

KINERJA STRUKTUR BETON BERTULANG DENGAN PENGARUH LUBANG PINTU DAN JENDELA METODE STATIK NONLINIER PUSHOVER

Ni Putu Silvi¹, I Gusti Ngurah Eka Partama¹, Ni Kadek Astariani¹, I Gusti Made Sudika

¹Program Studi Teknik Sipil, Universitas Ngurah Rai, Jl. Kampus Ngurah Rai No.30, Denpasar

Email: silvi@unr.ac.id

ABSTRAK: Batako umumnya digunakan sebagai dinding pengisi atau sebagai pemisah ruangan pada rangka struktur beton bertulang. Dalam pemodelan struktur, umumnya dinding batako dimodel sebagai beban. Pada sisi lain, dinding pengisi memberikan sumbangan kekakuan secara signifikan terhadap rangka struktur beton bertulang. Untuk itu, perlu menyertakan model dinding dalam pemodelan. Dalam analisis ini telah dibuat 3 buah model yaitu Model M1 adalah model tanpa dinding pengisi (*open frame*), model M2 adalah model dinding pengisi penuh (*Fully Infilled Wall Frame*) dan model M3 adalah model dinding pengisi dengan bukaan pintu dan jendela (*Fully Infilled Wall Frame* dengan *openings* pintu 24.8% dan jendela 41.6%). Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui kinerja struktur beton bertulang dengan dan tanpa pengaruh lubang pintu dan jendela pada dinding akibat beban lateral. Metode analisis yang digunakan adalah metode statik nonlinier *Pushover*. Hasil penelitian menghasilkan model tanpa dinding pengisi (*open frame*) dengan level kinerja IO (*Immediate Occupancy*) memiliki kemampuan menerima beban lateral lebih kecil berturut-turut sebesar 32.77% dan 31.31% terhadap model dengan dinding pengisi penuh (*Fully Infilled Wall Frame*) dan model dinding pengisi dengan bukaan pintu dan jendela (*Fully Infilled Wall Frame* dengan *openings* pintu 24.8% dan jendela 41.6%) dengan level kinerja LS (*Life Safety*) akibat beban gempa arah X dan Y.

Kata kunci: kinerja, dinding pengisi, beton bertulang, pintu, jendela

PERFORMANCE OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES WITH THE EFFECT OF DOOR AND WINDOW HOLE STATIC NONLINEAR PUSHOVER METHOD

ABSTRACT: Bricks are generally used as infilled walls or as room dividers in reinforced concrete structural frames. In structural modeling, brick walls are generally modeled as a load. But in reality, infilled walls contribute significantly to the framework of reinforced concrete structures. For this reason, it is necessary to include a wall model in the modeling. In this analysis, 3 models have been made, namely Model M1 is a model without infilling walls (*open frame*), model M2 is Fully Infilled Wall Frame and model M3 is Fully Infilled Wall Frame with door openings 24.8% and windows 41.6%. The purpose of this study was to determine the performance of reinforced concrete structures with and without the influence of door and window holes in the walls due to lateral loads. The analytical method used is Pushover nonlinear static method. The results showed that the open frame model with the IO (*Immediate Occupancy*) performance level has the ability to accept smaller lateral loads of 32.77% and 31.31% respectively against the Fully Infilled Wall Frame model and the Fully Infilled Wall Frame model with openings doors 24.8% and windows 41.6% with LS (*Life Safety*) performance levels due to earthquake loads in the X and Y directions.

Keywords: performance, behavior, infill walls, reinforced concrete

PENDAHULUAN

Dinding pengisi adalah bagian komponen dari bangunan yang berfungsi sebagai pemisah ruang. Dinding dipasang setelah komponen struktur utama telah diselesaikan. Saat merencanakan gedung dinding dianggap bagian dari non-struktur. Struktur bangunan biasanya direncanakan sebagai *open frame*, dimana dinding dimodel sebagai beban pada komponen struktur. Jika dicermati lebih mendalam, dinding selalu berinteraksi dengan portal disekitarnya dengan beban gravitasi dan beban lateral yang signifikan. Perilaku struktur pemodelan dengan

menyertakan dinding akan memberikan perilaku struktur yang berbeda, hal ini disebabkan dinding memberikan sumbangan kekakuan pada rangk struktur akibat beban gravitasi dan beban gempa. (Dewobroto, 2005). Dinding pengisi dapat dianalisis salah satunya adalah dengan metode elemen hingga. Tegangan dan interaksi pada dinding terhadap suatu struktur rangka di areanya dapat digambarkan pada metode ini. Memodel dinding dengan segmen kecil dapat dilakukan oleh metode ini lebih mendetail dan lebih mudah. Micromodeling tidak hanya memiliki keunggulan namun juga memiliki

