

PERBANDINGAN PERILAKU STRUKTUR BETON BERTULANG ANALISIS SISTEM DINDING BATA SEBAGAI STRUT DENGAN SISTEM *OPEN FRAME*

(Studi Kasus: Gedung Rumah Toko, Jalan A. A. Gede Ngurah No 112 Mataram, NTB)

I Made Kusuma Wiranata¹⁾, I Ketut Yasa Bagiarta²⁾, I Wayan Jawat²⁾

1) Alumni Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Warmadewa

2) Dosen Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Warmadewa

ABSTRAK

Pada umumnya dinding pengisi pada perencanaan gedung hanya dianggap sebagai beban mati yang terbagi rata (open frame) dan tidak diperhitungkan sebagai komponen struktural, akan tetapi dinding pengisi memiliki pengaruh terhadap gaya – gaya dalam dan perilaku struktur. Dalam analisis ini dilakukan perbandingan dua model struktur dengan studi kasus gedung rumah toko, untuk mengetahui perbandingan perilaku struktur beton bertulang yang memperhitungkan dinding pengisi dan yang tidak memperhitungkan dinding pengisi. Model yang pertama dibuat sebagai model open frame dan yang kedua dinding pengisi dibuat sebagai diagonal strut. Kedua model ini dianalisis menggunakan alat bantu software SAP 2000 versi 17.1.1, dan kinerja strukturnya dilakukan dengan Analisis Beban Dorong Statis Non linier (Non Linear Static Pushover Analysis) yang telah tersedia dalam program SAP 2000 versi 17. Analisis ini menghasilkan perbandingan gaya – gaya dalam yang terjadi dari dua model tersebut, perbandingan simpangan antar tingkat dan kinerja struktur yang berupa kurva pushover. Dari analisis tersebut memperlihatkan simpangan antar tingkat yang terjadi pada model open frame lebih besar dibanding dengan simpangan model strut sebesar 40 % pada arah X dan 63% pada arah Y. Perbandingan gaya – gaya dalam yang terjadi yaitu pada perbandingan dengan beban gravitasi maupun beban gempa keberadaan dinding pengisi memiliki kecenderungan mengurangi momen yang terjadi apalagi pengaruh beban gempa dengan perbandingan yang paling besar yaitu sebesar 69% pada kolom 3 portal D, akan tetapi untuk gaya aksial dan gaya geser yang terjadi dapat terjadi lebih besar. Dari analisis pushover, model open frame mampu menerima beban hingga 6925463,21 Newton dan perpindahan target 53,99 mm dengan level kinerja Collapse (C), sedangkan pada model strut mampu menerima beban hingga 8215111,00 Newton dan perpindahan target 55,89 mm dengan level kinerja Collapse (C). Untuk arah Y model open frame mampu menerima beban hingga 8554807,32 Newton dan perpindahan target 66,91 mm dengan level kinerja Collapse (C), sedangkan pada model strut mampu menerima beban hingga 10952469,00 Newton dan perpindahan target 66,43 mm dengan level kinerja Collapse (C). Nilai daktilitas aktual pada model open frame yaitu 3,11 untuk arah X dan 4,31 untuk arah Y, sedangkan pada model strut yaitu 2,96 untuk arah X dan 2,98 untuk arah Y.

Kata kunci: model *open frame*, model *strut*, gaya dalam, analisis pushover

1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada umumnya dinding pengisi pada perencanaan gedung hanya dianggap sebagai beban mati yang terbagi rata (*open frame*) dan tidak diperhitungkan sebagai komponen struktural. Pada kenyataannya perilaku suatu rangka dengan dinding pengisi jika diberi gaya horizontal (gaya gempa) akan sangat berbeda dibandingkan dengan perilaku rangka saja (*open frame*), akan tetapi kekuatan dinding pengisi masih saja diabaikan. Hal ini dikarenakan masih belum ada peraturan yang mengatur tentang hal ini. Namun perilaku struktur dengan dinding pengisi terhadap pembebanan lateral telah lama diselidiki. Dari beberapa penelitian yang ada, pemodelan dinding bata sebagai *strut* diagonal dinilai paling sederhana. Untuk lebih mudah menganalisa perilaku non liniernya, beberapa peneliti mengusulkan penggunaan Analisa Beban Dorong Statik (*static pushover analysis*). Karena beberapa program komputer seperti SAP 2000 telah mempunyai kemampuan untuk melakukan analisa *static pushover* tersebut (Leksono, 2012).

Sehingga pada tugas akhir ini akan dilakukan analisis perilaku struktur gedung terhadap dinding pengisi bata. Analisis ini dilakukan pada zona gempa Lombok. Analisis ini akan dilakukan dengan membandingkan perilaku dan gaya – gaya dalam yang terjadi pada struktur rangka terbuka (*Open Frame*) dengan struktur rangka sistem *strut* dengan bantuan *software* SAP 2000 versi 17.1.1.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas maka rumusan masalahnya adalah Bagaimanakah perbandingan perilaku dan gaya – gaya dalam yang terjadi pada struktur rangka terbuka (Model *Open Frame*) dengan struktur rangka sistem *strut* (Model *Strut*)?

1.3 Tujuan

Adapun tujuan penulisan ini adalah:

1. Untuk mengetahui perbandingan perilaku struktur rangka terbuka (*open frame*) dengan struktur rangka sistem *strut*.
2. Untuk mengetahui perbandingan gaya – gaya dalam yang terjadi pada struktur rangka terbuka (*open frame*) dengan struktur rangka sistem *strut*.

1.4 Batasan Analisis

Masalah pada analisis ini dibatasi pada:

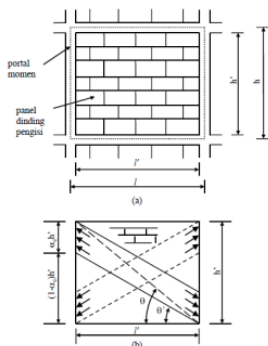
1. Untuk peraturan pembebanan menggunakan SNI 1727:2013 Beban Minimum Untuk Perencanaan Bangunan Gedung dan Struktur Lain.
2. Untuk desain pembebanan gempa menggunakan SNI 1726:2012 Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung.
3. Analisa perilaku non – liniernya menggunakan Analisa Beban Dorong Statik (*Static Pushover Analysis*), dengan program bantu SAP 2000 Versi 17.1.1.
4. Analisis dilakukan hanya memperhatikan perilaku struktur dan gaya – gaya dalam yang terjadi pada kolom dan balok.
5. Dinding bata yang memiliki bukaan hanya dianggap sebagai beban mati merata pada balok.
6. Perilaku struktur yang akan ditinjau pada analisis ini yaitu akan membandingkan perilaku simpangan, keruntuhan *soft storey*, daktilitas dan mekanisme terjadinya sendi plastis dari struktur *open frame* dan struktur rangka sistem *Strut*.
7. Data – data mengenai dinding bata sebagai *Strut* akan diambil dari beberapa literatur/penelitian mengenai dinding pengisi sebagai *Strut* yang telah dilakukan sebelumnya.

8. Dinding bata pada gedung yang dianalisis merupakan pasangan dinding setengah bata.
9. Dinding bata yang dianalisis merupakan dinding bata penuh (tanpa penyekat).
10. Dimensi elemen-elemen struktur yang digunakan dalam analisis ini merupakan dimensi struktur yang telah dianalisis sebelumnya.

2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Dinding Bata sebagai *Strut Diagonal*

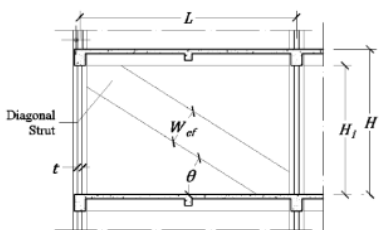
Dinding bata dianggap sebagai *strut diagonal* seperti gambar berikut:



Gambar 1. Simulasi Model Dinding Bata
 Sumber: (Imran, Helmy Hermawan Tjahjanto dan Iswandi, 2009)

2.2 Equivalent Diagonal Strut

Dimensi *strut* dihitung dengan persamaan berikut:(Tubuh, 2014)



Gambar 2. Parameter perhitungan lebar *equivalent diagonal strut*

$$\lambda_h = \sqrt[4]{\frac{E_i t \cdot \sin 2\theta}{4 \cdot E_c \cdot l_c \cdot H_i}}$$

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

Keterangan:

- H : tinggi dari kolom terhitung dari as ke as tingkat,
- E_i : modulus elastisitas kolom pasangan dinding pengisi,
- E_c : modulus elastisitas kolom,
- H_i : tinggi dinding pengisi,
- t : tebal dari dinding pengisi,
- θ : sudut yang dibentuk antara strut dengan balok, diperhitungkan dalam satuan radian.

Sebuah *strut* dengan lebar *W_{ef}* dan tebal memiliki luasan penampang *A_{ms}*. Kemudian dibagi menjadi tiga buah dengan pembagian luas penampang untuk diagonal pertama pada bagian tengah setengah dari *A_{ms}*, sedangkan diagonal di kiri dan kanannya seluas seperempat *A_{ms}* (Tubuh, 2014)

2.3 Tegangan pada Dinding Pengisi

Keruntuhan yang terjadi pada dinding pengisi meliputi geser, tarik, dan tekan. Kegagalan geser terjadi akibat gaya lateral *Q*, tegangan tarik dan tegangan tekan vertikal pada dinding pengisi dirumuskan dalam persamaan (Smith & Coull, 1991):

Tegangan geser,

$$\tau_{xy} = \frac{1,4Q}{L \cdot t}$$

Tegangan tarik diagonal,

$$\sigma_d = \frac{0,58Q}{L \cdot t}$$

Tegangan tekan diagonal,

$$\sigma_y = \frac{(0,8 \frac{h}{L} - 0,2)Q}{L \cdot t}$$

Keterangan:

- Q = Gaya lateral
- L = Panjang dinding pengisi
- H = tinggi dinding pengisi
- T = ketebalan dinding pengisi

Besarnya tegangan ultimate pada dinding pengisi diberikan pada persamaan berikut:

Tegangan geser ultimate

$$0,3\sqrt{f'm}$$

Tegangan tarik ultimate

$$0,1\sqrt{f'm}$$

Tegangan tekan ultimate

$$f'm$$

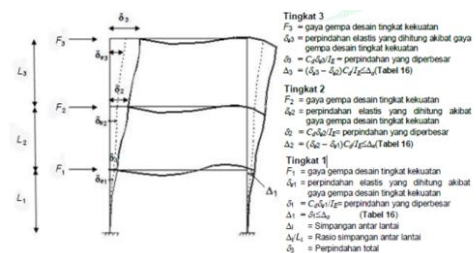
2.4 Perilaku Struktur terhadap Gaya Gempa

Struktur portal merupakan hubungan antara balok dan kolom saling sambung menyambung sedemikian sehingga membuat *grid – grid* atau membentuk suatu portal bertingkat (Pawirodikromo, 2012). Frame yang mempunyai join penahan momen disebut Momen Resisting Frame (MRF). Adanya pengekanan adalah sifat – sifat dari struktur statis tak tentu. Dengan asumsi seperti itu maka rotasi join hanya semata – mata karena beban luar atau goyangan akibat beban gempa dan bukan akibat deformasi inelastik pada joint itu sendiri. Momen Resisting Frame termasuk struktur yang relatif fleksibel. Akibat kombinasi beban gravitasi dan beban horizontal, MRF akan berdeformasi utamanya secara horizontal akibat shear deformation. (Pawirodikromo, 2012)

Banyak struktur portal didesain dengan portal terbuka (*open frame*). Pada kenyataannya portal yang didesain tidak selalu terbuka tetapi sering diisi dengan dinding – dinding tembok. Tembok – tembok pengisi tersebut umumnya mempunyai kekakuan yang besar tetapi kekakuan dan daktilitasnya relatif terbatas. Apabila tembok – tembok tersebut kontak secara rapat dengan portal (tidak renggang), maka tembok tersebut dapat menyumbangkan kekakuan terhadap portal melalui kemampuan tembok untuk menahan gaya desak (Pawirodikromo, 2012).

