

Uji Eksperimental Perilaku Portal Sambungan Balok – Sloof Kolom Menggunakan Kunci Penjepit Mekanis (KPM) pada Rumah Instan Struktur Baja Ringan (RISBA) dengan Metode Pengujian Siklik

R.Y. Setiawan^{1*}, I. Satyarno², D. Sulisty³, A.F. Setiawan⁴, W. Sutrisno⁵
^{1,2,3}Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, INDONESIA
**Corresponding author: rafid.yuda.s@mail.ugm.ac.id*

INTISARI

Kurangnya opsi sambungan yang dapat dibongkar pasang untuk struktur baja prefabrikasi yang memenuhi standar kinerja seismik dapat menimbulkan masalah. Solusi yang diusulkan untuk masalah ini adalah dengan menggunakan sambungan kunci penjepit mekanis (KPM). Metode ini melibatkan penggunaan komponen male-female untuk mempermudah perakitan dan pembongkaran elemen struktur pada lokasi pengerjaan konstruksi bangunan baja prefabrikasi. Empat spesimen diuji melalui pembebanan siklik dan kinerja seismik KPM dilakukan penelitian melalui analisis hasil uji eksperimental. Tujuan penelitian ini untuk mengetahui kinerja seismik portal dan menentukan pengaruh pengisi dinding yang menggunakan *GRC board* dan kalsiplank terhadap daktilitas dan disipasi energi serta tipe kegagalan pada portal. KPM pada portal menunjukkan kapasitas lateral portal tertinggi dimiliki KPM-3 portal dengan pengisi dinding *GRC board*. Dengan penambahan *GRC board* dan kalsiplank pada KPM-4 yang memiliki kekakuan lebih besar sehingga memiliki kinerja daktilitas yang paling efisien dibandingkan dengan KPM-1, KPM-2, dan KPM-3. Secara keseluruhan, portal dengan pengisi dinding memiliki nilai perbandingan kondisi ultimit sebesar 1,5 kali lebih besar jika dibandingkan dengan portal tanpa dinding, dan portal dengan pengisi dinding memiliki kinerja daktilitas 6 kali lebih efisien dibandingkan dengan portal tanpa dinding.

Kata kunci: Rumah instan struktur baja (RISBA), sambungan baja KPM, *GRC board*, kalsiplank, pembebanan siklik.

1 PENDAHULUAN

Negara Indonesia termasuk negara dengan wilayah rawan terhadap gempa bumi karena terletak di wilayah cincin api pasifik. Gempa dapat menyebabkan kerusakan signifikan pada bangunan. Ketika gempa bumi terjadi, dapat menimbulkan kekuatan guncangan tanah sangat kuat, yang menyebabkan runtuhnya bangunan. Menurut data dari Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB) dari sepuluh tahun terakhir, gempa bumi yang tak terelakkan telah melanda daerah-daerah yang diklasifikasikan sebagai daerah rawan bencana gempa bumi di Indonesia. Termasuk gempa palu dengan kekuatan 7,4 Skala Richter pada September 2018 yang merusak 67.763 rumah. Sebagian korban jiwa terjadi dikarenakan tertimbun material rumah yang cukup berat. Sebagian besar rumah yang rusak disebabkan karena rekayasa bangunan yang kurang baik di masa lalu, sehingga bangunan mudah runtuh (Sutrisno dkk., 2022).

Rumah baja prefabrikasi dapat menjadi salah satu solusi untuk kebutuhan perumahan yang memadai selama rekonstruksi pasca bencana (Fajar dkk., 2022). Proses prefabrikasi menawarkan keuntungan yang signifikan dibandingkan dengan teknik konstruksi tradisional, termasuk penghematan biaya dan waktu, peningkatan kontrol kualitas dan penurunan ketergantungan pada tenaga kerja terampil (Bazarchi dkk., 2023). Keuntungan tersebut dapat dicapai jika semua komponen utama struktur prefabrikasi dapat dengan mudah dirakit melalui desain sambungan yang sederhana, material yang ringan dengan komponen yang mudah dijangkau dan tidak memerlukan pengelasan di tempat (Rajanayagam dkk., 2021). Selain itu, penelitian terbaru menunjukkan bahwa desain sambungan memainkan peran penting dalam kinerja seismik struktur baja prefabrikasi (Nadeem dkk., 2021b). Oleh karena itu, mengembangkan desain sambungan yang sederhana dan efektif tanpa pengelasan di tempat serta penggunaan material pengisi dinding yang ringan sangat penting untuk menyediakan rumah baja prefabrikasi pascabencana yang efisien.

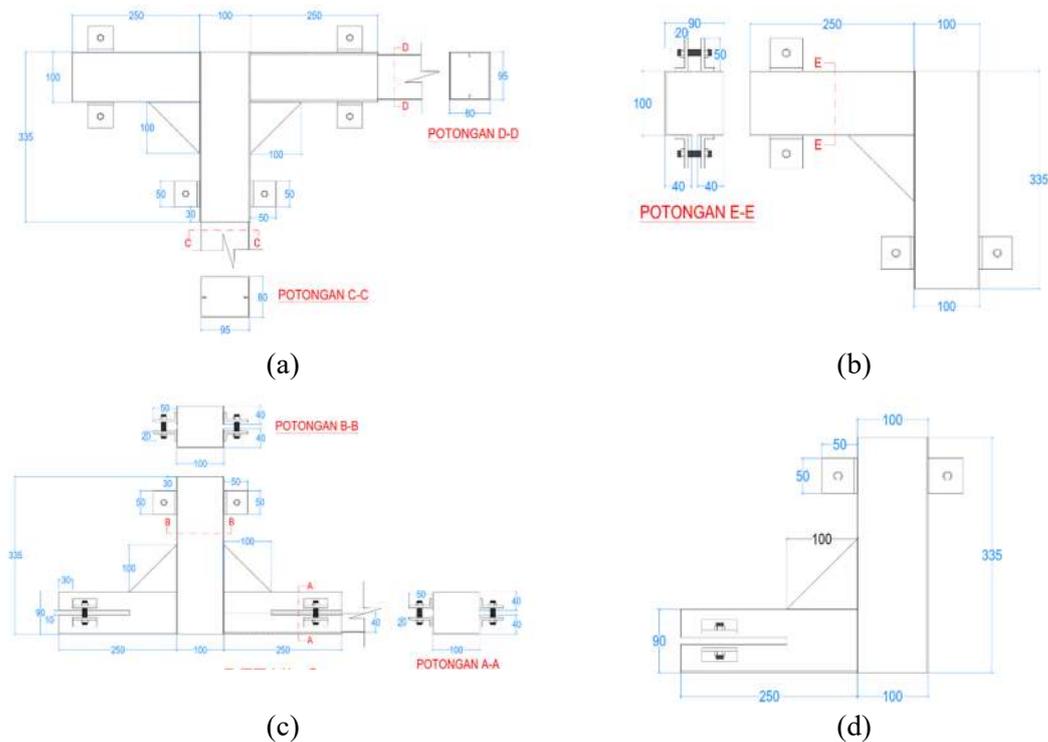
Studi terbaru berfokus pada peningkatan kinerja seismik sambungan baja prefabrikasi. Bazarchi dkk. (2023) mengusulkan sambungan *interlocking* (IC) tipe *male-female* baru dengan pelat pengikat yang menghilangkan mekanisme pengangkatan yang menghambat pada modul penahan gaya gravitasi. Investigasi eksperimental dan numerik mereka menunjukkan bahwa bagian bersih dari pelat pengikat memberikan keuletan lokal yang substansial pada IC sebelum terjadi kegagalan. Dikarenakan toleransi produksi, slip yang besar dapat terjadi pada komponen

male-female karena penghilangan elemen penahan pencabutan. Zhang dkk. (2022a) mengidentifikasi kelemahan konstruksi dan kinerja pada sambungan modular yang ada, seperti konektivitas yang buruk antar modul dan mekanisme penyambungan yang terlalu rumit, yang tidak memenuhi persyaratan seismik. Untuk memitigasi masalah tersebut, mereka mengusulkan solusi retrofit seismik yang melibatkan pengaku yang berpusat pada diri sendiri yang secara efektif mengendalikan kerusakan dan mengurangi penurunan kekuatan global.

Penelitian lainnya, Maidiawati dkk. (2011) melakukan pengujian beban statik siklik pada 4 (empat) model struktur rangka beton bertulang dengan dan tanpa dengan dinding bata. Pengujian menghasilkan bahwa kekuatan lateral dan kekakuan struktur rangka dengan dinding pengisi bata lebih besar dari pada struktur rangka tanpa dinding akan tetapi struktur rangka dengan dinding memiliki daktilitas lebih rendah dari struktur rangka tanpa dinding. Zovkic dkk (2012) juga melakukan pengujian beban siklik pada struktur rangka tanpa dinding dan struktur rangka dengan dinding yang memiliki beberapa tipe perbedaan kekuatan dinding. Hasil pengujian mendapatkan bahwa struktur rangka beton bertulang dengan dinding pengisi memiliki kekakuan, dumping kekuatan awal yang jauh lebih besar dibandingkan dengan tanpa dinding. Dengan adanya dinding, dapat meningkatkan kekuatan lateral pada struktur dan memiliki nilai daktilitas yang lebih tinggi dibandingkan struktur bangunan tanpa dinding. *Glass Fiber Reinforced Concrete* (GFRC) adalah produk precast berbasis semen portland yang diperkuat dengan serat kaca tahan alkali (AR). Lembar GFRC dibuat dengan cara menyempromatkan matriks mortar dan serat kaca yang dipotong dengan cara diserut. (Shah, dkk., 1988). Kalsiboard diproduksi dengan menggunakan bahan-bahan baku pilihan dan melalui proses Autoclave (proses pengeringan dengan tekanan dan temperatur tinggi) untuk mendapatkan hasil produk yang stabil dan tahan lama. Dengan materi penyusun tersebut membuat bahan ini tahan air dan tahan rayap. Kemudahan yang lain adalah mudah, ringkas dan cepat dalam pemasangannya (Balaka, dkk., 2016)

Penelitian yang dilakukan Desivyana pada tahun 2019 melakukan evaluasi pada pembangunan struktur tahan gempa menggunakan material ringan dengan elemen struktural dari material baja serta dinding menggunakan *GRC board* dan kalsiplank. Variasi material dinding bangunan dengan massa yang lebih berat menyebabkan gaya dalam aksial maupun momen lentur yang terjadi pada elemen lebih besar. Namun, struktur dengan berat paling ringan belum tentu menghasilkan kekakuan struktur paling rendah. Wuryanti pada tahun 2008 melakukan penelitian spesimen berupa sistem portal rangka baja dengan pengujian secara monotonik untuk mengetahui nilai daktilitas kapasitas dalam memikul beban gempa. pengujian menunjukkan model portal terbuka yang diberi pasangan bata dengan *shear connector* merupakan model portal yang memiliki nilai daktilitas dan kapasitas tinggi dalam memikul beban gempa dibandingkan model portal penahan momen (open frame); portal terbuka dengan *bracing*; portal terbuka dengan dinding pasangan bata tanpa *shear connector*.