kelemahan yaitu lamanya waktu proses analisis jika dibandingkan dengan model diagonal strut pada program aplikasi SAP 2000. Kemampuan Struktur dapat dilihat saat menerima gaya gempa yang besar. Penyebaran gaya-gaya dalam pada suatu struktur sangat diperlukan agar momen, geser dan aksial yang terjadi tidak berfokus pada bagian tertentu saja. Dengan demikian, kinerja yang baik pada struktur masih bisa menahan dari gaya yang diberikan pada gempa meskipun sudah berada diambang keruntuhan. Saat menerima beban gempa kinerja struktur dapat dievaluasi dengan menganalisis static nonlinier *pushover*. Analisis statik nonlinier *Pushover* adalah peningkatan beban statis secara *incremental* sampai mencapai target perpindahan atau mode keruntuhan tertentu. Dari analisis ini dapat digambarkan hubungan antara gaya geser dasar dan perpindahan pada puncak struktur yang selanjutnya digambarkan sebagai grafik kapasitas struktur (*California Seismic Safety Commission, 1996*). Analisis statik nonlinier *Pushover*, memperlihatkan kondisi saat plastis, elastis dan sampai terjadi keruntuhan elemen elemen struktur. Maka dari itu daktilitas aktualnya dapat dihitung. Untuk mengevaluasi kinerja struktur bangunan dilakukan dengan menentukan target *displacement* terlebih dahulu. Antara dinding dan portal memiliki interaksi yang dapat menimbulkan efek negatif dan positif. Efek positifnya adalah kekuatan pada struktur akan meningkat terutama terhadap beban horisontal. Efek negatifnya adalah jika elemen struktur tingkat paling bawah lebih kecil dari tingkat di atasnya. Hal ini dinamakan *soft storey* (Kermani, 2008). Beberapa penelitian terdahulu yang meneliti mengenai dinding pengisi antara lain: Budiwati dan Sukrawa (2017), Kakaletsis and Karayannis (2009), Widiarsa (2023) Rizki Efrida dan Citra (2019). Penelitian ini menganalisis perilaku rangka struktur beton bertulang dengan menyertakan model dinding pengisi. Dalam penelitian ini telah dibuat 3 buah model yaitu model M1 adalah model tanpa dinding pengisi (*open frame*), model M2 adalah model dinding pengisi penuh (*Fully Infilled Wall Frame*) dan model M3 adalah model dinding pengisi dengan bukaan pintu dan jendela (*Fully Infilled Wall Frame* dengan *openings* yang ditentukan

dalam penelitian ini sebesar untuk pintu 24.8% dan jendela 41.6%).

EORI DAN METODE

Dinding Pengisi

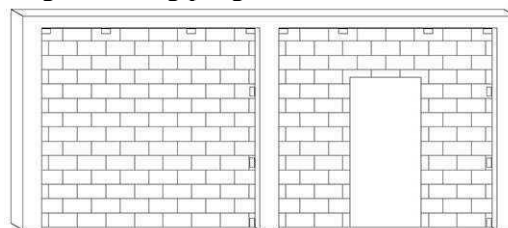
Dinding pengisi adalah dinding yang berfungsi sebagai pembatas/pemisah antar ruangan, estetika ruangan, dan penutup bangunan. Rangka struktur dengan dinding pengisi merupakan struktur dengan rangkaian elemen balok, kolom dari material baja atau beton bertulang dengan dinding batako/bata atau material lainnya. Material dinding pengisi terbuat dari bahan bervariasi seperti bata ringan dan merah, batako dan lain sebagainya. Dinding pengisi tersebut berinteraksi dengan rangka struktur, dimana dapat meningkatkan kekuatan dan kekakuan pada rangka struktur tersebut.

Batako

Batako merupakan gabungan agregat, semen, dan air tanpa atau dengan bahan tambah. Pada industri kecil, batako yang umum di produksi adalah jenis batako padat. Jika dibandingkan dengan batu bata, waktu pengerjaan batako lebih mudah dan cepat. Pengertian batako menurut PUBI-1982 adalah pembuatan bata dengan cara mencetak dan melakukan pemeliharaan pada kondisi lembab. Batako memiliki berbagai variasi ukuran dan bentuk. Batako digolongkan menjadi 2 kelompok utama yaitu batako dengan lubang dan padat. Batako Padat pada umumnya dibuat dari pasir kasar dan campuran semen yang press atau dicetak padat.

Infilled Frame

Rangka struktur dinding pengisi (*infilled frame*) adalah struktur rangka dengan kombinasi antara elemen balok dan kolom dengan dinding pengisi.



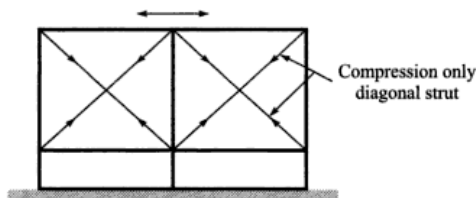
Gambar 1. Rangka dengan dinding pengisi
Sumber: Widiarsa (2023)

Dinding pengisi yang dipasang sebagai

partisi diasumsikan tidak memberikan kontribusi terhadap beban vertikal maupun lateral, sehingga keberadaannya pada analisis struktur rangka diabaikan. Selain itu, ketidaktersediaan model analisis yang realistis dan mudah menjadi alasan lain dari pengabaian dinding pengisi tersebut pada analisis. Kenyataannya, dinding memberikan pengaruh berupa meningkatnya kekakuan struktur terutama saat menerima beban lateral. Pengabaian tersebut menjadi penyebab dari keruntuhan beberapa bangunan bertingkat (Agarwal dan Shrikhande, 2006).

Interaksi Dinding Pengisi

Mengabaikan kekakuan dan kekuatan stuktur rangka dinding pengisi akan menyebabkan kegagalan pada struktur bertingkat. Penyebabnya adalah kekakuan dinding pengisi sebagai pola keruntuhan. Stuktur dinding pengisi memiliki pola keruntuhan yang bersifat rumit yang bergantung pada faktor seperti sifat kekakuan dinding pengisi, kekuatan relatif, rangka struktur pada tumpuan, hubungan rangka struktur dengan dinding pengisi, bukaan, penghubung geser, dan karakteristik lainnya. Penelitian Buonopane (1999), terdapat lima mode kegagalan secara umum yang terjadi pada struktur rangka dinding pengisi akibat peningkatan beban lateral. Mode keruntuhan yang umum adalah mode keruntuhan pada sudut dinding (*corner crushing*). Pada keruntuhan ini mekanisme diagonal tekan (strut) terbentuk, selanjutnya mengubah sistem rangka menjadi pola *truss* seperti pada Gambar 2.