2.5 Simpangan Batas

Nilai untuk masing – masing parameter desain terkait gayayang ditinjau, termasuk simpangan antar lantai tingkat, gaya dukung, dan gaya elemn struktur individu untuk masing – masing respons harus dihitung menggunakan *property* masing – masing ragam dan spektrum respons didefinisikan dalam 6.4 atau 6.10.2 dibagi dengan kuantitas (R/I_e). Nilai untuk perpindahan dan kuantitas simpangan antar lantai harus dikalikan dengan kuantitas (C_d/I_e).



Gambar 3. Penentuan simpang antar lantai

2.6 Soft Story

Keruntuhan soft storey dicek melakukan persamaan berikut:

$$Dr_i > 1,3Dr_{i+1}$$

Atau

$$Dr_i > 1,8 \left(\frac{Dr_{i+1} + Dr_{i+2} + Dr_{i+3}}{3} \right)$$

Dengan:

$$Dr \text{ (drift ratio)} = \frac{\Delta_i}{h_i}$$

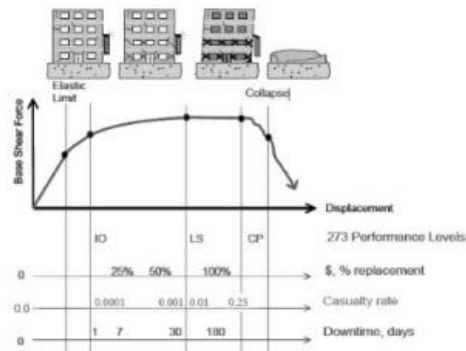
Δ_i = Simpangan antar tingkat lantai ke-i

h_i = tinggi tingkat ke-i

2.7 Kinerja Struktur dan Analisis Statik Non Linear (*Pushover Analysis*)

Menurut Lumantarna (2008), Analisis Beban Dorong Statis Non linier (*Non Linear Static Pushover Analysis*) adalah dimana struktur didorong secara bertahap ditingkatkan dengan faktor pengali hingga beberapa komponen struktur mengalami leleh dan berdeformasi inelastis dan satu

target perpindahan lateral dari suatu titik acuan tercapai.



Gambar 4. Ilustrasi Rekayasa Gempa Berbasis Kinerja

(Sumber: ATC 58)

Tahapan utama dalam analisa pushover adalah (Leksono, 2012):

1. Menentukan titik kontrol untuk memonitor besarnya perpindahan struktur. Rekaman besarnya perpindahan titik kontrol dan gaya geser dasar digunakan untuk menyusun kurva *pushover*.
2. Membuat kurva *pushover* berdasarkan berbagai macam pola distribusi gaya lateral terutama yang ekuivalen dengan distribusi dari gaya inerti, sehingga diharapkan deformasi yang terjadi hampir sama atau mendekati deformasi yang terjadi akibat gempa. Oleh karena sifat gempa adalah tidak pasti, maka perlu dibuat beberapa pola pembebanan lateral yang berbeda untuk mendapatkan kondisi yang paling menentukan.
3. Estimasi besarnya perpindahan lateral saat gempa rencana (target perpindahan). Titik kontrol didorong sampai taraf perpindahan tersebut, yang mencerminkan perpindahan maksimum yang diakibatkan oleh

intensitas gempa rencana yang ditentukan.

4. Mengevaluasi level kinerja struktur ketika titik kontrol tepat berada pada target perpindahan merupakan hal utama dari perencanaan berbasis kinerja. Komponen struktur dan aksi perilakunya dapat dianggap memuaskan jika memenuhi kriteria yang dari awal sudah ditetapkan, baik terhadap persyaratan deformasi maupun kekuatan.

Kurva *pushover* dapat digambarkan secara kualitatif kondisi kerusakan yang terjadi pada level kinerja yang ditetapkan agar awam mempunyai bayangan seberapa besar kerusakan itu terjadi. (Leksono, 2012)

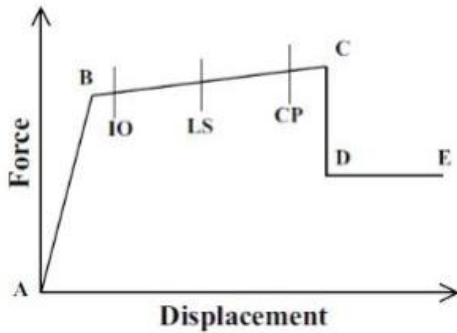
Tingkat kinerja struktural pada FEMA 273 terdiri dari (Building Seismic Safety Council, 1997):

1. *Operational (O) Level*, yaitu kerusakan yang terjadi sangat kecil, dan bangunan masih dapat berfungsi.
2. *Immediate Occupancy (IO) Level*, yaitu bangunan masih pada tingkat aman untuk ditempati (tingkat hijau), dan perbaikan – perbaikan yang terjadi sangat kecil.
3. *Life – Safety (LS) Level*, yaitu struktur bangunan tetap stabil dan memiliki ambang yang cukup terhadap keruntuhan. Kerusakan non struktural yang berbahaya masih dapat dikendalikan.
4. *Collapse Prevention (CP) Level*, yaitu Struktur bangunan tetap berdiri tetapi nyaris runtuh. Kecelakaan akibat kejatuhan material bangunan sangat mungkin terjadi.

2.8 Sendi Plastik Balok dan Kolom

Sendi plastis merupakan bentuk ketidakmampuan struktur dalam menahan gaya dalam. Pemodelan sendi digunakan untuk mendefinisikan perilaku non linier gaya-perpindahan atau momen-rotasi yang dapat ditempatkan pada beberapa tempat

berbeda di sepanjang bentang balok atau kolom. Pemodelan sendi adalah *rigid* dan tidak memiliki efek pada perilaku linier.

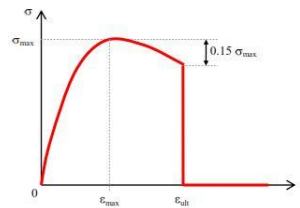


Gambar 5. Model Sendi Plastis untuk Balok dan Kolom

Hubungan gaya dengan perpindahan ditampilkan pada Gambar 5 menunjukkan model sendi plastis menurut FEMA 356. Grafik tersebut juga berlaku untuk hubungan momen dengan rotasi. *Hinge properties* yang digunakan dianalisis dengan program SAP2000 pada fitur *automatic hinge*, sesuai material dan *acceptance criteria* yang digunakan. *Acceptance criteria* pada Table 6-7 dan 6-8 FEMA 356 adalah untuk balok dan kolom dengan material beton.

2.9 Sendi Plastis Strut

Untuk membatasi deformasi pasca puncak, diberikan kondisi ultimate pada hubungan tegangan-regangan material yaitu tercapainya regangan pada saat tegangan mengalami penurunan sebesar 15% terhadap tegangan maksimum. Setelah mencapai regangan ultimit, element truss dianggap tidak berkontribusi terhadap kekakuan struktur. Untuk mengakomodasi asumsi tersebut, dilakukan perpanjangan kurva tegangan regangan yaitu untuk regangan yang lebih besar dari regangan ultimit nilai tegangan adalah nol, ditunjukkan pada Gambar 6.

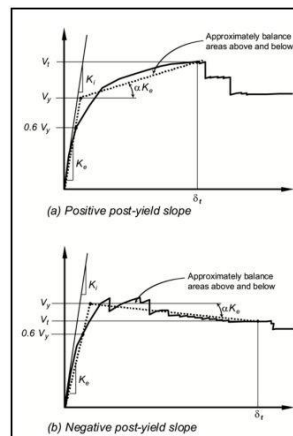


Gambar 6. Hubungan Tegangan-Regangan Tipikal Material Dinding Pengisi
 Sumber : (Imran, Helmy Hermawan Tjahjanto dan Iswandi, 2009)

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

2.10 Idealisasi Kurva Pushover

Kurva hubungan non linier antara gaya geser dasar dan perpindahan titik kontrol atau kurva Pushover, dapat diidealisasikan menjadi kurva bilinear untuk mengestimasi kekakuan efektif (K_e) dan kuat leleh bangunan (V_y), seperti pada Gambar 7.



Gambar 7. Idealisasi Kurva Force-Displacement

Sumber : (American Society of Civil Engineers, 2000)

Hubungan ini harus membentuk garis bilinear dengan kemiringan awal (K_e) dan kemiringan pasca leleh berupa sudut α . Kekakuan lateral (K_e) merupakan nilai *secant stiffness* yang dihitung dari gaya geser dasar yang mempunyai nilai sama dengan 60% dari kuat leleh. Namun, karena kuat leleh diperoleh dari titik potong kekakuan lateral efektif pada kondisi elastis (K_e) dan kondisi inelastis (αK_e), maka prosesnya dilakukan secara trial and error. Selanjutnya dari idealisasi kurva, dapat dihitung waktu getar alami (T_e) dengan persamaan berikut.

$$T_e = T_i \sqrt{\frac{K_i}{K_e}}$$

Nilai kekakuan elastis didapatkan dari rumus kesetimbangan statik, dengan mengambil gaya geser dasar gempa yang terjadi dan simpangan pada saat struktur masih berperilaku elastis dan periode awal alami pada kondisi elastis (T_i) merupakan periode bangunan dalam kondisi elastis. Kemiringan pasca leleh α , penentuan titik awalnya merupakan perpotongan garis K_e dengan V_y , kemudian garis diteruskan melewati kurva Pushover aktual dan berhenti pada perpindahan target yang telah ditentukan.