Berbagai upaya penelitian telah dilakukan, namun permasalahan seperti slip pada komponen *male-female*, daya dukung yang rendah dan pengelasan di tempat pada pembuatan sambungan, serta tekuk lokal pada penampang tubular masih perlu diatasi. Berdasarkan permasalahan tersebut, sambungan kunci penjepit mekanis (KPM) dengan material pengisi dinding *GRC board* dan kalsiplank diusulkan dalam penelitian ini untuk memberikan desain yang sederhana dan praktis dengan kinerja seismik yang baik, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Selain itu, perlu dilakukan investigasi terhadap kinerja seismik KPM, menentukan kategori kekakuan dan kriteria sistem penahan momen. Dua buah spesimen akan dengan pembebanan siklik dan dianalisis dengan menggunakan analisis eksperimental dan numerik. Hasil dari penelitian ini dapat memecahkan masalah dan menjadi dasar dalam desain rumah baja prefabrikasi dengan kinerja seismik yang baik, daya tahan tinggi, dan kemudahan dalam perakitan di daerah rawan gempa. Namun, penelitian ini memiliki keterbatasan, antara lain hanya meneliti konfigurasi sambungan samping dan menerapkan pembebanan siklik yang sejajar dengan sumbu axis.



Gambar 1. Komponen sistem sambungan kunci penjepit mekanis (KPM).

2 METODE PENELITIAN

Beberapa tahap yang akan dilalui pada penelitian ini, meliputi tinjauan literatur, desain spesimen sambungan, pengujian eksperimental, pra-analisis data eksperimental, pemodelan numerik dan validasi, dan analisis kinerja seismik. Tinjauan literatur akan dilakukan untuk memastikan bahwa penelitian yang diusulkan belum pernah diteliti sebelumnya. Setelah itu, empat spesimen akan didesain dengan mempertimbangkan berbagai faktor untuk mendapatkan hasil kinerja seismik yang paling optimal. Spesimen akan diuji melalui analisis eksperimental dan numerik di laboratorium struktur dan komputasi di Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada. Uji eksperimental akan dilakukan di laboratorium struktur untuk mendapatkan perilaku aktual dari sambungan yang diusulkan. Jika data telah terkumpul dari pengujian eksperimental, analisis awal akan digunakan untuk memvalidasi model numerik. Kinerja seismik dari empat variabel spesimen yang diusulkan akan dievaluasi berdasarkan data yang terkumpul.

2.1 Studi Eksperimental

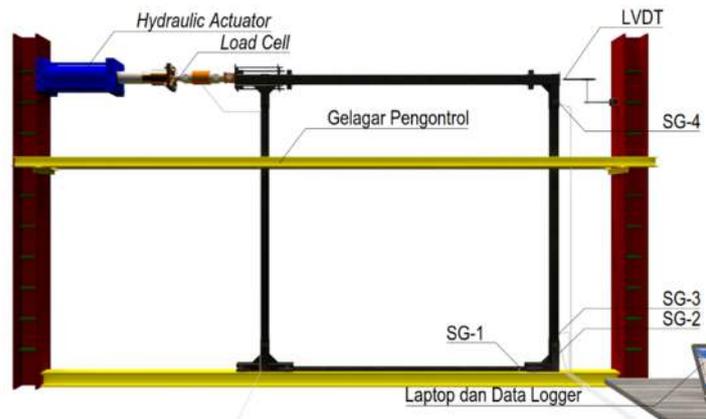
Percobaan akan dilakukan di laboratorium struktur untuk menyelidiki respon sambungan kunci penjepit mekanis (KPM) terhadap pembebanan siklik. Fokus dari penelitian ini mengenai perilaku hubungan beban - perpindahan. Empat pengujian akan dilakukan pada empat variabel yang berbeda pada portal dengan sambungan KPM, yaitu spesimen portal open frame dan spesimen portal dengan pengisi dinding *GRC board* dan kalsiplank.

2.2 Desain Spesimen

Bagian kolom baja dan balok baja adalah saluran berbibir ganda dengan dimensi 95 x 80 x 10 x 1,8 mm. Bagian pengunci adalah penampang berongga persegi yang dimodifikasi (*modified square hollow section*, MSHS) dengan dimensi 100 x 90 x 1,65 mm. Semua bagian sistem sambungan KPM terbuat dari baja SS400. Baut berkekuatan tinggi kelas 8.8 dengan diameter 10 mm digunakan sebagai penjepit pada sambungan. Sekrup *roofing* diameter 10 mm dengan panjang 19 mm digunakan untuk memasang pengisi dinding *GRC board* dan kalsiplank pada rangka baja canai dingin, dan sekaligus untuk memasang baja canai dingin sebagai rangka pada portal. Dimensi komponen lain yang terkait dengan sistem sambungan KPM dapat dilihat pada Gambar 2, Gambar 3 dan Gambar 4. Parameter yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter spesimen

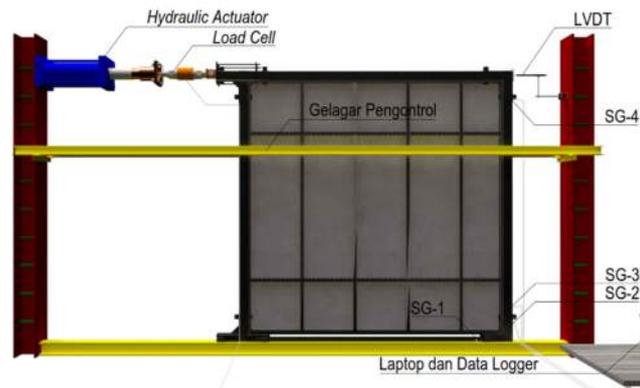
Spesimen	Balok dan Kolom (mm)	Sloof (mm)	Pengunci (mm)	Baut		Variasi Isi Dinding	Jumlah
				Dia. (mm)	Torsi (Nm)		
KPM-1	DLC 95 x 80 x 10 x 1,8	C 95 x 33 x 10 x 1,8	MSHS 100 x 90 x 1,65	10	15	<i>Open Frame</i>	1
KPM-2	DLC 95 x 80 x 10 x 1,8	C 95 x 33 x 10 x 1,8	MSHS 100 x 90 x 1,65	10	15	Kalsiplank	1
KPM-3	DLC 95 x 80 x 10 x 1,8	C 95 x 33 x 10 x 1,8	MSHS 100 x 90 x 1,65	10	15	<i>GRC board</i>	1
KPM-4	DLC 95 x 80 x 10 x 1,8	C 95 x 33 x 10 x 1,8	MSHS 100 x 90 x 1,65	10	15	<i>GRC board dan Kalsiplank</i>	1