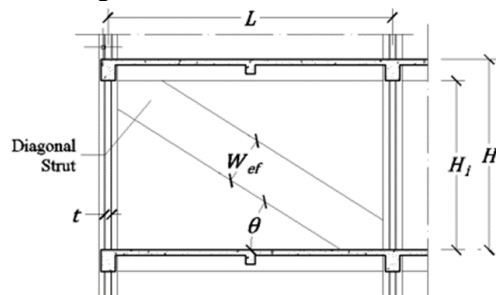
Gambar 2. Mekanisme diagonal tekan (*strut*)
 Sumber: Agarwal & Shrikhande (2006)

Interaksi rangka struktur dengan dinding pengisi sangat berpengaruh terhadap kinerja struktur. Interaksi ini akan meningkatkan level kinerja yang menghasilkan penurunan simpangan struktur berkisar 13% - 36%

dibandingkan dengan simpangan *open frame* (Tjahjanto & Imran, 2009).

Equivalent Diagonal Strut

Equivalent diagonal strut adalah cara untuk menganalisis portal dinding pengisi kondisi inelastis. Pengaruh beban gempa dapat diatasi dengan membentuk *strut* dengan kondisi tekan. Bila dimensi dan modulus elastis material *strut* diketahui, dinding pengisi dalam portal terbuka (*open frame*) dapat dimodel sebagai *strut*. Dimensi *strut* adalah panjang, lebar dan tebal. Lebar *strut* dihitung menggunakan persamaan pada FEMA 273 (*Building Seismic Safety Council, 1997*). Parameter-parameter *strut* seperti pada Gambar 3. Parameter H adalah tinggi kolom dari as ke as tingkat, E_c dan E_i masing-masing adalah modulus elastisitas kolom dan dinding pengisi. Sedangkan H_i dan t masing-masing adalah tinggi dan tebal dinding pengisi dan sudut (radian) antara *strut* dengan balok.



Gambar 3. Parameter *strut*
 Sumber: Agarwal & Shrikhande (2006)

$$\lambda_h = \sqrt[4]{\frac{E_i t \sin 2\theta}{4 E_c I_c H_i}} \tag{1}$$

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

Lebar *strut* adalah W_{ef} dan t adalah tebal *strut* dengan luas penampang A_{ms} . Faktor reduksi kekakuan dinding seperti pada persamaan berikut:

$$\lambda = 1 - 2\alpha_w^{0,54} + \alpha_w^{1,14} \tag{3}$$

Dengan λ dan α_w masing-masing adalah faktor reduksi lebar *strut* dan rasio luas lubang terhadap luas area dinding.

Urutan dalam analisis ini dapat diuraikan sebagai berikut: menentukan jenis material, geometri struktur dan beban struktur. Langkah berikutnya adalah pembuatan

model struktur. Telah dibuat 3 model yaitu Model M1 yaitu model *open frame* dimana dinding batako dimodelkan sebagai beban pada rangka struktur. Model M1 ini dianalisis terlebih dahulu agar memenuhi persyaratan simpangan $< A_a = 0.002h_{sx}$, waktu getar $< T_a \cdot C_u = C_{th_n}^x \cdot C_u$. *Softstory* (*Drift Ratio* $< 130\%$). Apabila persyaratan tersebut terpenuhi, maka dilanjutkan pemodelan M2 dan M3. Model M2 adalah model dinding pengisi penuh (*Fully Infilled Wall Frame*) dan Model M3 adalah model dinding pengisi dengan bukaan pintu dan jendela (*Fully Infilled Wall Frame* dengan *openings* pintu 24.8% dan jendela 41.6%).

Properties Material

Properties material beton bertulang adalah sebagai berikut: mutu beton (f'_c) = 30 MPa, modulus elastisitas beton (E_c) = $4700\sqrt{f'_c}$ = 25743 MPa, berat volume beton bertulang (γ_c) = 2400 kg/m³, mutu tulangan longitudinal (f_{y1}) = 420 MPa (BJTS420), mutu tulangan geser (f_{yt}) = 280 MPa (BJTP280), modulus elastisitas baja tulangan (E_s) = 200000 MPa dan *poisson ratio* (μ) = 0.2. Properties material dinding pengisi (batako) sebagai berikut: mutu batako (f'_m) = 4.056 MPa, modulus elastisitas batako (E_m) = 1915.67 MPa, berat volume (γ_m) = 2100 kg/m³, *poisson ratio* (μ) = 0.2, regangan ultimit (ϵ_{ult}') = 0.0044.

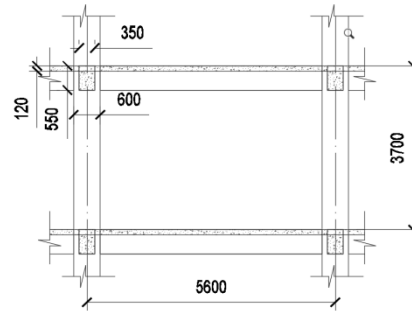
Geometri Struktur

Struktur ini merupakan struktur beton bertulang dengan fungsi sebagai sarana pendidikan dengan sistem SRPMK. Jarak antar portalnya 7.2 m dan 5.7 m. Portal melintang terdiri dari tiga bentang. Panjang bentang pertama dan ketiga adalah 7.2 m, dan bentang lainnya 5.6 m. Jumlah lantai Gedung ini adalah tiga lantai dengan tinggi masing-masing lantai 3.7 m. Dimensi kolom = 650x650 mm, dimensi balok induk dan anak masing-masing 350x550 mm dan 250x450 mm dan dimensi pelat lantai dan atap = 130 mm. Lantai *basement* memiliki 2 tingkat dengan tebal dinding beton adalah 150 mm.