2.11 Perpindahan Target

Kriteria evaluasi level kinerja kondisi bangunan didasarkan pada gaya dan deformasi yang terjadi ketika perpindahan titik kontrol minimal sama dengan perpindahan target (δ_T). Jadi parameter perpindahan target sangat penting peranannya bagi perencanaan berbasis kinerja. Salah satu metode yang digunakan untuk menentukan perpindahan target adalah *Coefficient Method* FEMA 356. Pada *Coefficient Method* FEMA 356, perhitungan dilakukan dengan memodifikasi respons elastis linier sistem struktur SDOF ekuivalen dengan faktor modifikasi C_0, C_1, C_2 dan C_3 sehingga diperoleh perpindahan global maksimum (elastis dan inelastis) yang disebut perpindahan target.

2.12 Daktailitas

Nilai Daktailitas aktual struktur (μ_Δ) dan faktor reduksi gempa aktual (R) dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut.

$$\mu_\Delta = \frac{\delta_u}{\delta_y}$$

$$R = f_1 \cdot \mu_\Delta$$

dengan:

μ_Δ = Daktailitas Struktur

δ_u = Simpang titik leleh pertama

δ_y = Simpang maksimum struktur

R = Faktor Reduksi Gempa

f_1 = Faktor kuat lebih, yaitu 1,6 (SNI 03-1726-2002)

Secara umum daktailitas dibagi menjadi 3 level yaitu elastik penuh, daktail terbatas (parsial) dan daktail penuh.

2.13 Analisa Beban

Pembebanan yang digunakan dalam analisa ini didasarkan pada SNI 1727:2013 tentang Beban minimum untuk perancangan bangunan gedung dan struktur lain. (Badan Standarisasi Nasional, 2013)

Struktur gedung direncanakan kekuatannya terhadap :

1. Beban mati (D)
2. Beban hidup (L)
3. Beban hidup atap (Lr)
4. Beban angin (W)
5. Beban hujan (R)
6. Beban gempa (E)

2.14 Kombinasi Beban

Menurut SNI 1726:2012, Pasal 4.2.2, struktur, komponen-elemen struktur dan elemen – elemen fondasi harus dirancang sedemikian hingga kuat rencananya sama atau melebihi pengaruh beban – beban terfaktor dengan kombinasi – kombinasi berikut:

1. $1,4D$
2. $1,2D + 1,6L + 0,5(L_r \text{ atau } R)$
3. $1,2D + 1,6(L_r \text{ atau } R) + (L \text{ atau } 0,5W)$

4. $1,2D + 1,0W + L + 0,5(L_r \text{ atau } R)$
5. $1,2D + 1,0E + L$
6. $0,9D + 1,0W$
7. $0,9D + 1,0E$

3 METODE PENELITIAN

3.1 Lokasi dan Waktu Analisis

Analisis ini mengambil lokasi perencanaan dengan wilayah gempa Lombok, dengan studi kasus gedung rumah toko Jalan A. A. Gede Ngurah No 112 Mataram, NTB. Dan waktu analisis dilakukan selama empat bulan dari bulan April – Agustus 2015.

3.2 Sumber Data

Sumber data yang digunakan pada analisis ini adalah Data Skuender berupa data perencanaan Gedung Rumah Tokolantai 4 beserta design dimensinya dan juga data penelitian tentangdinding pengisi sebagai *strut* diagonal, yaitu:

1. Data gambar perencanaan gedung rumah toko,
2. Data lokasi bangunan gedung rumah toko,
3. Data kuat tarik dinding bata,
4. Data kuat tarik batu bata,
5. Data kekuatan tekan bata, dan
6. Data modulus elastisitas dinding bata.

3.3 Metode Analisa Data

Analisa data ini menggunakan alat bantu *software* SAP 2000 versi 17.1.1, dengan analisis pushover. Analisis ini dilakukan dengan membandingkan dua pemodelan struktur, yaitu pemodelan yang menjadikan dinding pengisi sebagai beban mati dengan pemodelan yang menjadikan dinding pengisi sebagai *strut* diagonal, kemudian kedua model tersebut akan dianalisis perilaku strukturnya dengan analisis pushover pada SAP 2000 versi 17.1.1. Metode analisa data pada analisis ini dilakukan dengan langkah – langkah berikut:

1. Membuat model open frame sesuai dengan gambar perencanaan struktur,
2. Memasukan beban mati, beban hidup dan beban gempa,
3. Membuat model strut sebagai representatif dinding pengisi,
4. Menganalisis kedua model dengan SAP 2000,
5. Membandingkan simpangan dan gaya – gaya dalam yang terjadi,
6. Menganalisa (Analisis Statik *Non Linear Pushover*) Model Open Frame dan Model *Strut* dengan SAP 2000
7. Membandingkan Perilaku Struktur,
8. Simpulan

4 PEMBAHASAN

4.1 Model Portal Terbuka (*Open Frame*)

Model portal bangunan rumah toko ini dianalisis menggunakan bantuan software SAP 2000 versi 17.1.1, dengan data bangunan rumah toko sebagai berikut.

4.1.1 Data Material

Data material beton bertulang dalam analisis ini digunakan sebagai berikut:

1. Kuat tekan beton ($f'c$) : 25 Mpa
2. Modulus elastisitas beton: $0,043 \cdot (w_c)^{1,5} \sqrt{f'c} = 0,043 \cdot (2400)^{1,5} \sqrt{25} = 25278,73 \text{ Mpa}$
3. Berat Volume Beton Bertulang : 2400 Kg/m^3
4. Kuat tarik baja
5. Tulangan lentur (f_y) : 400 Mpa
6. Tulangan geser (f_u) : 240 Mpa
7. Modulus elastisitas baja tualngan (E_s) : 200000 Mpa

4.1.2 Pembebanan

4.1.2.1 Beban mati

Peraturan Pembebanan Indonesia Untuk Gedung tahun 1983:

1. Pentutup Lantai (spasi + Kramik)
 - a. $5 \times 24 \text{ kg/m}^2 = 120 \text{ kg/m}^2$
 - b. Beban Plafon + Penggantung = 18 kg/m^2
 - c. Beban Utilitas = 10 kg/m^2
 - d. Total beban mati = 148 kg/m^2
2. Beban tembok pada balok
 Beban tembok = Berat tembok/ $\text{m}^2 \times$ tinggi tembok. Berdasarkan PPIUG 1983 adalah dinding pasangan batamerah (setengah batu) = 250 kg/m^2
 - a. Lantai Dasar:
 $250 \times (4,0 - 0,7) = 725 \text{ kg/m}$
 $250 \times (4,0 - 0,5) = 875 \text{ kg/m}$
 - b. Lantai Dua:
 $250 \times (3,6 - 0,7) = 725 \text{ kg/m}$
 $250 \times (3,6 - 0,5) = 775 \text{ kg/m}$
 - c. Lantai Tiga:
 $250 \times (3,6 - 0,7) = 725 \text{ kg/m}$
 $250 \times (3,6 - 0,5) = 775 \text{ kg/m}$
 - d. Lantai Empat:
 $250 \times (3,6 - 0,7) = 725 \text{ kg/m}$
 $250 \times (3,6 - 0,5) = 775 \text{ kg/m}$
 - e. Atap Dak Beton:
 $250 \times (3,6 - 0,5) = 775 \text{ kg/m}$
3. Beban hidup
 Beban hidup bangunan disesuaikan dengan fungsi masing – masing ruang sesuai dengan table 4-1 SNI 1727:2013.
 - a. Lantai Dasar
 Lantai dasar tidak dibebani beban karena telah ditahan oleh tanah.
 - b. Lantai Dua
 Rumah Tinggal: $1,92 \text{ kN/m}^2$
 Balkon = $1,5 \times 1,92 = 2,85 \text{ kN/m}^2$
 - c. Lantai Tiga
 Rumah Tinggal: $1,92 \text{ kN/m}^2$
 Balkon = $1,5 \times 1,92 = 2,85 \text{ kN/m}^2$
 - d. Lantai Empat
 Rumah Tinggal: $1,92 \text{ kN/m}^2$
 Balkon = $1,5 \times 1,92 = 2,85 \text{ kN/m}^2$
 - e. Atap Dak Beton
 Sama dengan hunian dilayani $1,92 \text{ kN/m}^2$

4. Beban Tangga
 Tangga dan jalan keluar: $4,79 \text{ kN/m}^2$
5. Beban Hujan
 Diasumsikan $d_s = 50 \text{ mm}$ dan $d_h = 10 \text{ mm}$

$$R = 0,0098 (d_s + d_h)$$

$$= 0,0098(50 + 10)$$

$$= 0,558 \text{ kN/m}^2$$
6. Beban gempa

Asumsi tanah pada lokasi bangunan yaitu tanah sedang. Variabel respon spektrum didapat dari laman www.puskim.pu.go.id, sehingga didapat hasil sebagai berikut:

Tabel 1. Hasil Perhitungan Variabel Respon Spektrum

Variabel	Nilai
PGA (g)	0,437
S _s (g)	0,96
S _i (g)	0,385
C _{RS}	1,055
C _{RI}	0,951
FPGA	1,063
F _A	1,116
F _V	1,631
PSA (g)	0,465
SMS (g)	1,071
S _{M1} (g)	0,627
S _{DS} (g)	0,714
S _{DI} (g)	0,418
T ₀ (detik)	0,117
T _S (detik)	0,586

Sumber: www.puskim.pu.go.id

Nilai SS dan S1 dimasukan dalam respon spektrum dalam SAP 2000 v.17.1.1, dengan kelas site D sehingga menghasilkan diagram respon spektrum.

4.1.2.2 Perhitungan Berat Bangunan

Perhitungan berat bangunan dihitung secara otomatis oleh program SAP 2000 versi 17.1.1 dengan cara pilih *Define* >> *Mass Source* >> *Modify Mass Source* kemudian *input* beban dengan koefisiennya.

4.1.2.3 Perhitungan Faktor Skala

Untuk nilai S_{DS} diambil dari hasil perhitungan table 4.1 yaitu 0,714.

Untuk nilai R , untuk bangunan dengan sistem struktur rangka beton bertulang pemikul momen menengah yaitu 5.

Untuk gedung rumah toko yaitu termasuk resiko kategori II dengan faktor keutamaan gempa (I_e) = 1,0.

Faktor skala beban gempa didapat dari pengalihan koefisien respon seismik dengan gravitasi, sehingga faktor skala beban gempa dihitung sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \text{Faktor Skala} &= \left(\frac{I_e}{R}\right) \times g \\ &= \left(\frac{1}{5}\right) \times 9,81 \text{ m/s}^2 = 1,962 \end{aligned}$$

Nilai faktor skala dimasukkan pada *Define* >> *Load Cases* >> *Modify Load Cases B.Gempa* >> *Load Applied*. Kemudian beban gempa secara otomatis akan dihitung oleh program SAP 2000 versi 17.1.1.