(a) KPM-1



(b) KPM-2

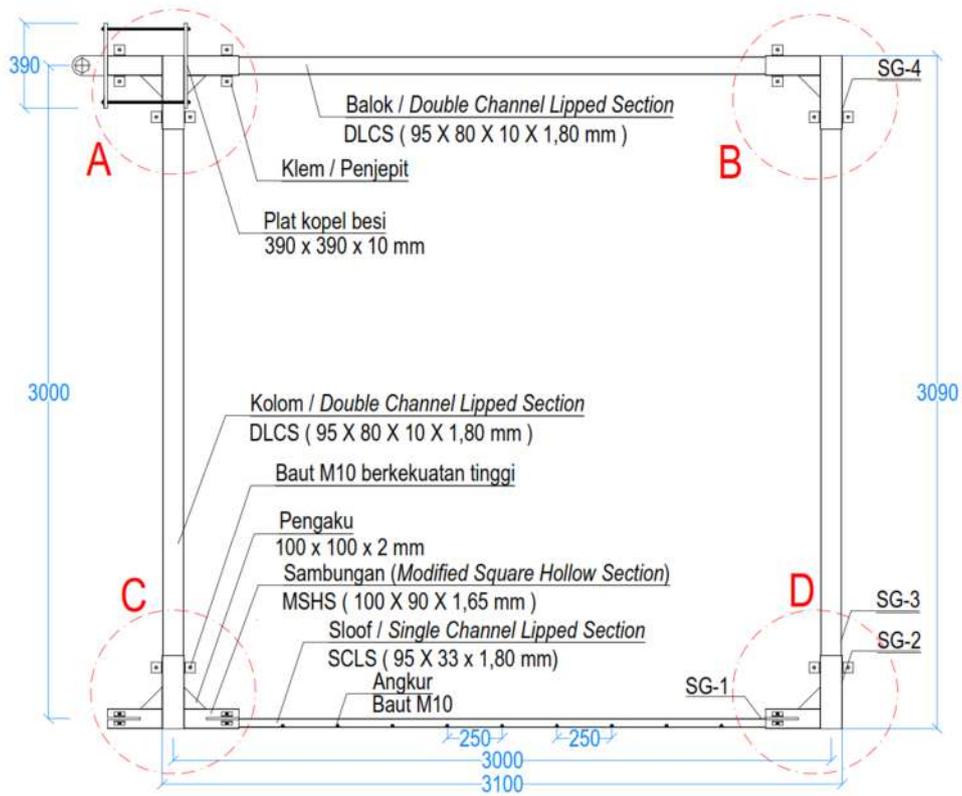


(c) KPM-3

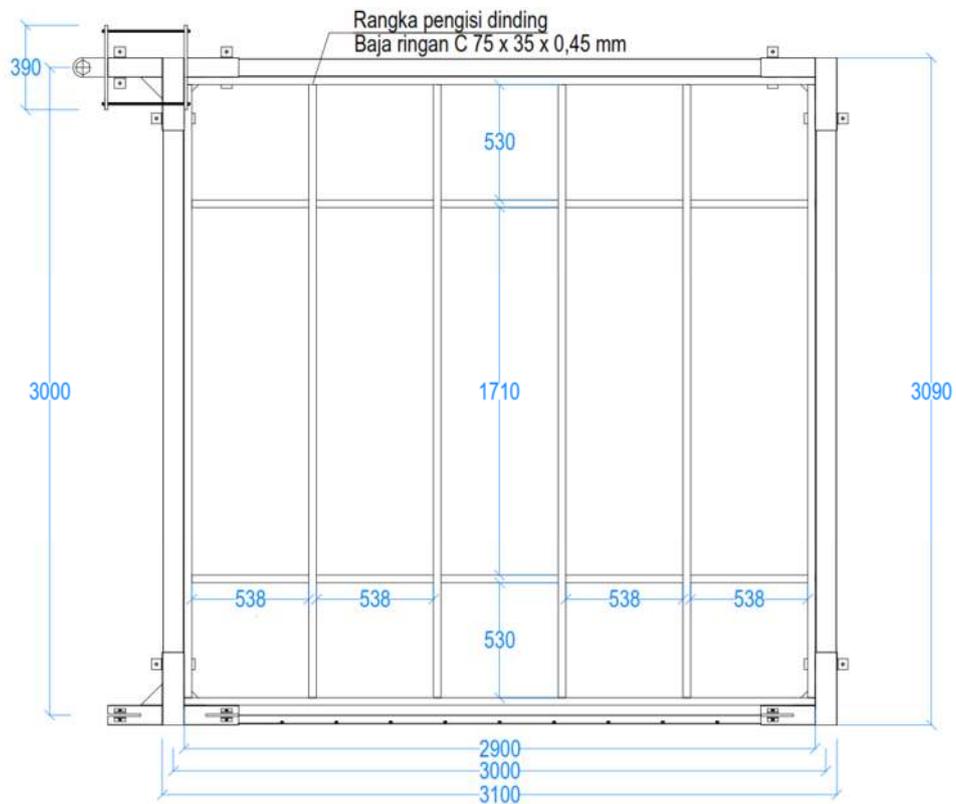


(d) KPM-4

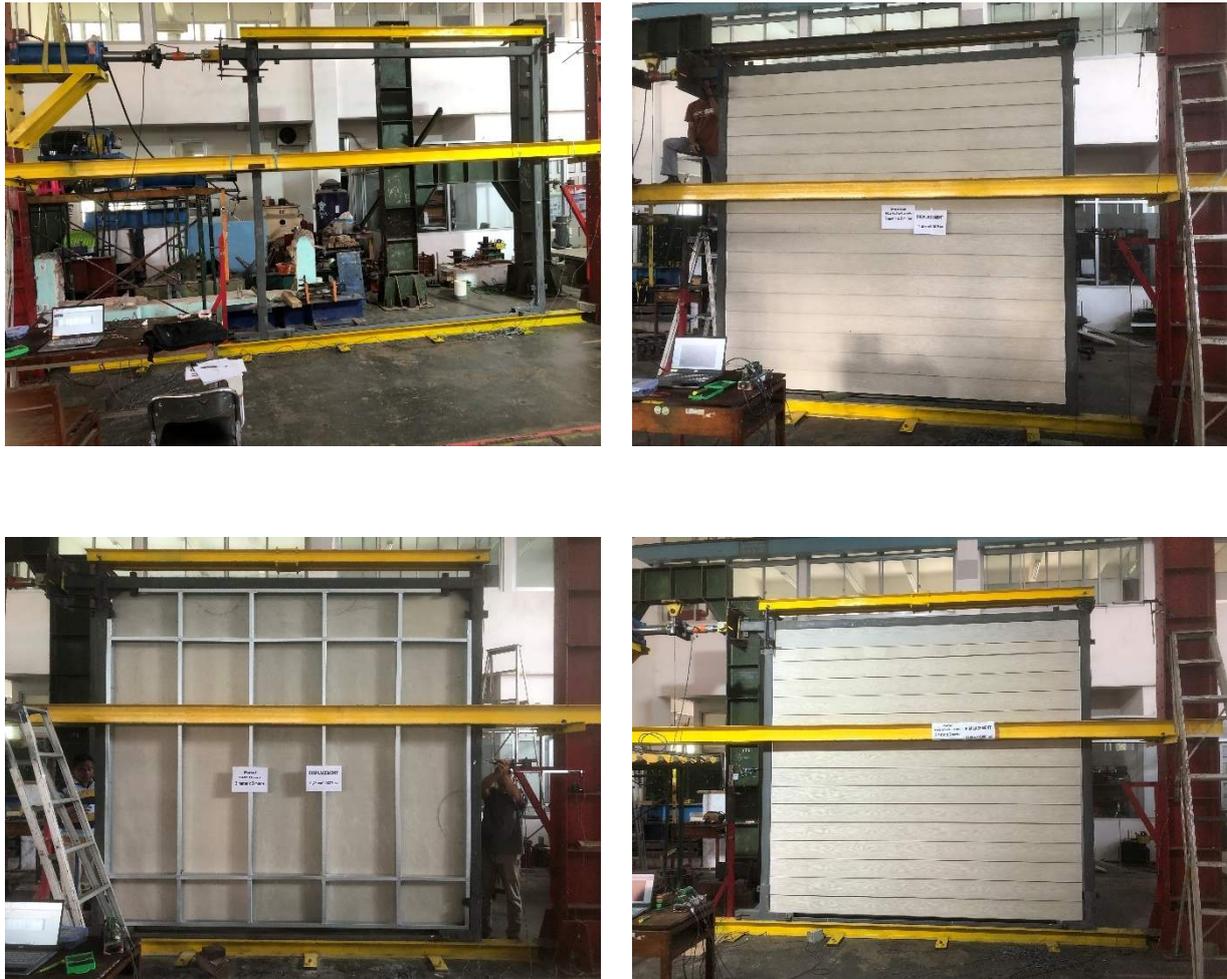
Gambar 2. Ilustrasi komponen saat pengujian siklik



(a)

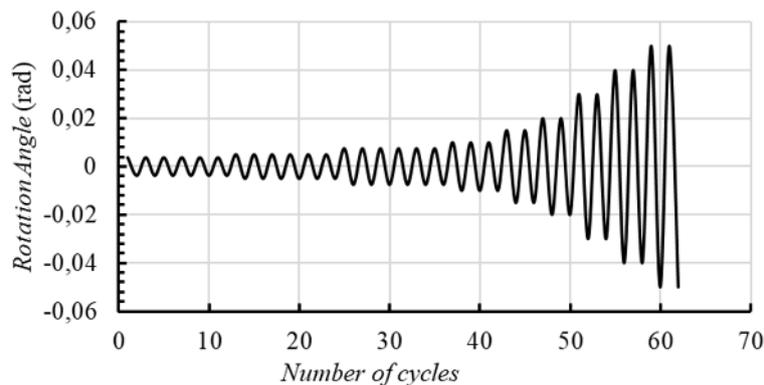


Gambar 3. Dimensi komponen yang digunakan sebagai spesimen portal, a) portal tanpa dinding b) portal dengan pengisi dinding.



Gambar 5. Setup uji eksperimental, a) konfigurasi pengujian KPM-1, b) konfigurasi pengujian KPM-2, c) konfigurasi pengujian KPM-3, d) konfigurasi pengujian KPM-4

Ketentuan seismik menggunakan AISC dalam menentukan protokol pembebanan siklik yang diterapkan pada spesimen, dapat dilihat pada Gambar 6. Uji pembebanan siklik menilai kemampuan sambungan baja dalam menahan beban seismik sehingga semua spesimen menggunakan metode pembebanan yang sama. Selama pembebanan, data kuantitatif primer seperti beban, perpindahan, dan regangan akan dikumpulkan melalui alat akuisisi data dan dimonitor dari komputer. Urutan pembebanan siklik akan dihentikan ketika fraktur yang terlihat terjadi, atau piston aktuator telah mencapai batas maksimal.



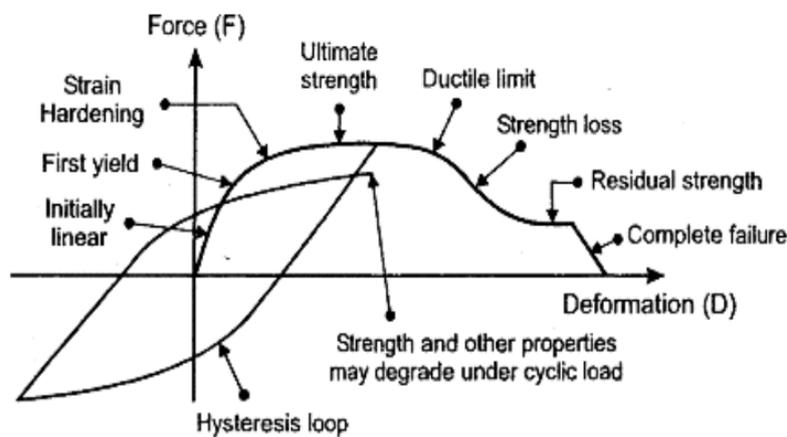
Gambar 6. Protokol pembebanan siklik untuk sambungan momen balok-ke-kolom. (AISC 341, 2016)

2.5 Metode Analisis

Penelitian ini mengkaji seberapa baik kinerja sambungan Kunci Penjepit Mekanis (KPM) dalam menahan gempa. Hal itu akan dibuktikan dengan menganalisis secara numerik dan pengujian eksperimental. Data yang dikumpulkan dari eksperimen, termasuk pengukuran beban dan perpindahan, akan digunakan untuk membuat kurva histeresis yang menggambarkan hubungan antara beban dan perpindahan. Dengan memeriksa kurva histeresis, perilaku KPM akan dievaluasi dengan berbagai parameter, seperti rasio daktilitas, disipasi energi, dan jenis sistem rangka momen.