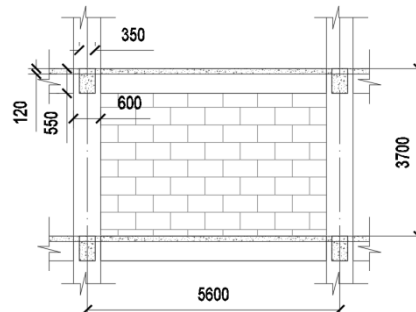
Model Struktur

Dalam penelitian ini telah dibuat 3 buah model yaitu model M1 adalah model tanpa dinding pengisi (*open frame*) (Gambar 4 dan

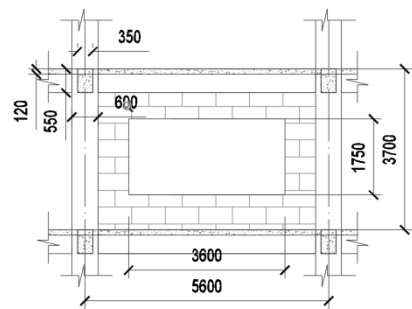
Gambar 7), model M2 adalah model dinding pengisi penuh (*Fully Infilled Wall Frame*) (Gambar 5 dan Gambar 8) dan model M3 adalah model dinding pengisi dengan bukaan pintu dan jendela (*Fully Infilled Wall Frame* dengan *openings* pintu 24.8% dan jendela 41.6%) (Gambar 6 dan Gambar 9). Posisi dinding pengisi seperti pada Gambar 6a. Ketiga model dianalisis dengan bantuan *software* SAP2000.



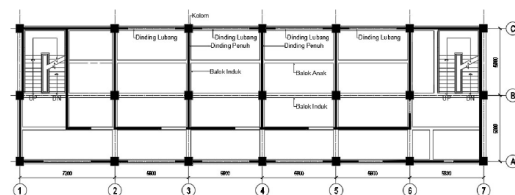
Gambar 4. Model M1



Gambar 5. Model M2



Gambar 6. Model M3

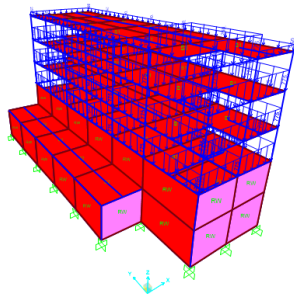


Gambar 6a. Posisi Dinding Pengisi

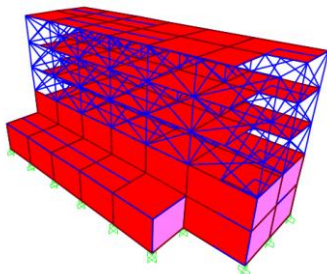
Beban Struktur

Beban-beban yang dianalisis adalah beban

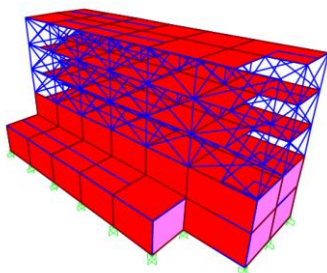
mati, hidup dan gempa. Berat sendiri komponen struktur langsung dihitung oleh *software* SAP2000. Beban mati tambahan pada lantai terdiri dari berat spesi tebal 3 cm = 66 kg/m², berat penutup lantai tebal 1 cm = 24 kg/m². Berat plafon dan penggantung = 20 kg/m². Berat MEP = 25 kg/m². Total beban mati tambahan = 135 kg/m². Beban mati tambahan atap yaitu: berat *water proofing* = 28 kg/m², berat spesi tebal 3 cm = 66 kg/m². Berat penutup lantai tebal 1 cm = 24 kg/m². Berat plafon dan penggantung = 20 kg/m². Berat MEP = 25 kg/m². Total beban mati tambahan pada atap = 163 kg/m².



Gambar 7. Model struktur M1 SAP2000



Gambar 8. Model struktur M2 SAP2000



Gambar 9. Model struktur M3 SAP2000
(modifikasi lebar *strut*)

Beban mati tambahan dinding yaitu: berat dinding batako dengan tebal 10 cm dan tinggi 3.1 m = 775 kg/m². Berat dinding batako tebal 10 cm tinggi 1 m = 250 kg/m². Beban hidup lantai mengacu pada SNI 1727:2020 yang besarnya sesuai fungsi gedung. Untuk fungsi ruang kelas = 192 kg/m² dan untuk

fungsi koridor = 383 kg/m². Beban gempa menggunakan beban gempa *Auto Lateral Load IBC 2006* sesuai SNI 1726:2019. Sistem struktur yang dianalisis SRPMK. Parameter-parameter gempa menurut Tabel 9, Tabel 1 dan 2 SNI 1726:2019 sebagai berikut: *Response Modification* (R) = 8, *System Overstrength* (Ω) = 3, *Deflection Amplification*, (C_d) = 5.5, *Occupancy Importance* (I) = 1.5. Bangunan ini terletak di Denpasar dengan katagori tanah sedang. Parameter kategori desain seismik untuk wilayah Denpasar adalah $S_5 = 0.9607$; $S_1 = 0.3955$ dan kelas situs D berdasarkan SNI 1726:2019.

HASIL DAN PEMBAHASAN

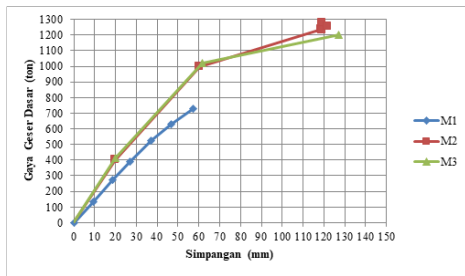
Berdasarkan hasil analisis, model M1 telah memenuhi persyaratan batasan waktu getar alami sesuai SNI 1726:2019 Pasal 7.8, *base reaction*, jumlah ragam mode > 90%, simpangan antar tingkat dan *soft story*. Model *infilled frame* dimodel sebagai *equivalent diagonal strut*. Dengan menggunakan persamaan 1 dan 2 untuk perhitungan lebar strut dinding penuh dan persamaan 3 untuk perhitungan lebar strut dinding dengan lubang pintu dan jendela. Lebar strut model 2 adalah 914.12 mm. Lebar strut model 3 adalah dari 121.4 - 1192 mm.