4.1.3 Kombinasi Pembebanan

Kombinasi pembebanan menurut SNI 1726:2012, Pasal 4.2.2 pada SAP 2000 versi 17.1.1. Untuk memudahkan pembuatan kombinasi untuk seluruh beban mati meliputi beban mati struktur, beban mati tambahan dan beban tembok dikombinasikan menjadi kombinasi D, sehingga kombinasi yang dibuat sebagai berikut:

1. $1,4D$
2. $1,2D + 1,6L + 0,5(L_r \text{ atau } R)$
3. $1,2D + 1,6(L_r \text{ atau } R) + (L \text{ atau } 0,5W)$
4. $1,2D + 1,0W + L + 0,5(L_r \text{ atau } R)$
5. $(1,2 + 0,2S_{DS})D + \rho Q_E + L$

Kombinasi 5 digunakan kombinasi akibat pengaruh gempa horisontal dan gempa vertikal.

$$S_{DS} = 0,714$$

$$\rho = 1,3 \text{ untuk tipe seismik D}$$

$$Q_E = \text{Pengaruh beban horisontal}$$

$$Q_E = E$$

Sehingga kombinasi pembebanan menjadi

$$0,9D + 1,0W$$

$$(0,9 - 0,2S_{DS})D + \rho Q_E + 1,6H$$

Kombinasi beban 7 digunakan kombinasi akibat gempa horisontal dan gempa vertikal.

$$S_{DS} = 0,714$$

$$\rho = 1,3 \text{ untuk tipe seismik D}$$

$$Q_E = \text{Pengaruh beban horisontal}$$

$$Q_E = E$$

$$H = \text{diambil nol}$$

Sehingga kombinasi pembebanan menjadi $-0,7572D + 1,3E + L$

4.1.4 Dimensi Elemen Struktur

Dimensi elemen struktur digunakan dari data perencanaan gedung rumah toko, sehingga didapat dimensi sebagai berikut:

Tabel 2. Elemen-Elemen Struktur Bangunan Rumah Toko

No	Lantai	Dimensi Balok (cm)	Dimensi Kolom (cm)	Dimensi Pelat (cm)
1	Dasar	BS 45 x 25 BS 60 x 30	40 x 40 50 x 50	12
2	Dua	40 x 20 50 x 30 70 x 30	40 x 40	12
3	Tiga	40 x 20 50 x 30 70 x 30	40 x 40 35 x 35	12
4	Empat	40 x 20 50 x 30 70 x 30	35 x 35	12
5	Atap (Dak Beton)	40 x 20 50 x 30 70 x 30		12

Sumber: Data Perencanaan Rumah Toko

4.2 Model Strut (Strut Diagonal)

4.2.1 Data Material Dinding Bata

Dalam pemodelan ini dinding bata dianggap sebagai *strut diagonal*. Data material dinding bata yang digunakan yaitu mengacu pada penelitian (Imran, Helmy Hermawan Tjahjanto dan Iswandi, 2009):

$$1. \text{ Mutu } (f'm) : 3,91 \text{ Mpa}$$

$$2. \text{ Modulus elastisitas } (E_i) : 1633,5 \text{ Mpa}$$

3. Berat volume (γ_m) : 2,5 kN/m³
4. Poisson ratio (μ) : 0,15
5. Regangan ultimate (ϵ'_m) : 0,0044

4.2.2 Dimensi Dinding Bata

Dinding bata pada analisis ini dimodelkan sebagai *strut diagonal*, Berikut perhitungan dimensi untuk bentang balok (L) = 4450 mm, dengan tinggi kolom (H) = 4000 mm, dengan tebal dinding (t) = 100 mm $E_i = 1633,5$ Mpa, Kolom beton dengan dimensi 500 x 500 mm dengan $E_c = 25278,73$ Mpa.

Untuk dimensi kolom 500 x 500 mm, inersia nya yaitu:

$$I_c = \frac{1}{12} b \cdot d^3 = \frac{1}{12} 50 \cdot 50^3 = 5208333333 \text{ mm}^4$$

Tinggi balok pada bentang 4450 ini yaitu 500 mm, sehingga tinggi dinding yaitu :

$$H_i = H - 500 = 4000 - 500 = 3500 \text{ mm}$$

$$\sin 2\theta = 2 \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta$$

$$\sin \theta = \frac{\text{Sisi Depan}(H)}{\text{Sisi Miring}(SM)}$$

$$\cos \theta = \frac{\text{Sisi Samping}(L)}{\text{Sisi Miring}(SM)}$$

$$SM = \sqrt{H^2 + L^2} = \sqrt{4000^2 + 4450^2} = 5983,52 \text{ mm}$$

$$\sin \theta = \frac{4000}{5983,52} = 0,669$$

$$\cos \theta = \frac{4450}{5983,52} = 0,744$$

$$\sin 2\theta = 2 \cdot 0,669 \cdot 0,744 = 0,9943$$

$$\lambda_h = \sqrt[4]{\frac{E_i \cdot t \cdot \sin 2\theta}{4 \cdot E_c \cdot I_c \cdot H_i}} = \sqrt[4]{\frac{1633,5 \cdot 100 \cdot 0,9943}{4 \cdot 25278,73 \cdot 5208333333 \cdot 3500}} = 0,000787$$

$$W_{ef} = 0,175 \cdot (0,000787 \cdot 4000)^{-0,4} \cdot \sqrt{4000^2 + 4450^2} = 662 \text{ mm}$$

Untuk dimensi *strut* yang lainnya dihitung sesuai langkah di atas dan akan disajikan dalam tabel berikut.

Tabel 3. Dimensi *Strut* Dinding Bata (dalam satuan mm)

Lt.	Dimensi Kolom	H	L	Tinggi Balok	H_i	λ_h	W_{ef}	1/2 W_{ef}	1/4 W_{ef}
1	500x500	4000	4450	400	3600	0,000787	662	331	165
	500x500	4000	8600	700	3300	0,000563	1200	600	300
	500x500	4000	4570	500	3500	0,000555	773	386	193
2	400x400	4000	4450	500	3500	0,000694	696	348	174
	400x400	3600	4450	500	3100	0,000715	686	343	172
	400x400	3600	8600	700	2900	0,000727	1110	555	278
3	400x400	3600	4570	500	3100	0,000715	698	349	174
	400x400	3600	4450	500	3100	0,000715	686	343	172
	400x400	3600	8600	700	2900	0,000727	1110	555	278
4	350x350	3600	4450	500	3100	0,000817	651	325	163
	350x350	3600	4450	500	3100	0,000817	651	325	163
	350x350	3600	8600	700	2900	0,000831	1053	526	263
	350x350	3600	4570	500	3100	0,000817	661	331	165

Sumber: Hasil Perhitungan

Diagonal Strut kemudian dianggap tidak menerima gaya tarik. Hal ini membutuhkan analisis non linier sehingga perlu didefinisikan *Nonlinear Load Case* dimana setiap kombinasi beban diinput dalam sebuah *Load Case non linier* tersebut. Untuk membuat dinding bersifat hanya menerima tekan, dilakukan dengan klik *Assign >> Frame >> Tension/Compression Limit* pada *Strut*, dan mencentang *Tension Limit* serta memasukan angka 0 (nol) pada *field* di sebelahnya.

Pada ujung – ujung *Strut* tidak menahan momen sehingga perlu di-*release* terhadap M2 dan M3 dengan *Assign >> Frame >> Release/Partial Fixity*.

4.3 Tegangan pada Dinding Pengisi

Tegangan tekan maupun tegangan geser *strut* yang terjadi tidak boleh melebihi tegangan *ultimate*-nya. Tegangan geser dan tekan *ultimate*-nya dihitung sebagai berikut:

1. Tegangan geser *ultimate*
 $0,3\sqrt{f'm} = 0,3\sqrt{3,91} = 0,593 \text{ Mpa}$
2. Tegangan tekan *ultimate*
 $f'm = 3,91 \text{ Mpa}$

Tegangan tekan dan tegangan geser yang terjadi pada dinding pengisi (*strut*) pada S1 dihitung sebagai berikut:

1. Tegangan geser:

Gaya Lateral yang terjadi diuraikan kearah horizontal,

$$Q \cos \theta = 35981,08 \text{ N}$$

$$L = \frac{W_{ef}}{\sin \theta} = \frac{662}{0,669} = 990,043$$

$$\tau_{xy} = \frac{1,4Q}{L \cdot t} = \frac{1,4 \cdot 48380,55}{662 \cdot 100}$$

$$= 0,509 \text{ Mpa}$$

2. Tegangan tekan diagonal, Gaya Lateral yang terjadi,

$$Q = 48380,55 \text{ N}$$

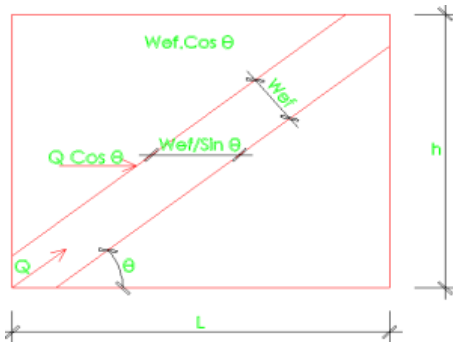
$$L = W_{ef} = 662$$

$$\frac{h}{L} = \tan \theta = 0,90$$

$$\sigma_y = \frac{(0,8 \cdot 0,90 - 0,2) 48380,55}{662 \cdot 100}$$

$$= 0,379$$

Dari hasil tegangan geser dan tekan *strutyang* terjadi tidak ada yang melampaui tegangan geser dan tekan *ultimate*-Nya



Gambar 8. Ilustrasi Penguraian Gaya dan Luasan Penampang

4.4 Simpangan Antar Tingkat

Simpangan antar tingkat juga dikontrol terhadap mekanisme keruntuhan tingkat lunak (*soft story*), yaitu dengan membandingkan *drift ratio* (D_r) suatu lantai dengan *drift ratio* lantai di atasnya. Perbandingan ini tidak boleh melebihi besar dari 130%, jika melebihi maka mekanisme keruntuhan tingkat lunak (*soft story*) dapat terjadi.

Drift ratio (D_r) adalah rasio simpangan antar tingkat (Δ) dengan tinggi tingkat (h_{sx}). Perbandingan simpangan antar tingkat *model open frame* dan *model strut*, kontrol terhadap simpangan ijin (Δ_a) dan kontrol terhadap mekanisme keruntuhan tingkat lunak (*soft story*) ditampilkan pada Tabel 4, dan Tabel 5.