2.5.1 Kurva *Hysteresis* dan *Backbone*

Kurva *hysteresis*, yang diperoleh dari hubungan antara rotasi dan momen, memberikan informasi penting tentang respons sambungan. Momen pada sambungan dihitung dengan mengalikan beban yang diterapkan dengan jarak tegak lurus ke pusat sambungan. Bersamaan dengan itu, sudut rotasi ditentukan dengan membagi perpindahan lateral dengan lengan momen. Gambar 8. menunjukkan kurva *hysteresis* spesimen setelah dilakukan pembebanan siklik. Namun, kurva *skeleton* hanya menunjukkan hubungan *backbone* antara beban maksimum dan deformasi. Memahami kurva ini sangat penting untuk memprediksi kinerja sambungan baja, karena pembebanan siklik dapat menyebabkan degradasi kekakuan akibat akumulasi deformasi plastis (Chen dkk., 2017).



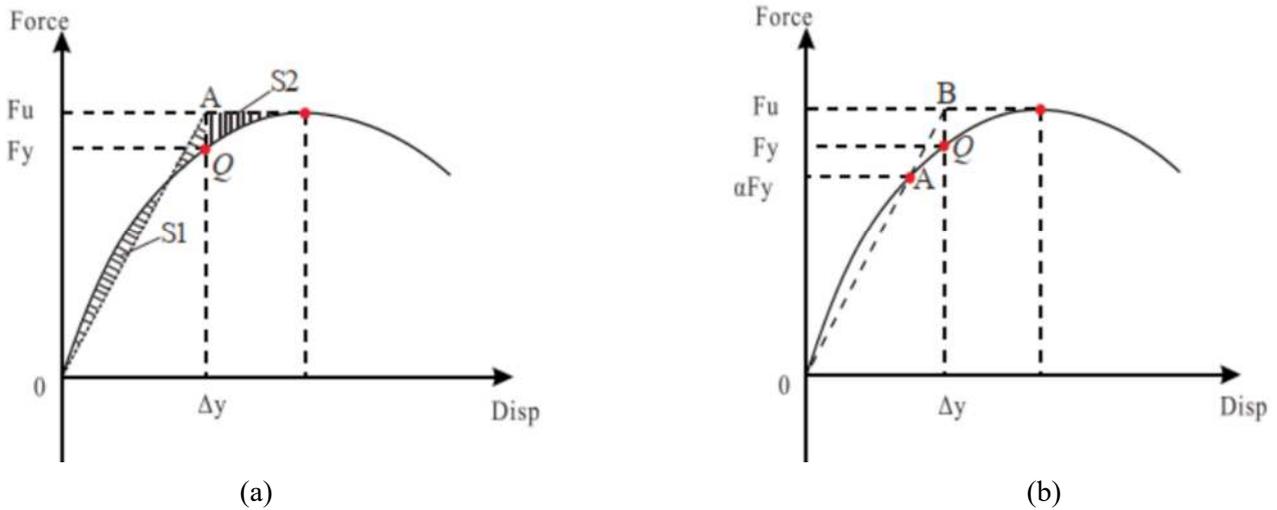
Gambar 8. Kurva histeresis tipikal spesimen. (Powell, 2010)

2.5.2 Kekakuan Sambungan

Tingkat kekakuan sambungan ditentukan dengan menggunakan hasil eksperimental dan teoritis. Untuk kekakuan eksperimental, digunakan kriteria luluh pada spesimen, tepatnya metode energi yang sama dan kekakuan tereduksi, seperti yang digambarkan pada Gambar 9. Kekakuan eksperimental dihitung dengan membagi beban luluh dengan perpindahan. luluh spesimen. Sebaliknya, kekakuan teoritis mengasumsikan kekakuan ideal untuk menghubungkan komponen kolom dan balok, yang dihitung dengan menggunakan Persamaan (2.1).

$$K_{r, theo} = \frac{12E(I_1+I_2)}{L^3} \tag{2.1}$$

dimana E dan I masing-masing mewakili modulus elastisitas dan momen inersia komponen balok-kolom; L menunjukkan jarak antara titik pembebanan dan sumbu netral balok. Perilaku lain yang terkait dengan kekakuan adalah degradasi kekakuan spesimen selama pembebanan siklik. Degradasi kekakuan dapat mengindikasikan titik awal luluh spesimen dan tingkat kerusakan plastis (Zhang dkk., 2022a).



Gambar 9. Definisi titik leleh dan kekakuan: (a) metode energi yang sama, (b) metode kekakuan tereduksi (Lu dkk., 2022)

2.5.3 Rasio Daktilitas

Rasio daktilitas adalah proporsi tekukan elastis terhadap perpindahan vertikal tertinggi (Powell, 2010). Rasio ini mengukur kemampuan material kemampuan material untuk mengalami deformasi plastis tanpa putus. Selain itu, rasio daktilitas dapat dihitung dengan persamaan (2.2).

$$\mu = \frac{\theta_u}{\theta_y} \tag{2.2}$$

di mana θ_u menunjukkan sudut rotasi utama, dan θ_y menunjukkan sudut rotasi hasil.

2.5.4 Disipasi Energi

Disipasi energi mengacu pada penyerapan dan pengurangan jumlah energi yang ada pada sistem struktur selama gempa bumi melalui deformasi inelastis pada sambungan dan perilaku *hysteresis* yang dihasilkan, yang meningkatkan kinerja seismik struktur (Zhang dkk., 2022). Kemampuan untuk menghilangkan energi sangat penting dalam mengkarakterisasi kinerja seismik, yang ditunjukkan melalui disipasi energi histeresis (E_d) didapatkan dengan persamaan (2.3).

$$E_d = \sum_{i=0}^n \frac{(F_{(i+1)} + F_i)}{2} (\Delta_{(i+1)} + \Delta_i) \tag{2.3}$$

di mana F mewakili gaya; Δ mewakili perpindahan pada titik tertentu.

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

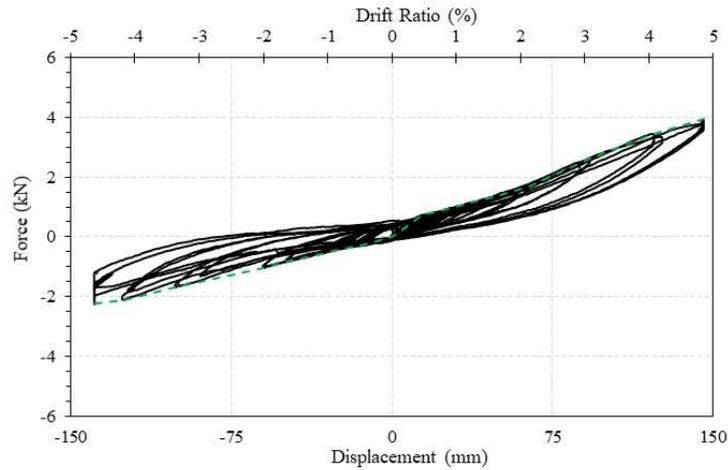
3.1 Investigasi eksperimental

Empat uji pembebanan siklik skala penuh dilakukan untuk mengevaluasi kinerja seismik kunci penjepit mekanis (KPM). KPM menggunakan sistem sambungan plug and play dengan baut yang sudah dimuat sebelumnya, sehingga tidak perlu pengelasan di tempat saat perakitan rumah instan baja ringan (RISBA). Studi ini menganalisis kekakuan perilaku histeretis, kurva kerangka, keuletan, dan mode kegagalan menurut pembebanan siklik.

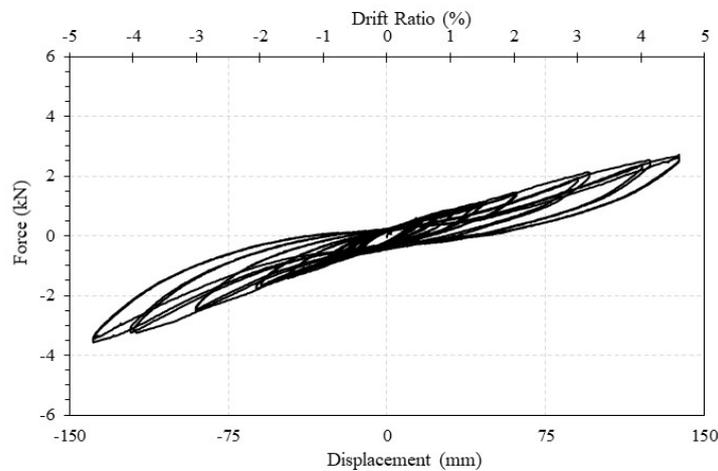
3.1.1 Perilaku histeresis

Keempat spesimen menunjukkan bentuk kurva histeresis yang sama, keempatnya memiliki tampak kurva berbentuk S dengan jepitan di bagian tengahnya, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.1. Spesimen portal open frame pada kondisi ultimit saat spesimen dibebani dengan beban dorong (tekan) adalah 3,94 kN dengan simpangan 145,43 mm dan dibebani dengan beban tarik adalah 2,24 kN dengan simpangan 138,85. Spesimen portal kalsiplank pada kondisi ultimit saat spesimen dibebani dengan beban dorong (tekan) adalah 2,72 kN dengan simpangan 137,92 mm dan dibebani dengan beban tarik adalah 3,56 kN dengan simpangan 138,65 mm. Spesimen portal GRC board pada kondisi ultimit saat spesimen dibebani dengan beban dorong (tekan) adalah 5,51 kN dengan simpangan 43,86 dan dibebani dengan beban tarik adalah 6,03 kN dengan simpangan 138,80 mm. Spesimen portal GRC board + kalsiplank pada