Analisis *Static NonLinier Pushover*

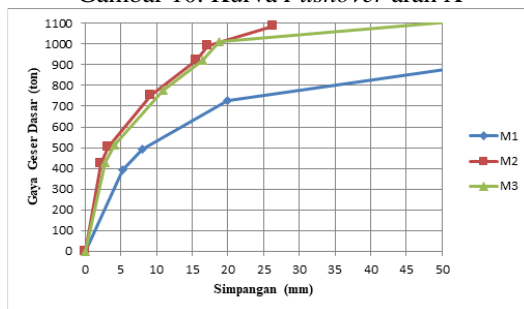
Evaluasi kinerja struktur metode *static nonlinier Pushover* dilakukan setelah struktur telah memenuhi syarat desain. Kondisi akhir dari analisis beban mati akan menjadi kondisi awal pada analisis *Pushover*. Model dibebani *Pushover* arah X dan Y dengan perpindahan atapnya mencapai target *displacement*. Sendi plastis terjadi pada ujung-ujung balok dan kolom dengan keruntuhan akibat momen dan gaya aksial (Tabel 6-7 dan 6-8 FEMA 356).

Kurva *Pushover*

Kurva *Pushover* menunjukkan hubungan antara gaya geser dasar dengan perpindahan puncak atap seperti disajikan pada Gambar 10 dan 11.

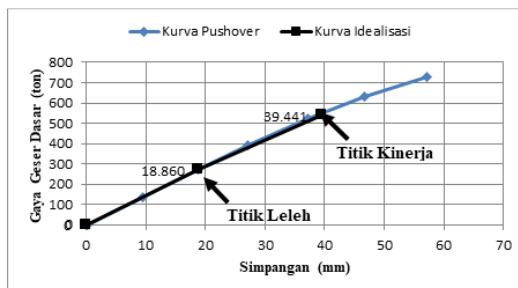


Gambar 10. Kurva Pushover arah X



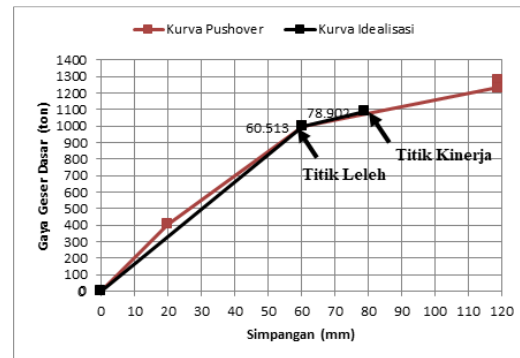
Gambar 11. Kurva Pushover arah Y

Kurva Idealisasi dan Perpindahan Target
 Kurva Pushover merupakan kurva bilinear untuk menghasilkan waktu getar alami sesuai metode FEMA 356. Sedangkan perpindahan target (δ_T) dihitung mengacu pada metode Coefficient Method FEMA 356 hasil analisis SAP2000. Kurva ini masing-masing model ditampilkan pada Gambar 12 sampai dengan Gambar 16.



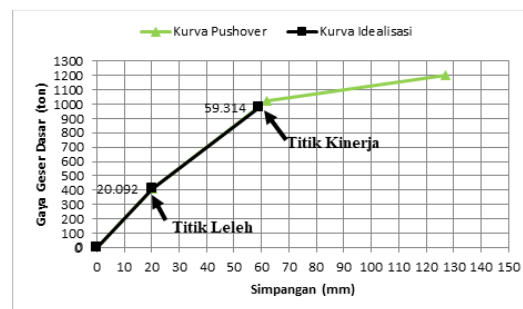
Gambar 12. Pushover dan idealisasi M1 (X)

Gambar 12 menjelaskan titik leleh model M1 berada pada tingkat kemiringan 18.860 mm dengan gaya geser dasar sebesar 271 ton dan titik kinerja struktur berada pada tingkat 39.441 mm dengan gaya geser dasar sebesar 537 ton. Model M1 akibat pushover arah X mengalami titik leleh struktur paling landai dibandingkan dengan model M2 dan M3. Hal ini disebabkan dinding batako pada model M1 hanya sebagai beban pada rangka struktur.



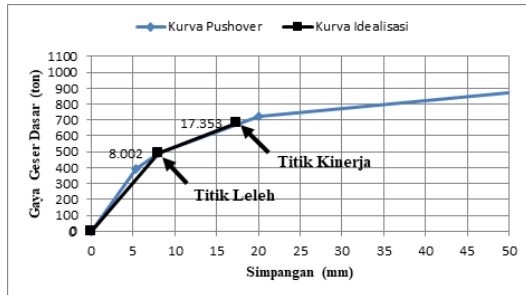
Gambar 13. Pushover dan idealisasi M2 (X)

Titik leleh pada Gambar 13 berada pada tingkat kemiringan 60.513 mm dengan gaya geser dasar sebesar 996 ton dan titik kinerja struktur berada pada tingkat 78.902 mm dengan gaya geser dasar sebesar 1085 ton. Akibat pushover arah X, titik leleh struktur paling tinggi dibandingkan dengan model M1 dan M3. Hal ini disebabkan adanya penyertaan model dinding secara penuh pada rangka struktur beton bertulang.