Tabel 4. Perbandingan Simpangan antara Model Open Frame dan Model Dinding Pngisi (*Strut*) akibat Gempa X

P	Lt.	h _{xx} (mm)	Δ _i (mm)		Δ _a (mm)	Pr	D _r		D _r /D _{r,1}	
			MOF	MS			MOF	MS	MOF	MS
1	1	4000	57.59	54.73	100	-5%	0.32%	0.30%	88%	94%
	2	3600	58.89	52.27	90	-11%	0.36%	0.32%	123%	126%
	3	3600	48.06	41.33	90	-14%	0.30%	0.26%	127%	146%
	4	3600	37.92	28.33	90	-25%	0.23%	0.17%	-	-
2	1	4000	51.54	48.27	100	-6%	0.29%	0.27%	87%	93%
	2	3600	53.29	46.76	90	-12%	0.33%	0.29%	123%	127%
	3	3600	43.29	36.80	90	-15%	0.27%	0.23%	128%	148%
	4	3600	33.92	24.88	90	-27%	0.21%	0.15%	-	-
3	1	4000	45.89	42.09	100	-8%	0.25%	0.23%	86%	92%
	2	3600	48.04	41.33	90	-14%	0.30%	0.26%	124%	128%
	3	3600	38.85	32.38	90	-17%	0.24%	0.20%	128%	151%
	4	3600	30.30	21.47	90	-29%	0.19%	0.13%	-	-
4	1	4000	40.87	36.39	100	-11%	0.23%	0.20%	84%	91%
	2	3600	43.88	36.07	90	-18%	0.27%	0.22%	128%	129%
	3	3600	34.24	28.06	90	-18%	0.21%	0.17%	126%	155%
	4	3600	27.18	18.07	90	-34%	0.17%	0.11%	-	-
5	1	4000	36.43	31.17	100	-14%	0.20%	0.17%	83%	90%
	2	3600	39.45	31.10	90	-21%	0.24%	0.19%	125%	129%
	3	3600	31.67	24.13	90	-24%	0.20%	0.15%	128%	164%
	4	3600	24.65	14.71	90	-40%	0.15%	0.09%	-	-

Sumber: Hasil Analisa Data

Keterangan:

P : portal

Lt : lantai

h_{sx} : tinggi lantai

MOF : Model Open Frame

MS : Model Sturt

Δ_i : simpangan antar lantai ((δ_{ei} - δ_{ei})C_d/I_E, dengan C_d = 4.5 dan I_E = 1)

Δ_a : simpangan antar lantai ijin

Pr : presentase selisih simpangan antara MOF dan MS ($\frac{MS-MOF}{MOF} \times 100\%$)

D_r : Drift ratio

Dari Tabel 4 terlihat rata – rata simpangan yang terjadi pada model open frame lebih besar dari pada model strut. Selisih terbesar terjadi pada portal 5 yaitu pada Model Open Frame simpangan antar lantai pada atapnya sebesar 24.65 mm

sedangkan pada *Model Strut* sebesar 14.71. Simpangan *Model Open Frame* lebih besar 40% dari simpangan yang terjadi pada *Model Strut*.

Pada Tabel 4 juga menunjukkan simpangan antar tingkat MOF(*Model Open Frame*), dan MS (*Model Strut*) tidak ada yang melebihi dari simpangan antar tingkat ijinnya masing – masing (Δ_a). Pada kedua MOF(*Model Open Frame*) ini juga tidak terjadi mekanisme keruntuhan tingkat lunak (*soft storey*) karena nilai perbandingan *drift ratio*-nya tidak ada yang melebihi 130%. Sedangkan pada MS (*Model Strut*) terjadi mekanisme keruntuhan tingkat lunak (*soft storey*) karena nilai perbandingan *drift ratio*-nya melebihi 130% pada tingkat ke – 3.

Tabel 5. Perbandingan Simpangan antara Model Open Frame dan Model Dinding Pengisi (Strut) akibat Gempa Y

P	Lt	h_{sx} (mm)	Δ_i (mm)		Δ_a (mm)	Pr	D_r		D_r/D_{r+1}	
			MOF	MS			MOF	MS	MOF	MS
A	1	4000	39.44	39.03	100	1%	0.22%	0.22%	83%	118%
	2	3600	42.70	29.87	90	30%	0.26%	0.18%	120%	131%
	3	3600	35.70	22.73	90	36%	0.22%	0.14%	101%	140%
	4	3600	35.51	16.24	90	54%	0.22%	0.10%	-	-
B	1	4000	41.38	41.14	100	1%	0.23%	0.23%	88%	136%
	2	3600	42.51	27.26	90	36%	0.26%	0.17%	117%	129%
	3	3600	36.38	21.15	90	42%	0.22%	0.13%	105%	144%
	4	3600	34.49	14.73	90	57%	0.21%	0.09%	-	-
C	1	4000	43.37	41.01	100	5%	0.24%	0.23%	93%	147%
	2	3600	42.15	25.10	90	40%	0.26%	0.15%	114%	128%
	3	3600	37.07	19.58	90	47%	0.23%	0.12%	111%	150%
	4	3600	33.37	13.09	90	61%	0.21%	0.08%	-	-
D	1	4000	44.53	40.74	100	9%	0.25%	0.23%	96%	152%
	2	3600	41.75	24.08	90	42%	0.26%	0.15%	111%	128%
	3	3600	37.57	18.84	90	50%	0.23%	0.12%	115%	155%
	4	3600	32.67	12.16	90	63%	0.20%	0.08%	-	-

Sumber:Hasil Analisa Data

Keterangan:

P : portal

Lt : lantai

h_{sx} : tinggi lantai

MOF : *Model Open Frame*

MS : *Model Sturt*

Δ_i : simpangan antar lantai ($(\delta_{ei} - \delta_{ei})C_d/I_E$, dengan $C_d = 4.5$ dan $I_E = 1$)

Δ_a : simpangan antar lantai ijin

Pr : presentase selisih simpangan antara MOF dan MS ($\frac{MS-MOF}{MOF} \times 100\%$)

D_r : Drift ratio

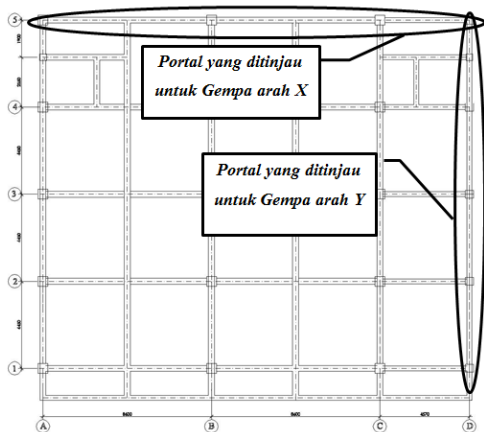
Dari Tabel 5 terlihat rata – rata simpangan yang terjadi pada model open frame lebih besar dari pada model strut. Selisih terbesar terjadi pada portal 5 yaitu pada *Model Open Frame* simpangan antar lantai pada atapnya sebesar 32.67 mm sedangkan pada *Model Strut* sebesar 12.16. Simpangan *Model Open Frame* lebih besar 63% dari simpangan yang terjadi pada *Model Strut*.

Pada Tabel 5 juga menunjukkan simpangan antar tingkat MOF(*Model Open Frame*), dan MS (*Model Strut*) tidak ada yang melebihi dari simpangan antar tingkat ijinnya masing – masing (Δ_a). Pada kedua MOF(*Model Open Frame*) ini juga tidak terjadi mekanisme keruntuhan tingkat lunak (*soft storey*) karena nilai perbandingan *drift ratio*-nya tidak ada yang melebihi 130%. Sedangkan pada MS (*Model Strut*) terjadi mekanisme keruntuhan tingkat lunak (*soft storey*) karena nilai perbandingan *drift ratio*-nya melebihi 130%. Pada Portal B dan C keruntuhan tingkat lunak sudah terjadi pada lantai 1 dikarenakan pada lantai satu pada portal tersebut tidak memiliki dinding sedangkan tingkat di atasnya terdapat dinding yang menerus.

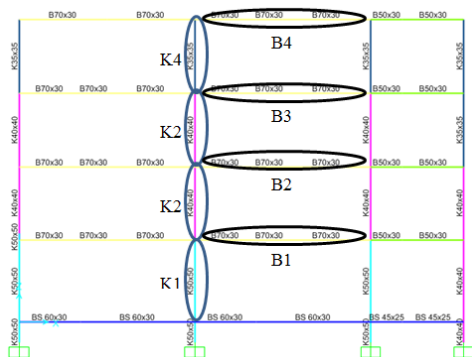
4.5 Perbandingan Gaya – Gaya Dalam

Perbandingan gaya – gaya dalam yang terjadi dilakukan terhadap batang yang sama dan dengan kombinasi yang sama pada masing – masing model. Perbandingan gaya dilakukan terhadap dua kombinasi gaya yaitu kombinasi gaya gravitasi saja (Beban Mati + Beban Hidup) dan kombinasi gaya gravitasi ditambah beban gempa (Beban Mati + Beban Hidup + Beban Gempa). Pada perbandingan gaya – gaya dalam yang terjadi untuk kedua kombinasi ditinjau portal yang sama. Untuk beban akibat gempa arah X yang ditinjau adalah portal 5 dan untuk gempa arah Y ditinjau portal D seperti terlihat pada ilustrasi Gambar 9.

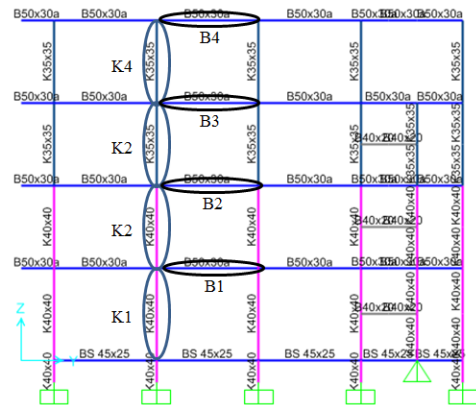
Untuk masing – masing portal dipilih beberapa elemen yang mewakili perbandingan gaya – gaya dalam yang terjadi seperti Gambar 10 dan 11. Untuk elemen kolom gaya dalam yang ditinjau yaitu gaya aksial, gaya geser dan momennya sedangkan untuk balok hanya ditinjau gaya geser dan momennya.



Gambar 9. Ilustrasi Portal yang Ditinjau dalam Perbandingan Gaya – Gaya Dalam yang Terjadi.



