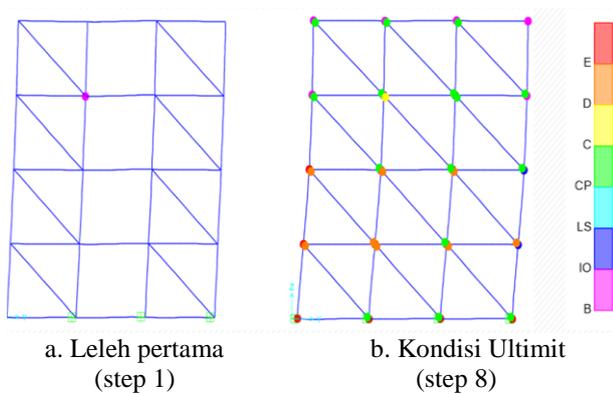
a. Leleh pertama (step 1)

b. Kondisi Ultimit (step 8)

Gambar 13. Tahapan kelelahan model M2 akibat *Push X*



Gambar 14. Tahapan kelelahan model M1 akibat *Push Y*



Gambar 15. Tahapan kelelahan model M2 akibat *Push Y*

Pada M2 saat kondisi leleh pertama akibat *Push X*, sendi plastis lebih banyak terjadi dibandingkan M1 dan sudah ada dinding strat berada pada level IO sedangkan pada M1 masih pada level B. Akibat dari *Push Y*, saat kondisi ultimit model M2 sudah ada dinding strat berada pada level D atau *Residual Point* sedangkan pada M1 masih berada pada level C atau *Collapse*

Evaluasi Kinerja Struktur

Level kinerja struktur dievaluasi berdasarkan target perpindahan FEMA 440. Level kinerja kedua model struktur (M1 dan M2) dapat dilihat pada Tabel 4 baik untuk arah X maupun arah Y. Adapun level kinerja dari kedua model adalah *beyond to E (failure)*. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan *base isolator* pada setiap kolom terbawah belum mampu mengubah level kinerja struktur, namun dapat mengurangi jumlah sendi plastis pada kondisi E (*failure*).

Tabel 4. Evaluasi kinerja struktur menurut FEMA 440

	PUSH X		PUSH Y	
	M1	M2	M1	M2
V_T (kN)	4801,847	5982,606	4390,32	4924,40
Δ_T (mm)	21,758	101,95	35,83	102,308
Jumlah sendi plastis yang terbentuk	87	72	55	41
Level Kinerja	<i>Failure</i>	<i>Failure</i>	<i>Failure</i>	<i>Failure</i>

Gaya Geser Dasar

Kemampuan struktur dalam memikul besarnya beban gempa ditinjau dari gaya geser dasar yang terjadi pada saat kondisi ultimit struktur (V_u) dari hasil analisis statik nonlinear *pushover*. Tabel 5 menunjukkan perbandingan gaya geser dasar dari struktur menggunakan *base isolator* dengan model perletakan jepit untuk arah X dan Y.

Tabel 5. Perbandingan gaya geser dasar kedua model

Model Struktur	Arah X		Arah Y	
	Gaya Geser Dasar (V_u)	Prosentase	Gaya Geser Dasar (V_u)	Prosentase
	(kN)	(%)	(kN)	(%)
M1	9.707	100%	7.363	100%
M2	11.072	114%	7.747	105%

Berdasarkan Tabel 5 dapat disimpulkan bahwa gaya geser dasar ultimit yang diperoleh setelah dilakukan analisis *pushover* untuk model dengan perletakan jepit adalah sebesar 9.707 kN dalam arah X dan 7.363 kN dalam arah Y, sedangkan untuk model dengan penggunaan *base isolator* adalah sebesar 11.072 kN dalam arah X dan 7.747kN dalam arah Y. Penggunaan *base isolator* pada struktur dapat meningkatkan kemampuan struktur memikul gaya geser dasar sebesar 14% dalam arah X dan 5% pada arah Y jika dibandingkan dengan model struktur perletakan jepit.

Kekakuan Struktur

Kekakuan struktur dalam arah lateral diperoleh dari perbandingan gaya geser dasar dengan simpangan lateralnya. Dalam penelitian ini hanya ditinjau kekakuan struktur pada kondisi leleh untuk mengetahui kekakuan struktur pada saat kondisi leleh mulai terjadi pada salah satu bagian dari struktur. Tabel 6 menunjukkan kekakuan struktur untuk seluruh model baik dalam Arah X maupun Y.