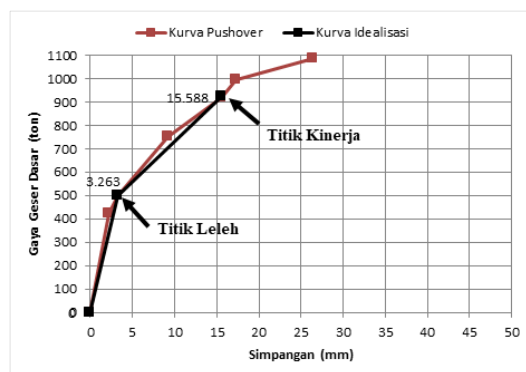
Gambar 14. Pushover dan idealisasi M3 (X)

Terlihat pada Gambar 14 titik leleh struktur model M3 berada pada tingkat kemiringan 20.092 mm dengan gaya geser dasar sebesar 412 ton dan titik kinerja struktur berada pada tingkat 59.314 mm dengan gaya geser dasar sebesar 979 ton. Titik leleh model M3 akibat pushover arah X menghasilkan titik leleh struktur lebih landai dibandingkan dengan model M2 dan M1. Hal ini disebabkan pada model M3 akibat pushover arah X ini dalam pemodelan struktur menyertakan model dinding batako dengan persentase lubang pintu 24.8% dan jendela 41.6% sehingga menyebabkan dinding pengisi lebih landai titik lelehnya dari model M2.



Gambar 14. Pushover dan idealisasi M1 (Y)

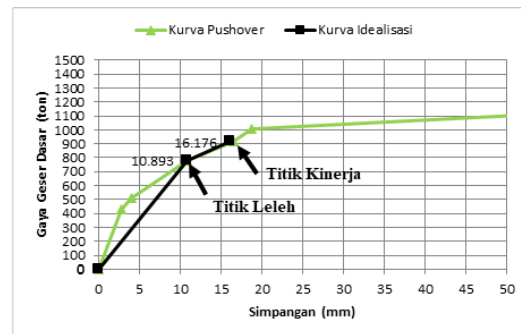
Gambar 14 menunjukkan bahwa titik leleh struktur M1 berada pada tingkat kemiringan 8.002 mm dengan gaya geser dasar sebesar 494 ton dan titik kinerja struktur berada pada tingkat 17.353 mm dengan gaya geser dasar sebesar 680 ton. Pada model M1 akibat *pushover* arah Y merupakan titik leleh struktur yang paling landai dari kedua model M2 dan M3 dikarenakan pada model M1 ini dinding batako hanya diperhitungkan sebagai beban pada rangka struktur beton bertulang.



Gambar 15. Pushover dan idealisasi M2 (Y)

Titik leleh struktur M2 berada pada tingkat kemiringan 3.263 mm dengan gaya geser dasar sebesar 501 ton dan titik kinerja struktur berada pada tingkat 15.588 mm dengan gaya geser dasar sebesar 922 ton. Model M2 akibat *pushover* arah Y merupakan titik leleh struktur yang paling teratas dibandingkan dengan kedua model M1 dan M3 seperti disajikan pada Gambar 15. Hal ini disebabkan dinding batako dimodel pada rangka struktur beton bertulang. Gambar 16 menjelaskan titik leleh struktur M3 berada pada tingkat kemiringan 10.893 mm dengan gaya geser dasar sebesar 515 ton dan titik kinerja struktur berada pada tingkat 16.176 mm dengan gaya geser dasar sebesar 916 ton. Pada model M3 akibat *pushover* arah Y merupakan titik leleh yang lebih landai

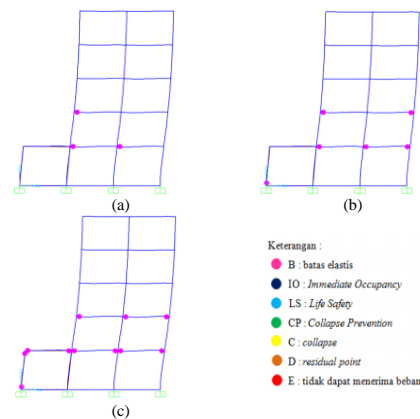
dibandingkan dengan model M2. Hal tersebut disebabkan pengaruh lubang pintu 24.8% dan lubang jendela 41.6%.



Gambar 16. Pushover dan idealisasi M3 (Y)

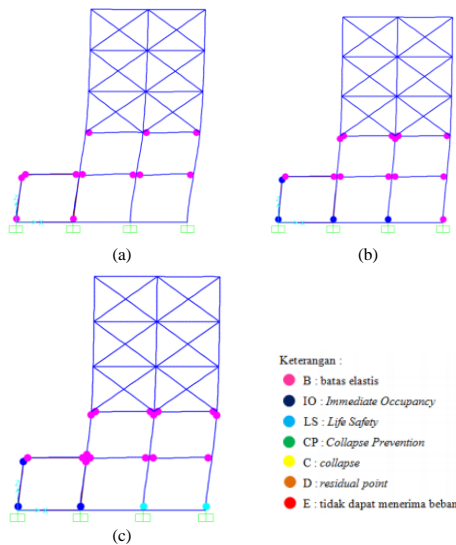
Evaluasi Kinerja Struktur

Perpindahan target yang telah dilakukan, selanjutnya dapat dihitung evaluasi kinerja struktur dengan terjadinya mekanisme sendi plastis (skema keelehan) dan level kinerja masing-masing model.



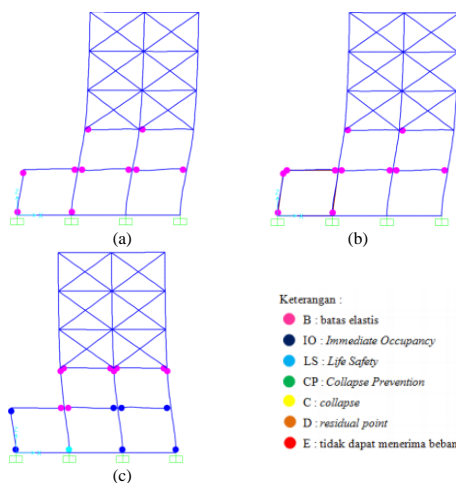
Gambar 17 Kelelahan model M1 (X)

Gambar 17 menghasilkan (a) saat leleh pertama ($\delta = 27$ mm), (b) perpindahan target ($\delta_T = 39$ mm), dan (c) pembebanan maksimum ($\delta = 57$ mm). Saat leleh pertama keelehan terjadi hampir pada seluruh balok dan kolom. Sedangkan saat mencapai perpindahan targetnya, keelehan yang terjadi pada balok lantai 2, lantai 3 serta kolom pada lantai dasar. Level kinerja struktur dikategorikan mencapai level kinerja B yang artinya tidak ada kerusakan struktur yang berarti, dimana kekuatan dan kekakuannya mirip dengan kondisi sebelum mengalami gaya lateral.