Gambar 10. Ilustrasi Elemen yang Ditinjau dalam Perbandingan Gaya – Gaya Dalam untuk Portal 5



Gambar 11. Ilustrasi Elemen yang Ditinjau dalam Perbandingan Gaya – Gaya Dalam untuk Portal D

4.5.1 Perbandingan Gaya Akibat KombinasiBeban Gravitasi

Tabel 6. Perbandingan Gaya Dalam Portal 5 akibat Kombinasi Gravitasi

No	Elemen	Aksial (kN)			Geser (kN)			Momen(kN/m)		
		MOF	MS	Pr	MOF	MS	Pr	MOF	MS	Pr
1	Kolom 1	763.03	777.05	2%	0.17	0.25	47%	1.40	1.40	0%
	Kolom 2	550.19	559.09	2%	3.87	4.05	5%	7.64	4.73	-38%
	Kolom 3	346.43	352.98	2%	4.76	4.41	-7%	8.84	5.01	-43%
	Kolom 4	136.15	139.12	2%	3.04	3.21	6%	6.04	3.38	-44%
2	Balok 1	-	-	-	84.92	83.76	-1%	123.73	123.96	0%
	Balok 2	-	-	-	87.06	85.39	-2%	128.58	129.43	1%
	Balok 3	-	-	-	88.84	86.74	-2%	133.84	134.27	0%
	Balok 4	-	-	-	63.92	62.23	-3%	109.58	108.83	-1%

Sumber: Hasil Analisa Data

Keterangan:

Pr : Presentase perbandingan gaya dalam MOF dengan MS

$$\left(\frac{MS-MOF}{MOF} \times 100\%\right)$$

Dari Tabel 6 terlihat pada elemen kolom terjadi kecenderungan gaya yang terjadi untuk gaya aksial dan geser pada model open frame lebih kecil dari pada model strut, sedangkan untuk momennya model open frame memiliki momen yang lebih besar dari model strut. Ini memperlihatkan bahwa dinding pengisi dapat membuat gaya aksial dan geser lebih besar. Untuk elemen balok gaya geser yang terjadi pada model open frame cenderung lebih besar dari pada model strut walapun perbedaannya tidak begitu

besar. Sedangkan untuk momen pada balok tidak terjadi perbedaan yang signifikan.

Tabel 7. Perbandingan Gaya Dalam Portal D akibat Kombinasi Gravitasi

No	Elemen	Aksial (kN)			Geser (kN)			Momen(kN/m)		
		MOF	MS	Pr	MOF	MS	Pr	MOF	MS	Pr
1	Kolom 1	455.17	446.93	-2%	1.51	1.64	9%	3.20	1.81	-43%
	Kolom 2	329.78	324.42	-2%	2.20	1.30	-41%	3.98	1.24	-69%
	Kolom 3	203.11	199.45	-2%	1.84	1.33	-27%	3.40	1.14	-66%
	Kolom 4	80.80	79.58	-2%	3.29	2.16	-34%	6.26	2.37	-62%
2	Balok 1	-	-	-	34.92	34.79	0%	25.72	25.66	0%
	Balok 2	-	-	-	35.03	34.92	0%	25.93	25.49	-2%
	Balok 3	-	-	-	35.34	35.04	-1%	27.12	26.33	-3%
	Balok 4	-	-	-	20.45	20.12	-2%	16.46	15.94	-3%

Sumber: Hasil Analisa Data

Keterangan:

Pr : Presentase perbandingan gaya dalam MOF dengan MS

$$\left(\frac{MS-MOF}{MOF}\right) \times 100\%$$

Dari Tabel 7 terlihat pada elemen kolom terjadi kecenderungan gaya yang terjadi untuk gaya aksial, geser dan momen pada model open frame lebih besar dari pada model strut berbeda dengan portal 5. Ini disebabkan oleh bentang balok yang berbeda yang dapat mempengaruhi, bentang balok pada portal D lebih kecil dibanding dengan portal 5.

4.5.2 Perbandingan Gaya Akibat Kombinasi Beban Gravitasi dan Gempa

Tabel 8. Perbandingan Gaya – Gaya Dalam Portal 5 akibat Kombinasi Gravitasi dan Gempa

No	Elemen	Aksial (kN)			Geser (kN)			Momen(kN/m)		
		MOF	MS	Pr	MOF	MS	Pr	MOF	MS	Pr
1	Kolom 1	829.02	857.89	3%	74.34	94.85	28%	155.98	123.61	-21%
	Kolom 2	592.14	614.31	4%	57.18	87.37	53%	103.77	94.40	-9%
	Kolom 3	369.09	383.53	4%	48.08	68.45	42%	87.52	76.51	-13%
	Kolom 4	144.79	150.85	4%	27.51	52.60	91%	50.25	39.06	-22%
2	Balok 1	-	-	-	117.01	126.73	8%	220.62	211.18	-4%
	Balok 2	-	-	-	110.27	119.09	8%	196.82	194.52	-1%
	Balok 3	-	-	-	102.18	110.04	8%	181.69	178.63	-2%
	Balok 4	-	-	-	66.38	72.05	9%	131.04	128.08	-2%

Sumber: Hasil Analisa Data

Keterangan:

Pr : Presentase perbandingan gaya dalam MOF dengan MS

$$\left(\frac{MS-MOF}{MOF}\right) \times 100\%$$

Dari Tabel 8 terlihat pada elemen kolom gaya yang terjadi untuk gaya aksial dan geser pada model open frame lebih kecil dari pada model strut, sedangkan untuk momennya model open frame memiliki momen yang lebih besar dari model strut. Untuk elemen balok gaya geser yang terjadi pada model open frame lebih kecil dari pada model strut. Sedangkan untuk momen pada balok model open frame lebih besar dari pada model strut. Ini memperlihatkan bahwa pada portal 5 dinding pengisi dapat membuat gaya aksial dan geser lebih besar dari model yang dianalisis tanpa dinding, dinding pengisi juga memberikan kekakuan ketika diberi beban horisontal yang menyebabkan momen pada kolom dan balok mengecil.

Tabel 9. Perbandingan Gaya – Gaya Dalam portal D akibat Kombinasi Gravitasi dan Gempa

No	Elemen	Aksial (kN)			Geser (kN)			Momen(kN/m)		
		MOF	MS	Pr	MOF	MS	Pr	MOF	MS	Pr
1	Kolom 1	487.24	463.60	-5%	46.42	72.22	56%	95.29	88.50	-7%
	Kolom 2	350.63	343.03	-2%	63.12	57.92	-8%	113.84	67.87	-40%
	Kolom 3	215.00	213.24	-1%	36.52	35.10	-4%	65.94	35.15	-47%
	Kolom 4	85.02	85.86	1%	38.15	23.81	-38%	69.22	24.04	-65%
2	Balok 1	-	-	-	74.18	87.18	18%	104.65	83.39	-20%
	Balok 2	-	-	-	69.20	70.83	2%	95.59	65.89	-31%
	Balok 3	-	-	-	59.57	57.54	-3%	78.11	50.67	-35%
	Balok 4	-	-	-	33.21	29.35	-12%	44.14	27.67	-37%

Sumber: Hasil Analisa Data

Keterangan:

Pr : Presentase perbandingan gaya dalam MOF dengan MS

$$\left(\frac{MOF-MS}{MOF}\right) \times 100\%$$

Dari Tabel 9 terlihat pada elemen kolom terjadi kecenderungan gaya yang terjadi untuk gaya aksial, dan geser pada model open frame lebih besar dari pada model strut, hanya terjadi pengecualian pada kolom 4 untuk gaya aksial dan kolom 1 untuk gaya gesernya. Ini dapat diakibatkan karena bentang antar kolom portal D lebih kecil dibanding portal 5 sehingga geser dan aksial yang terjadi pada model strut cenderung lebih kecil dibanding model open frame. Dan momen pada kolom model open frame lebih besar dari pada model strut.

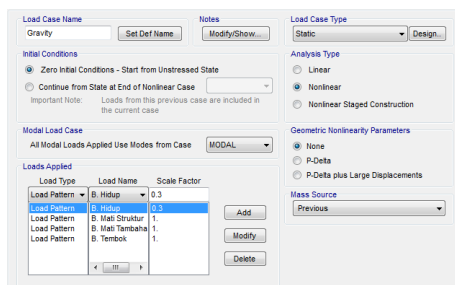
Pada elemen balok gaya gesernya ada yang mengecil dan ada yang membesar setelah dianalisis dengan dinding pengisi. Sedangkan untuk momen yang terjadi pada balok *model open frame* lebih besar dibanding *model strut*. Pada portal D terlihat dinding pengisi dapat membuat momen yang terjadi pada kolom maupun balok lebih kecil dibanding yang dianalisis tanpa dinding pengisi.

4.6 Analisis Statik Non Linear (*Pushover Analysis*)

Analisis *pushover* dilakukan dengan bantuan software SAP 2000 versi 17.1.1 dengan metode *FEMA 356 Coefficient Method*, yang telah tersedia dalam software SAP tersebut. Untuk melakukan analisis *pushover* dilakukan beberapa langkah – langkah berikut.

4.6.1 Pendefinisian Beban Gravitasi Non Linier

Pendefinisian beban gravitasi non linier (*Gravity*) dilakukan dengan cara, *Define>>Load Cases>>Add New Load Case*, kemudian beri nama *Gravity* dan input beban mati dan beban hidupnya dikalikan koefisien sesuai dengan SNI 1726:2012, yaitu 1 untuk beban mati dan 0,3 untuk beban hidup, seperti Gambar 12. Beban yang diaplikasikan tidak ditingkatkan secara bertahap (*Full Load*). Kondisi akhir dari analisis beban gravitasi non linier ini akan menjadi kondisi awal dalam analisis *Pushover*.

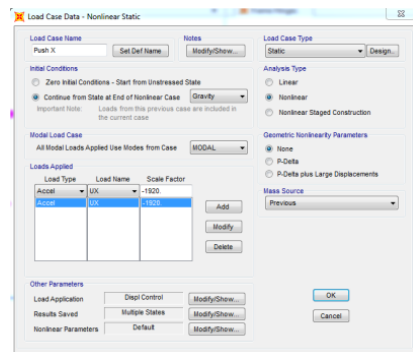


Gambar 12. Definisi Beban Gravitasi pada SAP 2000 Versi 17.1.1

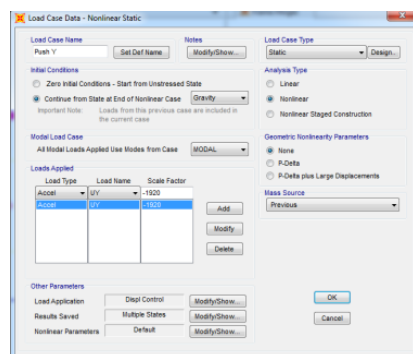
4.6.2 Pendefinisian beban Push X dan Push Y.

Pendefinisian dilakukan dengan *Define>>Load Cases>>Add New Load Case*, untuk Push X pada *Load Applied* dipilih UX dan dimasukkan faktor skala 1920 dan untuk Push Y pada *Load Applied* dipilih UY dan dimasukkan faktor skala 1920, seperti terlihat pada Gambar 13 dan 14. Struktur yang dibebani beban *Pushover*, besar perpindahan atapnya dikontrol hingga setidaknya mencapai target *displacement*.

Analisis ini merupakan lanjutan dari analisis statik non linier yang pertama (beban gravitasi non linier) dan karena beban *pushover* diaplikasikan secara bertahap maka hasil analisis ini tersedia dalam tahapan-tahapan pembebanan (*Multiple States*).