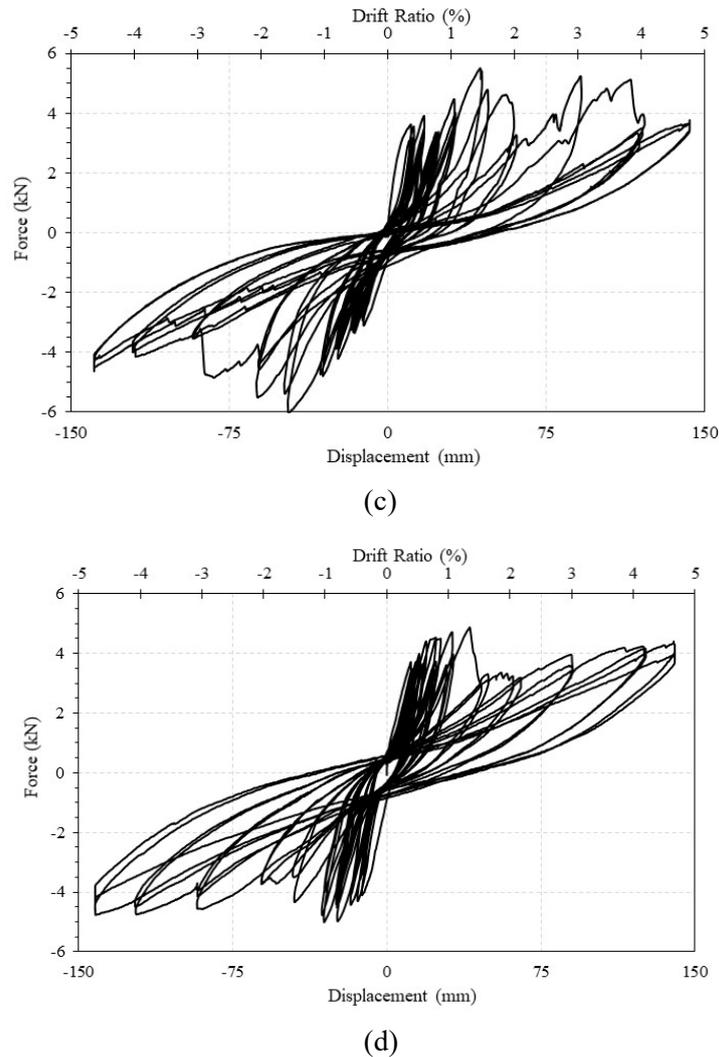
kondisi ultimit saat spesimen dibebani dengan beban dorong (tekan) adalah 48,70 kN dengan simpangan 40,42 mm dan dibebani dengan beban tarik adalah 5,00 kN dengan simpangan 141,74 mm. Hanya spesimen portal open frame saat kondisi spesimen yang dibebani dengan beban tarik memiliki nilai yang lebih rendah daripada saat spesimen dibebani dengan beban dorong (tekan), yang disebabkan oleh fenomena tekuk bagian sloof pada pembebanan siklik pada sudut rotasi 0,04 rad. Spesimen portal dengan pengisi dinding *GRC board* dan kalsiplank pada kondisi ultimit saat spesimen dibebani dengan beban dorong (tekan) adalah 4,87 kN dengan simpangan 40,42 mm dan dibebani dengan beban tarik adalah 5,00 kN dengan simpangan 30,60 mm. Pada spesimen portal dengan pengisi dinding *GRC board* dan kalsiplank memiliki nilai simpangan yang jauh lebih kecil saat kondisi ultimit dibandingkan dengan spesimen portal open frame, yang disebabkan pengaruh dari pengisi dinding *GRC board* dan kalsiplank, dibuktikan dengan nilai kondisi ultimit spesimen yang lebih besar daripada portal open frame tanpa dinding.



(a)

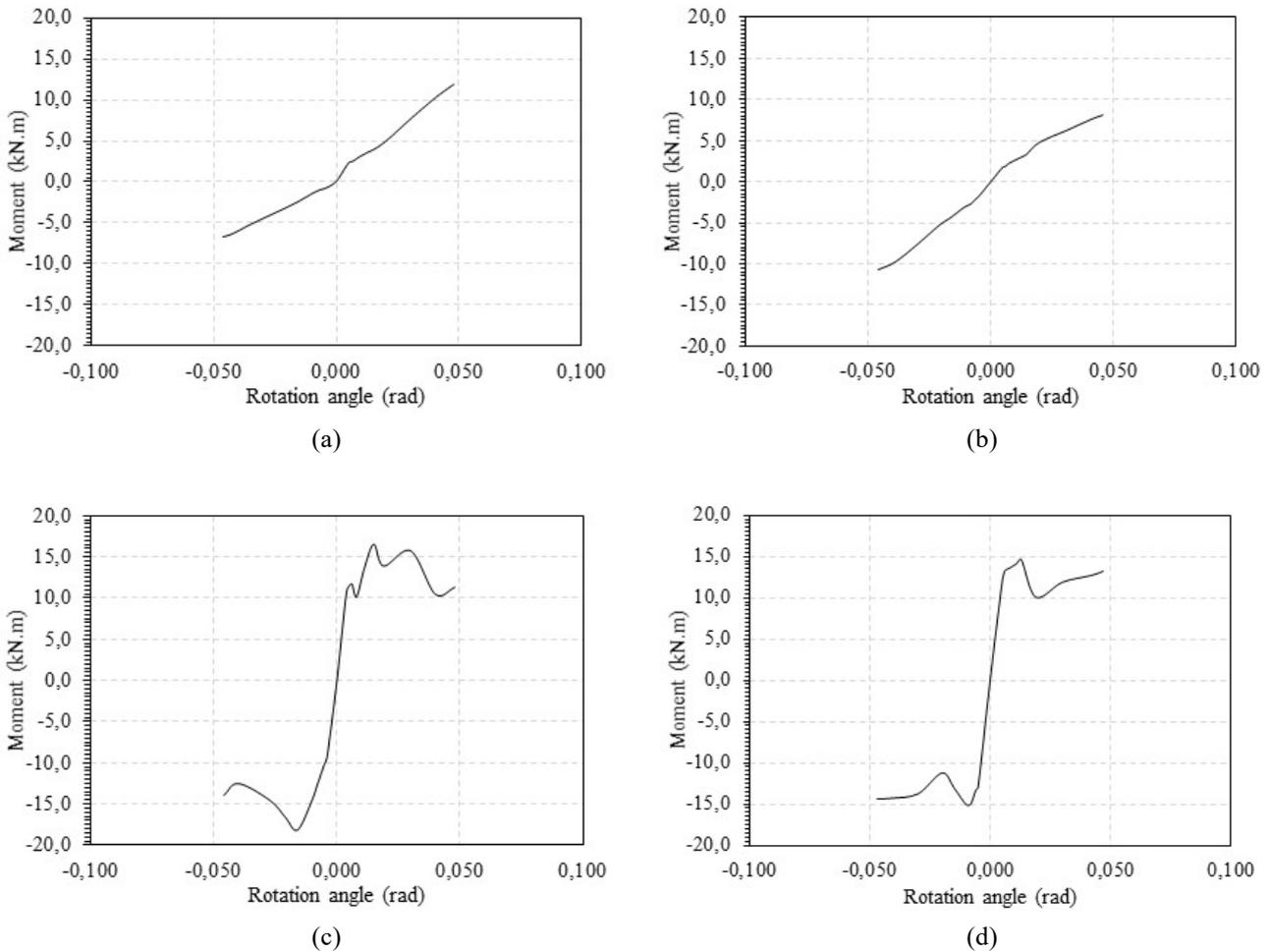


(b)



Gambar 10. Kurva histeretis dari spesimen a) portal *open frame*, b) portal kalsiplank, c) portal *GRC board*, d) portal *GRC board* dan kalsiplank