Gambar 18. Kelelahan model M2 (X)

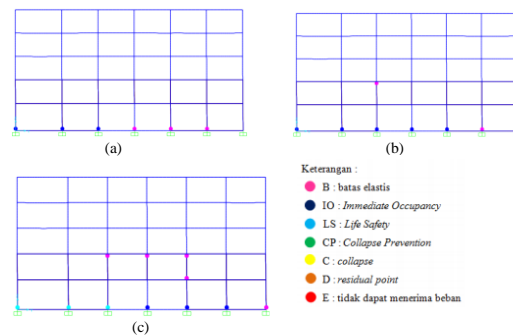
Gambar 18 menghasilkan (a) saat leleh pertama ($\delta = 61$ mm), (b) perpindahan target ($\delta_T = 78$ mm), dan (c) pembebanan maksimum ($\delta = 163$ mm). Saat leleh pertama kelelahan terjadi pada balok lantai 2 dan 3 serta kolom dasar. Sedangkan saat mencapai perpindahan targetnya, kelelahan yang terjadi pada seluruh balok lantai 2, lantai 3, serta kolom lantai dasar. Level kinerja struktur dikategorikan mencapai level kinerja LS dimana hanya sedikit elemen struktur mengalami kerusakan sehingga penghuni pada struktur bangunan ini keselamatannya masih terjaga.



Gambar 19. Kelelahan model M3 (X)

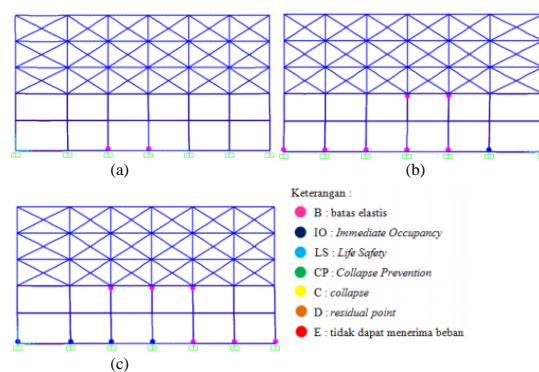
Gambar 19 menghasilkan (a) saat leleh pertama ($\delta = 20$ mm), (b) perpindahan target ($\delta_T = 59$ mm), dan (c) pembebanan maksimum ($\delta = 127$ mm). Saat leleh pertama kelelahan terjadi pada balok lantai 2 dan 3 serta kolom dasar. Sedangkan saat

mencapai perpindahan targetnya, kelelahan yang terjadi pada seluruh balok lantai 2, lantai 3, serta kolom lantai dasar. Level kinerja struktur dikategorikan mencapai level kinerja LS dimana hanya sedikit elemen struktur mengalami kerusakan sehingga penghuni pada struktur bangunan ini keselamatannya masih terjaga.



Gambar 20. Kelelahan model M1 (Y)

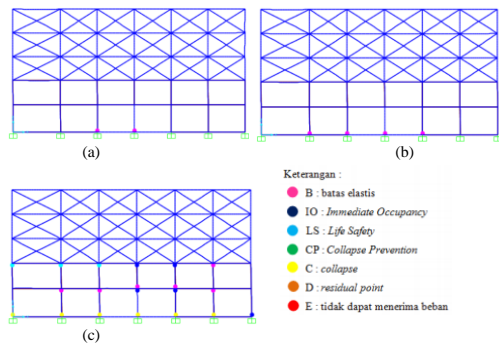
Gambar 20 menghasilkan (a) saat leleh pertama ($\delta = 5$ mm), (b) perpindahan target ($\delta_T = 17$ mm), dan (c) pembebanan maksimum ($\delta = 103$ mm). Saat leleh pertama kelelahan terjadi pada kolom lantai dasar. Sedangkan saat mencapai perpindahan targetnya, kelelahan yang terjadi pada kolom lantai dasar dan lantai 2. Level kinerja struktur dikategorikan mencapai level kinerja LS dimana hanya sedikit elemen struktur mengalami kerusakan sehingga penghuni pada struktur bangunan ini.



Gambar 21. Kelelahan model M2 (Y)

Gambar 21 menghasilkan (a) saat leleh pertama ($\delta = 2$ mm), (b) perpindahan target ($\delta_T = 15$ mm), dan (c) pembebanan maksimum ($\delta = 26$ mm). Saat leleh pertama kelelahan terjadi pada balok lantai 2, lantai 3 dan lantai atap. Sedangkan saat mencapai perpindahan targetnya, kelelahan yang terjadi

pada kolom lantai dasar dan kolom lantai 2 Level kinerja struktur dikategorikan mencapai level kinerja IO dimana saat menerima gempa, struktur dapat menerima gaya gempa tanpa adanya kerusakan.



Gambar 22. Kelelahan model M3 (Y)

Gambar 22 menghasilkan (a) saat leleh pertama ($\delta = 3$ mm), (b) perpindahan target ($\delta_T = 16$ mm), dan (c) pembebanan maksimum ($\delta = 130$ mm). Saat leleh pertama kelelahan terjadi pada kolom lantai dasar. Sedangkan saat mencapai perpindahan targetnya, kelelahan yang terjadi pada kolom lantai dasar dan kolom lantai 2. Level kinerja struktur dikategorikan mencapai level kinerja C (*collapse*) dimana kerusakan pada elemen struktur terjadi saat terjadinya gempa namun belum runtuh.