Gambar 13. Definisi Push X pada SAP 2000 Versi 17.1.1



Gambar 14. Definisi Push Y pada SAP 2000 Versi 17.1.1

4.6.3 Sendi Plastik Balok, Kolom dan Dinding Bata (*Strut*)

1. Sendi Plastik Balok dan Kolom

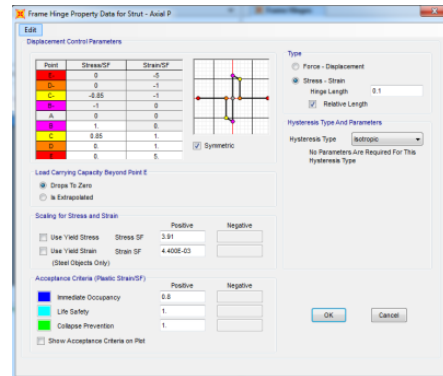
Sendi plastis menyatakan posisi terlemah dari suatu elemen struktur. Sendi plastis ini biasanya terletak di ujung-ujung balok dan kolom karena bagian inilah yang menerima momen dan gaya geser yang paling besar.

Untuk balok dan kolom pendefinisian sendi plastis dilakukan dengan perintah *Automatic Hinge (Assign >> Frame >> Hinges)*, kemudian pendefinisian sendi plastis dipilih mengacu FEMA 356. Sendi plastis didefinisikan untuk balok dengan dua tipe keruntuhan yakni keruntuhan akibat momen ($M3$), sesuai ketentuan pada *Table 6-7 FEMA 356*. Kolom mengalami keruntuhan akibat gaya aksial dan momen lentur (*Interacting P-M2-M3*) sesuai dengan ketentuan pada *Table 6-8 FEMA 356*. Input hinge properties untuk balok pada SAP2000.

2. Sendi Plastik Dinding Bata (*Strut*)

Sendi plastis dinding bata didefinisikan dengan meng-input nilai A,B,C,D,E, sendi plastis dinding bata didefinisikan sesuai dengan penelitian (Imran, Helmy Hermawan Tjahjanto dan Iswandi, 2009). Nilai A,B,C,D,E diambil dari kurva tegangan-regangan tipikal material dinding pengisi. Kemudian di input melalui *Define>>Section Properties>>Hinge Properties>>Add New Property*, di-input nilai A,B,C,D,E sesuai Gambar 15.

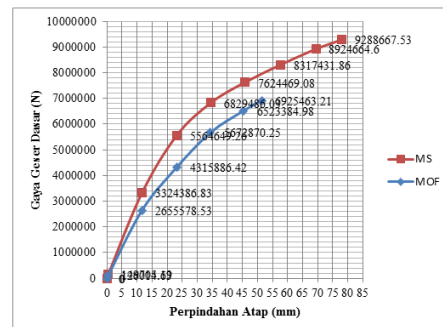
Model portal open frame dan model portal dengan dinding pengisi (*Strut*) dianalisis dengan beban dorong statik (*Static Pushover Analysis*), dengan program bantu SAP 2000 Versi 17.1.1. Analisis *Static Pushover* menghasilkan kurva *Pushover*, skema kelelahan, level kinerja dan daktilitas aktual.



Gambar 15. Displacement Control Parameters Dinding Bata

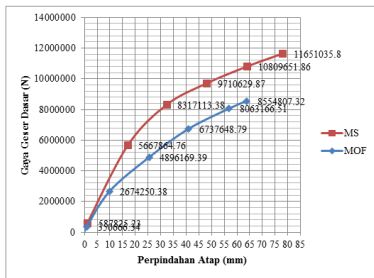
4.6.4 Kurva Pushover

Analisis Non – Linear Pushover ini kemudian menghasilkan kurva *Pushover*. Kurva *Pushover* akibat beban dorong Push X dan Push Y yang terjadi pada *Model Open Frame* dan *Model Strut* disajikan dalam Gambar 16 dan 17.



Gambar 16. Kurva Pushover Akibat Push X Model Open Frame dan Model Strut

Dari Gambar 16 terlihat kurva *model open frame* akibat push X mampu menerima beban dorong horisontal sampai dengan 6925463,21Newton dengan perpindahan atap sebesar 51,44 mm dan untuk *model strut* mampu menerima beban dorong horisontal sampai dengan 9288667,53 N dengan perpindahan atap sebesar 77,99 mm. Ini terlihat bahwa *model strut* lebih kaku dibanding dengan *model open frame*.

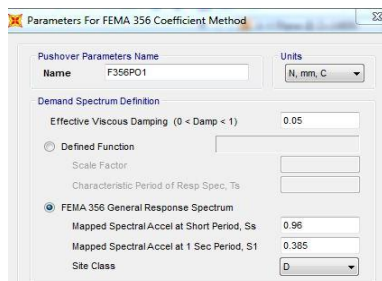


Gambar 17. Kurva Pushover Akibat Push Y Model Open Frame dan Model Strut

Dari Gambar 17 terlihat kurva *model open frame* akibat push X mampu menerima beban dorong horisontal sampai dengan 8554807,32Newton dengan perpindahan atap sebesar 63,76 mm dan untuk *model strut* mampu menerima beban dorong horisontal sampai dengan 11651035,8 Newton dengan perpindahan atap sebesar 78,07 mm. Ini terlihat bahwa *model strut* lebih kaku dibanding dengan *model open frame*.

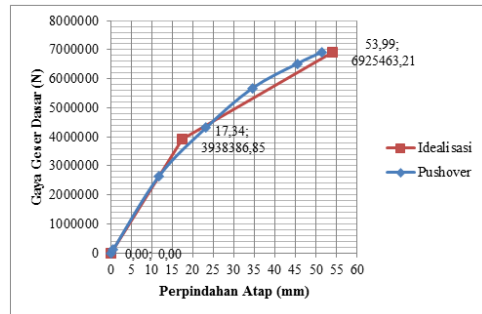
4.6.5 Kurva Idealisasi dan Perpindahan Target

Kurva *Pushover* selanjutnya diidealisasikan sebagai kurva bilinear untuk memperoleh waktu getar alami efektif berdasarkan metode pada FEMA 356. Kemudian perpindahan target (δ_T) dihitung berdasarkan *Coefficient Method FEMA 356* yang tersedia pada program SAP2000 versi 17.1.1 yang koefisiennya S_s dan S_1 disesuaikan dengan nilai pada spektrum Lombok seperti Gambar 18.



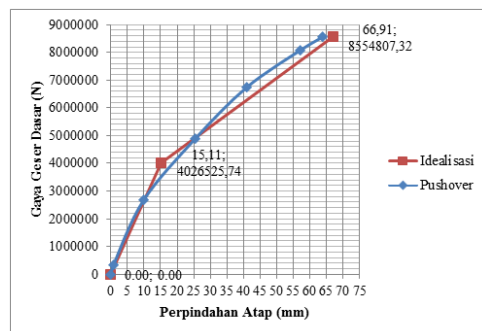
Gambar18. Parameter FEMA 356 Coefficient Method

Kurva *Pushover* dan kurva idealisasi untuk model open frame ditampilkan pada Gambar 21 untuk Push X dan 22 untuk Push Y sedangkan untuk model strut disajikan pada Gambar 23 untuk Push X dan Gambar 24 untuk Push Y.



Gambar19. Kurva Pushover dan Kurva Idealisasi Model Open Frame Akibat Push X

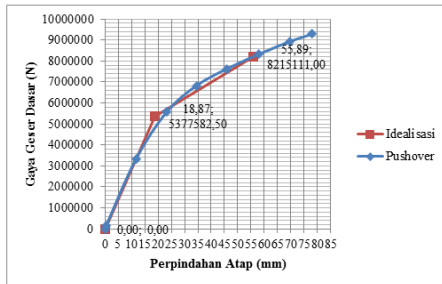
Terlihat pada Gambar 19 pada kurva idealisasi titik leleh pertama berada pada saat gaya geser dasarnya 3938386,85Newton dengan perpindahan atap nya sebesar 17,34mm dan titik kinerja pada model open frame yaitu pada gaya geser dasarnya 6925463,21Newton dengan perpindahan atapnya sebesar53,99mm.



Gambar20 Kurva Pushover dan Kurva Idealisasi Model Open Frame Akibat Push Y

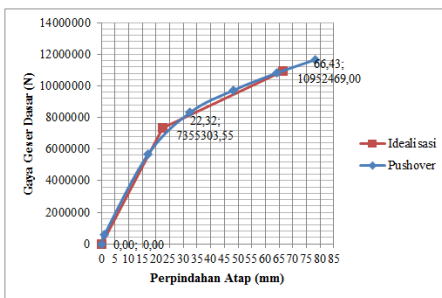
Terlihat pada Gambar 20 pada kurva idealisasi titik leleh pertama berada pada saat gaya geser dasarnya 4026525,74 Newton

dengan perpindahan atap nya sebesar 15,11 mm dan titik kinerja pada model open frame yaitu pada gaya geser dasarnya 8554807,32 Newton dengan perpindahan atapnya sebesar 66,91 mm.



Gambar 21. Kurva Pushover dan Kurva Idealisasi Model Strut Akibat Push X

Terlihat pada Gambar 21 pada kurva idealisasi titik leleh pertama berada pada saat gaya geser dasarnya 5377582,50 Newton dengan perpindahan atap nya sebesar 18,87 mm dan titik kinerja pada model open frame yaitu pada gaya geser dasarnya 8215111,00 Newton dengan perpindahan atapnya sebesar 55,89 mm.



Gambar 22. Kurva Pushover dan Kurva Idealisasi Model Strut Akibat Push Y

Terlihat pada Gambar 22 pada kurva idealisasi titik leleh pertama berada pada saat gaya geser dasarnya 7355303,55 Newton dengan perpindahan atap nya sebesar 22,32 mm dan titik kinerja pada model open frame yaitu pada gaya geser dasarnya 10952469,00

Newton dengan perpindahan atapnya sebesar 66,43 mm.