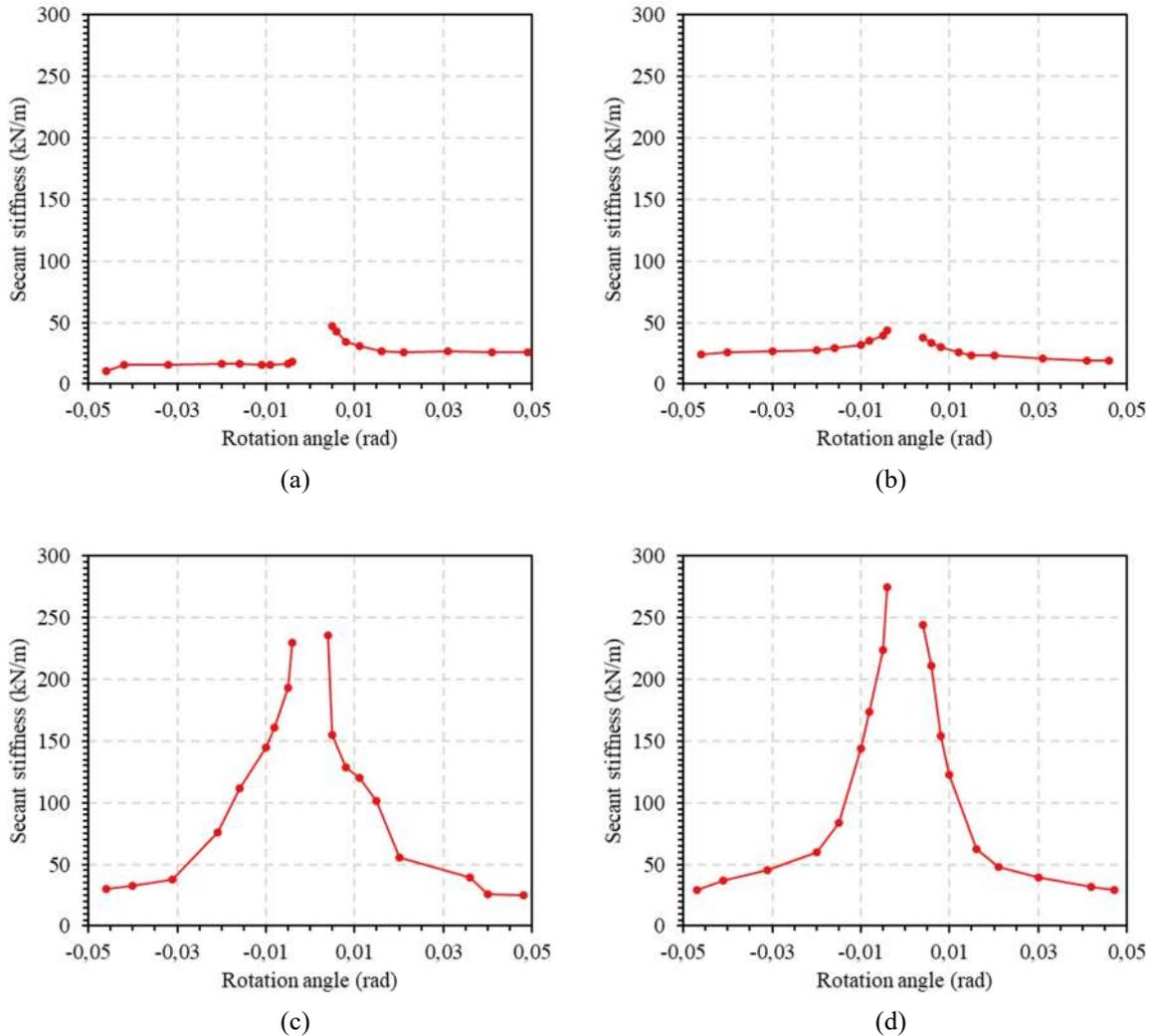
Gambar 11 membandingkan *skeleton curves* dari keempat spesimen. Pada awalnya, kurva momen-rotasi untuk KPM-1, KPM-2, KPM-3 dan KPM-4 menunjukkan pola yang tidak sama. Ketika keempat spesimen mencapai sudut rotasi 0,01 rad, perbedaan pengisi dinding mulai mempengaruhi kapasitas momennya. Dibandingkan dengan KPM-1 tanpa dinding, kapasitas momen luluh saat dibebani beban dorong (tekan) KPM-4 mencapai 14,60 kNm dan 15,01 kNm saat dibebani beban tarik, sedangkan KPM-1 saat dibebani beban dorong (tekan) mencapai 11,83 kNm dan 6,72 kNm saat dibebani beban tarik. Oleh karena itu, KPM-4 dengan pengisi dinding *GRC board* dan kalsiplank menunjukkan leleh dan kapasitas momen ultimit yang lebih tinggi dibandingkan KPM-1 tanpa dinding. Namun ketika keempat spesimen mencapai sudut rotasi 0,04 rad atau akhir pengujian pembebanan siklik penuh, kurva momen-rotasi untuk KPM-2, KPM-3, KPM-4 memiliki tren nilai moment maksimum yang cenderung menuju ke nilai yang sama dengan KPM-1, dikarenakan pengisi dinding yang sudah retak atau pecah sehingga menyebabkan KPM-2, KPM-3, dan KPM-4 seperti portal tanpa pengisi dinding. Kemudian KPM-2, KPM-3, dan KPM-4 akan memiliki kurva momen-rotasi yang sama dengan KPM-1.



Gambar 11 Skeleton curves spesimen, a) portal *open frame*, b) portal kalsiplank, c) portal GRC board, d) portal GRC board dan kalsiplank *Skeleton Curves*

3.1.2 Evaluasi kekakuan

Hasil yang diperoleh dari penerapan pengisi dinding yang berbeda pada spesimen menunjukkan bahwa pengisi dinding memiliki dampak penting pada kekakuan spesimen. Tabel 3 merangkum hasil analisis. Membandingkan spesimen KPM-1 tanpa pengisi dinding dengan spesimen KPM-2, KPM-3 dan KPM-4 dengan pengisi dinding GRC board dan kalsiplank, kekakuan eksperimental KPM-2, KPM-3 dan KPM-4 lebih tinggi dibandingkan KPM-1, dengan nilai kekakuan 244,49 kN/m pada sudut rotasi 0,04 saat dibebani beban dorong (tekan) dan 274,43 kN/m pada sudut rotasi 0,04 saat dibebani beban tarik. Selain itu, rasio kekakuan menunjukkan bahwa KPM-4 dengan GRC board dan kalsiplank memiliki rasio rata-rata yang lebih tinggi daripada spesimen KPM-1 tanpa dinding, dengan nilai KPM-4 adalah 1,2 dan KPM-1 adalah 0,181. Gambar 12 menggambarkan bahwa degradasi kekakuan spesimen menunjukkan tren yang sama. Kurva kekakuan berbentuk lengkung, Dimana kekakuan menurun secara linier di awal, membentuk kurva pada sudut rotasi tertentu. Meskipun demikian, kekakuan antara arah positif dan negatif pada awal fase linier memiliki nilai yang berbeda pada keempat spesimen.



Gambar 12 Degradasi kekakuan spesimen a) portal *open frame*, b) portal kalsiplank, c) portal *GRC board*, d) portal *GRC board* dan kalsiplank

3.1.3 Kinerja daktilitas

Koefisien daktilitas rotasi KPM-1, KPM-2, KPM-3 dan KPM-4 berturut turut adalah 1,02, 1,19, 4,78 hingga 6,64. Berdasarkan Tabel 5, KPM-4 menunjukkan koefisien daktilitas yang jauh lebih tinggi daripada KPM-1, KPM-2, dan KPM-3, dengan koefisien daktilitas 6,64 saat dibebani beban dorong (tekan) dan 2,14 saat dibebani beban tarik pada KPM-4, sedangkan KPM-1 dengan koefisien daktilitas 1,02 saat dibebani beban dorong (tekan) dan 1,08 saat dibebani beban tarik, KPM-2 dengan koefisien daktilitas 1,19 saat dibebani beban dorong (tekan) dan 1,12 saat dibebani beban tarik dan KPM-3 dengan koefisien daktilitas 4,78 saat dibebani beban dorong (tekan) dan 2,08 saat dibebani beban tarik.

3.1.4 Disipasi energi

Gambar 13 menunjukkan bahwa kemampuan disipasi energi gempa pada spesimen KPM-4 lebih tinggi dibandingkan dengan KPM-1, KPM-2 dan KPM-3. Perbedaan ini muncul ketika spesimen joint mencapai sudut rotasi 0,01 rad. Kemudian kapasitas disipasi energi meningkat secara bertahap seiring dengan bertambahnya sudut rotasi, KPM-4 juga dapat menghasilkan kekakuan yang lebih besar daripada KPM-1, KPM-2 dan KPM-3, besarnya kemampuan disipasi energi KPM-4 karena pengaruh adanya pengisi dinding *GRC board* dan kalsiplank, sehingga menghasilkan kapasitas disipasi energi yang lebih tinggi. Kapasitas disipasi energi menurun ketika sudut rotasi mencapai 0,04 dan berakhir pada sudut rotasi 0,046 rad karena terbatasnya panjang batang piston *actuator*.

Namun berdasarkan kondisi di atas, KPM-2 memiliki koefisien redaman viskos ekuivalen yang lebih tinggi dan berfluktuasi dibandingkan KPM-1, KPM-3, dan KPM-4, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 13. Keempat

spesimen memiliki tren yang berbeda, KPM-3 dan KPM-4 mengalami peningkatan koefisien redaman viskos ekuivalen di awal hingga sudut rotasi mencapai 0,015 rad. Ketika sudut rotasi mencapai 0,03 rad, nilai koefisien redaman viskos ekuivalen spesimen KPM-3 dan KPM-4 mulai mengalami penurunan hingga akhir proses pembebanan. Sebaliknya, spesimen KPM-1 dan KPM-2 cenderung menghasilkan koefisien redaman viskos ekuivalen yang menurun seiring dengan bertambahnya sudut rotasi.