Tabel 1. Evaluasi kinerja struktur arah X

	M1	M2	M3
S_T (mm)	39	79	59
V_T (ton)	538	1085	979
Jumlah Sendi Platis	27 B-IO	78 B-IO 28 IO-LS 1 LS-C	74 B-IO 30 IO-LS 5 LS-C
Level Kinerja	IO	LS	LS

Tabel 2. Evaluasi kinerja struktur arah Y

	M1	M2	M3
S_T (mm)	17	16	16
V_T (ton)	680	922	916
Jumlah Sendi Platis	53 B-IO	54 B-IO	53 B-IO
Level Kinerja	IO	LS	LS

Tabel 1 adalah kinerja struktur akibat beban pushover X. Perpindahan atap M1 adalah 39 mm dengan beban yang mampu diterima adalah 538 ton. Jumlah sendi plastis yang mencapai level kinerja O (*Operational*) adalah 27 sendi plastis. Perpindahan atap M2 sebesar 79 mm dengan beban 1085 ton. Kondisi LS (*Life Safety*) terjadi 1 sendi plastis. Perpindahan atap M3 adalah 59 mm, dengan beban 979 ton. Terdapat 5 sendi

plastis yang mencapai level kinerja LS (*Life Safety*).

Tabel 2 adalah kinerja struktur akibat beban pushover Y. Perpindahan atap M1 adalah 17 mm dengan beban 680 ton. Jumlah sendi plastis level kinerja O (*Operational*). Perpindahan atap M2 mencapai 16 mm dengan beban 922 ton. Jumlah sendi plastis kondisi O (*Operational*) adalah 54 sendi plastis. Perpindahan atap M2 adalah 16 mm, dengan beban 916 ton. Jumlah sendi plastis level kinerja O (*Operational*) adalah 53 sendi plastis. Pengaruh model dinding penuh rata-rata 98.78% lebih besar kinerjanya dibandingkan model dengan bukaan.

SIMPULAN

Hasil analisis terhadap kinerja ketiga model M1, M2 dan M3 menunjukkan bahwa model tanpa dinding pengisi (*open frame*) dengan level kinerja IO (*Immediate Occupancy*) memiliki kemampuan menerima beban lateral pada kurva kapasitas lebih kecil masing-masing 32.77% dan 31.31% dari model dinding pengisi penuh (*Fully Infilled Wall Frame*) dan model dinding pengisi dengan bukaan pintu dan jendela (*Fully Infilled Wall Frame* dengan *openings* pintu 24.8% dan jendela 41.6%) dengan level kinerja LS (*Life Safety*) akibat beban pushover X dan Y.

DAFTAR PUSTAKA

- American Society of Civil Engineers. 2000. *Prestandard and Commentary for The Seismic Rehabilitation of Buildings (FEMA 356)*. Washington D.C.: FEMA.
- Anonim. 1982. PUBLI-1982. *Persyaratan Umum Bahan Bangunan di Indonesia*. Bandung.
- Agarwal, P dan Shrikhande, M. 2006. *Earthquake Resistant Design of Structures*. New Delhi, India: Prentice Hall.
- ATC-40. 1996. *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*, Volume 1. California. Seismic Safety Commission State of California.
- Uniform Building Code, UBC (1997). *Earthquake regulations for seismic isolated structures*. Whitter (CA, USA).
- Buonopane, S., dan White, R. 1999. *Pseudodynamic Testing of Masonry Infilled Reinforced Concrete Frame*. *Journal of Structural Engineering*, 125(6), 578-

- 589.doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(1999)125:6(578).
- ATC-33 Project. "FEMA 273 - NEHRP Guidelines For The Seismic Rehabilitation Of Buildings", *Building Seismic Safety Council*. Washington, D.C. 1997.
- Badan Standardisasi Nasional. 2019. *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung (SNI 1726:2019)*. Jakarta: BSN.
- Badan Standardisasi Nasional. 2020. *Beban Minimum untuk Perancangan Bangunan Gedung dan Struktur lain (SNI 1727:2020)*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Budiwati, M. dan Sukrawa, M. 2017. *Kinerja Struktur Rangka Beton Bertulang dengan Penambahan Dinding Pengisi Berlubang sebagai Perkuatan Seismik*. Jurnal Teknik Sipil Udayana.
- Dewobroto, W. 2005 *Analisa Inelastis Portal - Dinding Pengisi dengan "Equivalent Diagonal Strut"*. Jurnal Teknik Sipil ITB
- Kermani, et.al. 2008. *The Behaviour of RC Frames With Masorny Infill in Wenchum Earthquake. Dept of Civil and Environmental Engineering, The University of Melbourne, VIC 3010, Australia*
- Kakaletsis and Karayannis. 2009. *Experimental Investigation of Infilled Reinforced Concrete Frames White Openings. ACI Structural Journal. Title no. 106-S14, April 2009.*
- Rizki, E. dan Citra, U. 2019. *Evaluasi Kinerja Dinding Pengisi Bata Merah dengan Openings pada Struktur Beton Bertulang Akibat Beban Gempa Kuat*. Jurnal Teknik Sipil Universitas Muhammadiyah Sumatera utara.
- Tjahjanto, H. H., & Imran, I. (2009). *Kajian Performance Struktur Portal Beton Bertulang dengan Dinding Pengisi*. Seminar dan Pameran HAKI. HAKI.
- Widiarsa, Sukrawa, Sudarsana, Dewi. 2023. *Perbandingan Perilaku Struktur Dinding Terkekang dan Rangka Dinding Pengisi pada Bangunan 4 Lantai*. Jurnal Ilmiah Teknik Sipil: Scientific Journal Of Civil Engineering · Vol. 27 No. 1 Maret 2023.