Tabel 6. Kekakuan struktur kedua model

Model Struktur	Arah X			
	δy	V_y	Kekakuan Struktur	Persentase
	(mm)	(kN)	(kN/mm)	(%)
M1	5,3	1.699,57	320,67	100%
M2	25	1.778,77	71.15	22,19%
Arah Y				
M1	5	731,7	146,34	100%
M2	12,75	807,16	63,31	43,26%

Berdasarkan Tabel 6, penambahan *base isolator* pada tiap kolom struktur dapat memperkecil kekakuan struktur secara drastis. Kekakuan struktur pada model dengan penambahan *base isolator* sebesar 71,15 kN/mm dan 63,31 kN/mm berturut-turut untuk Arah X dan Y. Sedangkan Kekakuan struktur dengan perletakan kolom jepit adalah masing-masing sebesar 320,67 kN/mm dan 146,34 kN/mm untuk arah X dan Y. Hal ini menunjukkan bahwa pada model perletakan jepit jauh lebih kaku dibandingkan dengan model dengan penambahan *base isolator* pada tiap kolom struktur. Nilai ini sesuai dengan prinsip penggunaan *base isolator* yang memiliki kekakuan arah horisontal yang kecil sehingga mudah bergerak dalam arah horisontal.

SIMPULAN

Hasil analisis dan pembahasan yang telah dilakukan untuk mengevaluasi kinerja struktur rangka dinding pengisi dengan perletakan jepit (M1) dan dengan *base isolator* (M2) maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Penggunaan *base isolator* pada tiap kolom struktur dapat meningkatkan kemampuan struktur memikul gaya geser sebesar 14% untuk Arah X dan sebesar 5% untuk Arah Y.
2. Struktur dengan atau tanpa *base isolator* menunjukkan level kinerja struktur *beyond to E (failure)* baik untuk arah X dan arah Y.
3. Penggunaan *base isolator* pada kolom struktur terbawah dapat mengurangi kekakuan struktur hingga 77,81% dalam arah X dan 56,74% dalam arah Y.
4. Penggunaan *base isolator* pada kolom struktur terbawah dapat mengurangi tegangan yang terjadi pada dinding strat hingga 9,7% pada dinding arah X dan 2% pada dinding arah Y.
5. Penggunaan *base isolator* dapat mengurangi simpangan antar lantai dalam arah X sebesar 20% dan dalam arah Y sebesar 35%.
6. Penggunaan *base isolator* dapat meningkatkan waktu getar alami struktur hingga 998,45% dibandingkan dengan struktur perletakan jepit.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu dalam penerbitan karya Ilmiah ini.

DAFTAR PUSTAKA

Andrian, W., Faimun, Wahyuni, E. 2017. *Evaluasi Kinerja Gedung Menggunakan Base Isolation Tipe High Damping Rubber Bearing (HDRB) Pada Modifikasi Gedung J-Tos Jogjakarta Dengan Perencanaan Analisis Pushover*. Jurnal Teknik ITS Vol. 6, No. 2 (2017), 2337-3520 (2301-928X).

Asteris, P.G., Giannopoulos, I.P., & 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.

Ewing, B. D., & Kowalsky, M. J. 2004. Compressive Behavior of Unconfined and Confined Clay Brick Masonry. *J. Struct. Eng.*, 130(4), 650–661

FEMA. 2000. *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings (FEMA-356)*. Federal Emergency Management Agency, Washington D.C.

Japa, I G.B.N.P. 2008. *Pengaruh Penempatan Base Isolator Terhadap Perilaku Struktur Gedung Dalam Menerima Beban Gempa*. (Tugas Akhir yang tidak dipublikasikan, Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Udayana, 2008).

Kelly, T.E. 2001. *Base Isolation Of Structures*. Holmes Consulting Group, New Zealand.

Mainstone, R.J. 1971. The Influence of Bounding Frame on the Racking Stiffnes and Strength of Brick Walls. *Proceedings of the 2nd International Brick Masonry Conference, Building Research Establishment 1970*, pp. 165-171

Naeim, F. and Kelly, J.M. 1999. *Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice*. John Wiley & Sons, Inc., New York.

Paulay, T., & Priestley, M. J. 1992. *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*. Canada: John Wiley and Sons, Inc.

Soetanto, R.M., Hindrajaya, G.G., Pudjisuryadi, P., and Lumantara, B. 2015. *Penggunaan Friction Base Isolation Pada Rumah Sederhana*. Universitas Kristen Petra: Jurnal Dimensi Pratama Teknik Sipil.

- Teruna, D. R. 2005a. *Perencanaan Bangunan Tahan Gempa dengan Menggunakan Base Isolator (LRB): Contoh Kasus Gedung Auditorium Universitas Cendrawasih, Papua*. Seminar dan Pameran HAKI 2007, "Konstruksi Tahan Gempa di Indonesia".
- _____. 2005b. Analisis Respon Bangunan Dengan Base Isolator Akibat Gaya Gempa, 6(August), 0–6.