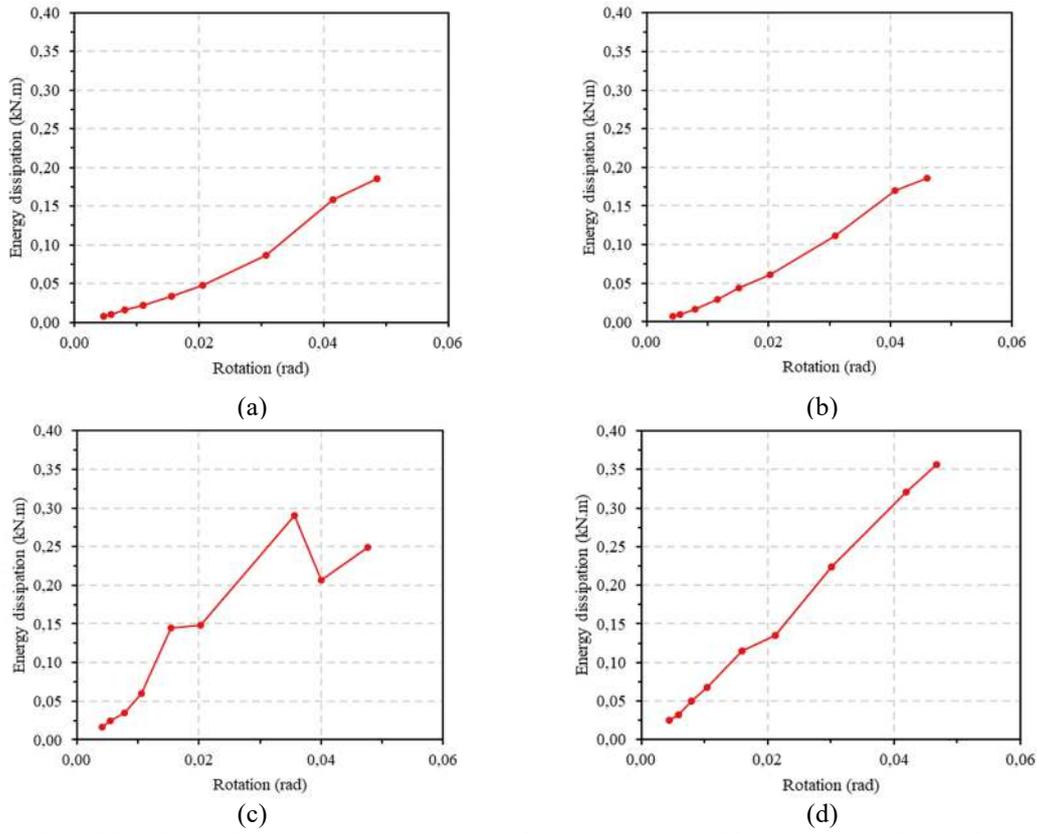
Tabel 3. Kekakuan spesimen

Spesimen	Arah beban	P_y (kN)	P_u (kN)	Δ_y (mm)	Δ_u (mm)	$K_{e,exp}$ (kN/m)	$K_{r,theo}$ (kN/m)	$K_{e,exp} / K_{e,exp}$
KPM-1	Tekan (+)	3,88	3,94	142,30	145,43	27,25	118,36	0,230
	Tarik (-)	2,20	2,24	134,98	138,85	16,30	118,36	0,138
KPM-2	Tekan (+)	2,46	2,72	117,5	137,92	21,01	118,36	0,178
	Tarik (-)	3,33	3,56	123,82	138,65	26,92	118,36	0,227
KPM-3	Tekan (+)	5,10	5,51	39,02	43,86	144,90	118,36	1,224
	Tarik (-)	4,81	6,03	66,67	138,80	72,19	118,36	0,610
KPM-4	Tekan (+)	4,53	4,87	21,36	40,42	211,87	118,36	1,790
	Tarik (-)	4,79	5,00	66,30	141,74	72,24	118,36	0,610

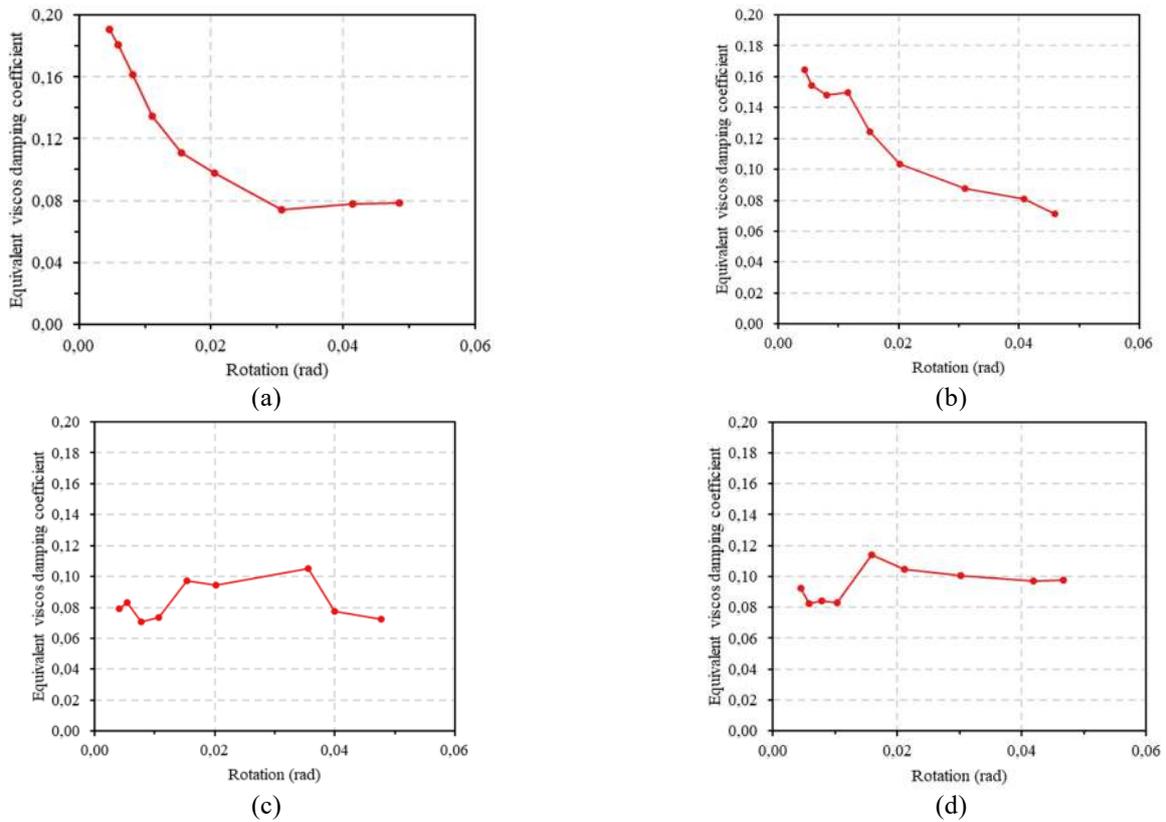
P_y merupakan beban leleh, P_u merupakan beban ultimate, Δ_y merupakan *yield displacement*, Δ_u merupakan *ultimate displacement*, $K_{e,exp}$ merupakan kekakuan eksperimental, $K_{r,theo}$ merupakan kekakuan teoritis.

Tabel 4. Koefisien daktilitas

Spesimen	Arah beban	θ_y (rad)	θ_u (rad)	μ
KPM-1	Tekan (+)	0,047	0,048	1,02
	Tarik (-)	0,045	0,048	1,08
KPM-2	Tekan (+)	0,039	0,046	1,19
	Tarik (-)	0,041	0,046	1,12
KPM-3	Tekan (+)	0,010	0,047	4,78
	Tarik (-)	0,022	0,046	2,08
KPM-4	Tekan (+)	0,007	0,047	6,64
	Tarik (-)	0,022	0,047	2,14



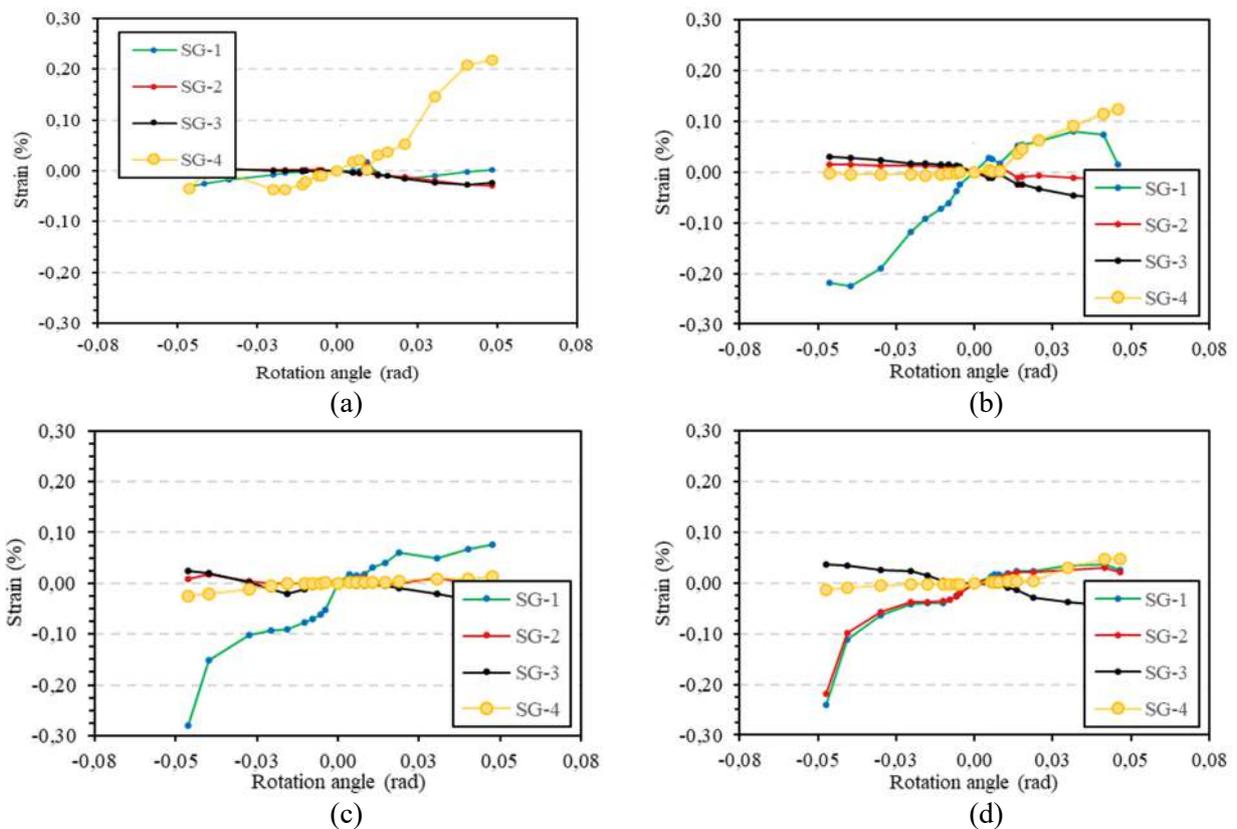
Gambar 13. Kapasitas disipasi energi spesimen, a) portal *open frame*, b) portal kalsiplank, c) portal *GRC board*, d) portal *GRC board dan kalsiplank*



Gambar 14. Koefisien redaman viskos ekuivalen spesimen, a) portal *open frame*, b) portal kalsiplank, c) portal *GRC board*, d) portal *GRC board dan kalsiplank*

3.1.5 Analisis regangan

Gambar 15 menggambarkan kurva regangan dari alat pengukur regangan SG-1, SG-2, SG-3, dan SG-4 pada spesimen KPM-1, KPM-2, KPM-3 dan KPM-4 di bawah pembebanan siklik. Jelas terlihat bahwa SG-1 dan SG-2 spesimen KPM-4 mencapai regangan leleh, sedangkan SG-3 dan SG-4 tetap berada dalam rentang elastis selama pembebanan siklik. Pada KPM-3 dan KPM-2 terlihat bahwa SG-1 spesimen KPM-3 dan KPM-2 mencapai regangan leleh, sedangkan SG-1, SG-2 dan SG-3 tetap berada dalam rentang elastis selama pembebanan siklik. Pada KPM-1 terlihat bahwa SG-4 mencapai regangan leleh pada sudut rotasi 0,03 rad, dengan nilai regangan yang sesuai sebesar 0,14%. Pada KPM-2, SG-1 dan SG-2 mencapai regangan leleh pada sudut rotasi -0,04 rad, dengan nilai regangan yang sesuai sebesar 0,099%. Pengamatan ini konsisten dengan pengamatan selama eksperimen, dimana KPM-1 menunjukkan patah las pada pocket atau sambungan, pada saat yang sama, kolom mengalami cabut dan balok mendesak sambungan atau pocket pada saat dibebani beban dorong (tekan), sedangkan KPM-2 menunjukkan patah las pada pocket atau sambungan, pada saat yang sama, kolom dan balok tetap tidak mengalami kerusakan.