Parameter-parameter terhitung dari kurva idealisasi dan nilai perpindahan target yang dihitung langsung oleh SAP2000 versi 17.1.1 menggunakan *Coefficient Method FEMA 356* ditampilkan pada tabel berikut:

Tabel 10. Parameter kurva idealisasi dan perpindahan target (δ_T)

Variabel	Push X		Push Y	
	MOF	MS	MOF	MS
C_0	0,36	0,44	0,40	0,57
C_1	1,00	1,00	1,00	1,00
C_2	1,00	1,00	1,00	1,00
C_3	1,00	1,00	1,00	1,00
S_g	0,65	0,65	0,70	0,84
T_e (detik)	0,96	0,96	0,90	0,74
T_i (detik)	0,90	0,78	0,82	0,60
V_y (N)	3938386,85	4026525,74	5377582,50	7355303,55
K_t (N/mm)	256133,78	416893,79	343958,86	523414,91
K_e (N/mm)	227881,53	273075,14	286349,06	337013,57
α	0,36	0,32	0,27	0,24
R	4,73	4,61	3,69	3,27
W (N)	28428644,46	28428644,46	28428644,46	28428644,46
C_m	1,00	1,00	1,00	1,00
δ_T (mm)	53,99	55,89	66,91	66,43
V_T (N)	6925463,21	8215111,00	8554807,32	10952469,00

Sumber: Hasil Analisis Data

4.6.6 Evaluasi Kinerja Struktur

Evaluasi kinerja struktur dapat ditunjukkan dengan mekanisme terjadinya sendi plastis (skema kelelahan) dan level kinerja pada perpindahan targetnya. Perbandingan kinerja struktur dapat dilihat pada tabel 11 berikut:

Tabel 11. Perbandingan Kinerja Struktur

Variabel	Arah X		Arah Y	
	MOF	MS	MOF	MS
δ_T (mm)	53,99	55,89	66,91	66,43
V_T (N)	6925463,21	8215111,00	8554807,32	10952469,00
Jumlah Sendi Plastis	124 B-IO,	155 B-IO,	77 B-IO,	84 B-IO,
	57 IO-LS,	61 IO-LS,	49 IO-LS,	69 IO-LS,
	41 LS-CP,	46 LS-CP,	83 LS-CP,	58 LS-CP,
	1 C-D	1 C-D	1 C-D	2 CP-C,
				7 C-D
Level Kinerja	Collapse (C)	Collapse (C)	Collapse (C)	Collapse (C)

Sumber: Hasil Analisis Data

4.7 Daktilitas Aktual Struktur

Perhitungan daktilitas aktual pada *model open frame* arah X.

$$\delta_u = 53,99 \text{ mm}$$

$$\delta_y = 17,34 \text{ mm}$$

$$f_1 = 1,6$$

$$\mu_\Delta = \frac{53,99}{17,34} = 3,11$$

$$R = 1,6 \cdot 3,11 = 4,98$$

Untuk model yang lain dihitung dengan persamaan yang sama dan disajikan pada Tabel 12.

Tabel 12. Daktilitas Aktual Struktur

Variabel	Arah X		Arah Y	
	MOF	MS	MOF	MS
δ_y (mm)	17,34	18,87	18,89	22,32
δ_u (mm)	53,99	55,89	66,91	66,43
μ_Δ	3,11	2,96	4,31	2,98
R	4,98	4,74	6,90	4,76

Sumber: Hasil Perhitungan

Terlihat dari Tabel 12 daktilitas aktual strukturnya berada pada taraf daktail parsial sesuai dengan tabel 2 SNI 03-1726-2002. *Model open frame* bersifat lebih daktail dibanding dengan *model strut*, di sini terlihat dinding pengisi membuat struktur menjadi lebih kaku.

5 SIMPULAN DAN SARAN

5.1 Simpulan

Pada perbandingan simpangan antara *Model Open Frame (MOF)* dan *Model Strut (MS)* didapat bahwa *Model Open Frame (MOF)* memiliki simpangan yang lebih besar dibanding dengan simpangan dari *Model Strut (MS)*. Simpangan pada portal 5 lantai 4 (akibat Gempa X) *Model Open Frame (MOF)* 40% lebih besar dari simpangan *Model Strut (MS)* dan simpangan pada portal D lantai 4 (akibat Gempa Y) *Model Open Frame (MOF)* 63% lebih besar dari simpangan *Model Strut (MS)*. Ini menunjukkan bahwa dinding bata (*strut*) menyumbangkan kekakuan terhadap struktur tersebut.

Pada kontrol keuntuhan tingkat lunak (*Soft Storey*) terlihat bahwa pada *Model Open Frame (MOF)* baik gempa arah X dan gempa arah Y tidak terjadi keruntuhan *soft storey* yang ditunjukkan oleh drit ratio-nya tidak ada yang melebihi 130%, sedangkan pada *Model Strut (MS)* terjadi keruntuhan *soft storey* yang ditunjukkan dengan drift ratio nya ada yang mencapai 164 % pada portal 5 lantai 3 (akibat gempa X) dan pada portal D lantai 3 mencapai 155%.

Pada perbandingan gaya – gaya dalam dilakukan terhadap dua kombinasi gaya yaitu beban gravitasi dan beban gravitasi ditambah gempa. Pada perbandingan dengan beban gravitasi maupun beban gempa keberadaan dinding pengisi memiliki kecenderungan mengurangi momen yang terjadi apalagi pengaruh beban gempa, akan tetapi untuk gaya aksial dan gaya geser yang terjadi dapat terjadi lebih besar.

Pada kurva idealisasi dan perpindahan target arah X, *model open frame* mampu menerima beban hingga 6925463,21 Newton dengan perpindahan target 53,99 mm, sedangkan pada *model strut* mampu menerima beban hingga 8215111,00 Newton dengan perpindahan target 55,89 mm. Untuk arah Y *model open frame* mampu menerima beban hingga 8554807,32 Newton dengan perpindahan target 66,91 mm, sedangkan pada *model strut* mampu menerima beban hingga 10952469,00 Newton dengan perpindahan target 66,43 mm.

Perbandingan kinerja struktur antara *model open frame* dan *model strut* pada arah X yaitu pada *model open frame* terjadi sendi plastis dengan kondisi yaitu 124 dalam kondisi B-IO, 57 kondisi IO-LS, 41 kondisi LS-CP dan 1 kondisi C-D dengan level kinerja struktur ini yaitu *Collapse*, sedangkan pada *model strut* terjadi sendi plastis dengan kondisi yaitu 155 dalam kondisi B-IO, 61 kondisi IO-LS, 46 kondisi LS-CP dan 1 kondisi C-D, dengan level kinerja struktur ini yaitu *Collapse*.

Untuk arah X *model open frame* terjadi sendi plastis dengan kondisi yaitu 77 dalam kondisi B-IO, 49 kondisi IO-LS, 83 kondisi LS-CP dan 1 kondisi C-D, dengan level kinerja struktur ini yaitu *Collapse*, sedangkan pada *model strut* terjadi sendi plastis dengan kondisi yaitu 84 dalam kondisi B-IO, 69 kondisi IO-LS, 58 kondisi LS-CP, 2 kondisi CP-C dan 7 kondisi C-D. Level Kinerja struktur ini yaitu *Collapse*.

Daktilitas aktual (μ_{Δ}) yang terjadi pada *model open frame* arah X yaitu 3,11 dengan faktor reduksi gempa (R) sebesar 4,98 dengan kategori daktail parsial, sedangkan untuk daktilitas aktual (μ_{Δ}) yang terjadi pada *model strut* yaitu 2,96 dengan faktor reduksi gempa (R) sebesar 4,74 dengan kategori daktail parsial. Untuk arah Y daktilitas aktual (μ_{Δ}) yang terjadi pada *model open frame* yaitu 4,31 dengan faktor reduksi gempa (R) sebesar 6,90 dengan kategori daktail parsial, sedangkan untuk daktilitas aktual (μ_{Δ}) yang terjadi pada *model strut* yaitu 2,98 dengan faktor reduksi gempa (R) sebesar 4,76 dengan kategori daktail parsial. Terlihat bahwa *model open frame* bersifat lebih daktail dibanding dengan *model strut*, di sini terlihat dinding pengisi membuat struktur menjadi lebih kaku dibanding dengan model yang tidak memperhitungkan dinding pengisi.

5.2 Saran

Untuk perencanaan struktur gedung beton bertulang dengan dinding pengisi, disarankan untuk memperhitungkan pengaruh dari dinding pengisi tersebut terhadap struktur yang dianalisis. Terlebih lagi dinding pengisi yang tidak beraturan antarlantainya, yang dapat mengakibatkan keruntuhan tingkat lunak.

Dalam analisis ini properties dinding bata yang digunakan hanya mengacu pada penelitian orang lain sehingga untuk properties dinding bata yang sebenarnya perlu diteliti lebih lanjut.

Model struktur pada analisis ini masih sangat sederhana sehingga perlu dilakukan analisis dengan berbagai model dengan variasi bentang balok dan tinggi kolom.

6 DAFTAR PUSTAKA

- American Society of Civil Engineers. (2000). *Prestandard and Commentary For The Seismic Rehabilitation of Buildings* (FEMA 356). Washington, D.C.: FEMA.
- Anonim. (n.d.). *Prosedur Analisis Beban Seismik SNI Gempa 1726:2012*. Aplikasi SNI Gempa 1726:2012 for Dummies.
- Arizona, F. (2006). Retrieved Juni 31, 2015, from Diponegoro University: http://eprints.undip.ac.id/33815/4/16_12_chapter_II.pdf
- Badan Standarisasi Nasional. (2002). *Tata Cara Perhitungan Struktur Beton Untuk Bangunan Gedung*. Bandung: Badan Standarisasi Nasional.
- Badan Standarisasi Nasional. (2012). *Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- Badan Standarisasi Nasional. (2013). *SNI 1727:2013 Beban minimum untuk perancangan bangunan gedung dan struktur lain*. Jakarta, Indonesia: Badan Standarisasi Nasional.
- Building Seismic Safety Council. (1997). *NEHRP Guidelines for The Seismic Rehabilitation of Buildings* (FEMA 273). Washington D.C.: FEMA.
- Chen, Y. (2003). *Seismic Evaluation of RC Buildings In-Filled with Brick Walls*. Tainan, Taiwan: Department of Architecture, National Cheng-Kung University.

- Dewobroto, W. (2005). *Analisa Inelastis Portal - Dinding Pengisi dengan "Equivalent Diagonal Strut"*. Jurnal Teknik Sipil ITB, Edisi Vol. 12, 1.
- Direktorat Penyelidikan Masalah Bangunan. (1981). *Peraturan Pembebanan Indonesia Untuk Gedung*. Bandung: Yayasan Penyelidikan Masalah Bangunan.
- H. Kristijanto dan D.Iranata. (2012). *Studi Perilaku Dinding Bata dengan Tiga Pembatas Pada Struktur Portal Beton Bertulang*. Seminar Nasional Aplikasi Teknologi Prasarana Wilayah (ATPW), (pp. 67-74). Surabaya.
- Imran, Helmy Hermawan Tjahjanto dan Iswandi. (2009). *Kajian Performance Struktur Portal Beton Bertulang dengan Dinding Pengisi*. Jakarta: Himpunan Ahli Konstruksi Indonesia.
- Leksono, R. S. (2012). *Studi Pengaruh Kekuatan dan Kekakuan Dinding Bata Pada Bangunan Bertingkat*. Jurnal Teknik ITS, 30.
- Nasution, A. (2009). *Analisis dan Desain Struktur Beton Bertulang*. Bandung: ITB.
- Pawirodikromo, W. (2012). *Seismologi Teknik & Rekayasa Kegempaan*. Yogyakarta: Pustaka Pelajar.
- Tu, Y. H. (2006). *In-Site Pushover Tests and Seismic Assessment on School Buildings in Taiwan*. Proceeding of 4th International Conference on Earthquake Engineering, (p. 147). Taipei.
- Tubuh, I. K. (2014). *Analisis Perilaku dan Kinerja Struktur Rangka Dinding Pengisi dengan Variasi Penempatan Dinding pada Lantai Dasar*. Denpasar: Universitas Udayana