Gambar 15. Regangan saat pembebanan siklik, a) portal *open frame*, b) portal kalsiplank, c) portal *GRC board*, d) portal *GRC board* dan kalsiplank

3.1.6 Tipe kegagalan

Tipe kegagalan yang diamati pada spesimen memberikan pemahaman yang rinci tentang perilaku portal akibat pembebanan siklik. Gambar 16 memperlihatkan tipe kegagalan KPM-1, KPM-2, KPM-3 dan KPM-4 setelah mengalami pembebanan siklik penuh. Pada KPM-1, ketika sudut rotasi pembebanan sebesar 0,048 rad pada arah tekan dan 0,046 rad pada arah tarik, terjadi cabut pada kolom dari selongsong sambungan dan patah las pada sambungan. Pada KPM-2 hampir tidak terjadi kerusakan pada pengisi dinding kalsiplank, namun beberapa ketika sudut rotasi pembebanan mencapai 0,046 rad pada arah tarik terjadi angkat pada ujung sambungan. Pada KPM-3, ketika sudut rotasi pembebanan sebesar 0,01 rad pada arah tekan mulai terlihat adanya *GRC board* yang pecah pada area sekrup *GRC board*, dan *GRC board* lepas dari rangka partisi saat sudut rotasi pembebanan sebesar 0,03 rad pada arah tekan. Sedangkan pada KPM-4, terlihat adanya *GRC board* yang pecah pada area sekrup *GRC board* pada saat sudut rotasi pembebanan sebesar 0,015 rad dan *GRC board* lepas dari rangka partisi saat sudut rotasi pembebanan sebesar 0,042 rad pada arah tekan. Kalsiplank pada KPM-4 tidak mengalami kerusakan.



(a) KPM-1



(b) KPM-1



(c) KPM-1



(d) KPM-1



(e) KPM-2



(f) KPM-2



(g) KPM-2



(h) KPM-2



(i) KPM-3



(j) KPM-3



(k) KPM-3



(l) KPM-3



(m) KPM-4



(n) KPM-4



(o) KPM-4



(p) KPM-4

Gambar 16 Tipe kegagalan portal dengan sambungan KPM

3.1.7 Pengaruh pengisi dinding

Spesimen menggunakan *GRC board* dan kalsiplank sebagai pengisi dinding menunjukkan bentuk kurva histeresis yang fluktuatif dan tampak lebih lebar dibandingkan dengan portal tanpa dinding yang kurvanya tampak langsing,

yang berarti portal tanpa dinding memiliki kekuatan, kekakuan yang lebih rendah dibandingkan dengan portal dengan pengisi dinding, dibuktikan dengan kondisi ultimit KPM-3 dan KPM-4 yang lebih besar seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10 Adanya kekangan dari rangka partisi dan pengisi dinding pada portal mempengaruhi koefisien daktilitas dari portal, pada Tabel 4 menunjukkan bahwa nilai koefisien daktilitas portal dengan pengisi dinding memiliki nilai koefisien yang lebih tinggi dibandingkan dengan portal tanpa pengisi dinding. Namun portal tanpa pengisi dinding memiliki nilai koefisien redaman viskos ekuivalen yang lebih tinggi dibandingkan dengan portal dengan pengisi dinding, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 14, dikarenakan portal dengan pengisi dinding pada saat awal sudut rotasi pembebanan secara efektif belum dapat terlihat jika dibandingkan dengan portal tanpa dinding dengan batasan perpindahan maksimum 150 mm, yang mana sejak awal dimulainya pembebanan sambungan pada portal tanpa dinding bekerja lebih ekstra daripada sambungan pada portal dengan pengisi dinding dikarenakan efek kekangan partisi dan kekakuan dari pengisi dinding. Secara keseluruhan, portal dengan pengisi dinding memiliki nilai perbandingan kondisi ultimit sebesar 1,5 kali lebih besar jika dibandingkan dengan portal tanpa dinding, dan portal dengan pengisi dinding memiliki kinerja daktilitas 6 kali lebih besar dibandingkan dengan portal tanpa dinding.

4 KESIMPULAN

Penelitian ini mengusulkan KPM sebagai sistem sambungan balok-kolom yang digunakan untuk rumah instan struktur baja. KPM menghilangkan kebutuhan pengelasan di tempat dengan memanfaatkan sistem sambungan *plug and play* antara balok-kolom dan sambungan, diikuti dengan mekanisme penjepitan yang diakibatkan oleh baut yang telah dimuat sebelumnya dan penambahan pengisi dinding menggunakan *GRC board* dan kalsiplank sebagai partisi dari portal. Temuan utama dari penelitian ini dapat diringkas sebagai berikut:

1. KPM pada portal menunjukkan kapasitas lateral portal tertinggi dimiliki KPM-3 portal dengan pengisi dinding *GRC board* nilai kondisi ultimit KPM-3 saat dibebani arah tekan 5,51 kN dengan simpangan 39,02 mm dan saat dibebani arah tarik 6,03 kN dengan simpangan 66,67 mm. Kemudian diikuti oleh KPM-4 dengan nilai kondisi ultimit saat dibebani arah tekan 4,87 kN dengan simpangan 21,36 mm dan saat dibebani arah tarik 5,00 kN dengan simpangan 66,30 mm.
2. Kapasitas drift rasio KPM pada portal maksimum dalam penelitian ini adalah sebesar 4,85% pada KPM-1 tanpa pengisi dinding saat dibebani arah tekan, kemudian diikuti oleh KPM-3 dengan pengisi *GRC board* 4,77% saat dibebani arah tekan. Hal ini dipengaruhi dengan nilai *displacement* saat pengujian berlangsung.
3. Penambahan pengisi dinding berupa *GRC board* dan kalsiplank pada portal sangat mempengaruhi kinerja KPM. Khususnya dengan penambahan *GRC board* dan kalsiplank KPM-4 yang memiliki kekakuan lebih besar sehingga memiliki kinerja daktilitas yang paling efisien dibandingkan dengan KPM-1, KPM-2, dan KPM-3. Dengan nilai koefisien daktilitas saat dibebani tekan 6,64 dan saat dibebani tarik 2,14.
4. KPM menunjukkan koefisien redaman viskos ekuivalen tertinggi dimiliki KPM-1 portal tanpa dinding dengan nilai koefisien 0,191 yang kemudian diikuti oleh KPM-2 dengan kalsiplank 0,165.
5. Kegagalan yang terjadi pada portal dengan sambungan KPM disebabkan oleh patah las pada bagian sambungan untuk KPM-1, pada KPM-2 ujung sambungan terangkat, pada KPM-3 pengisi dinding *GRC board* mulai mengalami retak dan pecah saat sudut rotasi pembebanan 0,1 rad, sedangkan pada KPM-4 saat sudut rotasi pembebanan 0,15 rad.
6. Secara keseluruhan, portal dengan pengisi dinding memiliki nilai perbandingan kondisi ultimit sebesar 1,5 kali lebih besar jika dibandingkan dengan portal tanpa dinding, dan portal dengan pengisi dinding memiliki kinerja daktilitas 6 kali lebih efisien dibandingkan dengan portal tanpa dinding. Penambahan pengisi dinding secara efektif mencegah kegagalan getas dan sangat mengurangi kerusakan pada sistem sambungan.

REFERENSI

- AISC 341, 2016. Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, AISC 341-16. American Institute of Steel Construction, Chicago.
- Balaka, R., Aksar, P. & Mahrun, 2016. Analisa Mampu Redam Suara Pada Material Komposit Kalsiboard dan Gypsum. Jurnal Ilmiah Mahasiswa Teknik Mesin, Mei, Volume 1, pp. 39-43.
- Bazarchi, E., Davaran, A., Lamarche, C.P., Roy, N., Parent, S., 2023. Experimental and numerical investigation of a novel vertically unconstrained steel inter-modular connection. *Thin-Walled Struct.* 183, 110364. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.110364>
- Budynas, R.G., Nisbett, J.K., 2015. Shigley's Mechanical Engineering Design, Tenth Edition. ed. McGraw-Hill Education, New York.

- Chen, Z., Liu, J., Yu, Y., Zhou, C., Yan, R., 2017. Experimental study of an innovative modular steel building connection. *J. Constr. Steel Res.* 139, 69–82. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.09.008>
- Desivyana, N.M.N., Saputra, A., 2019. Analisis dan evaluasi struktur baja untuk sekolah dasar pada masa rekonstruksi pasca bencana alam. Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Fajar, A.S., Saputra, A., Satyarno, I., Himawan, L., 2022. Investigation of Fast Connection (Clamped Pocket Mechanics) for Modular Instant Steel House with Finite Element Analysis: Back to Build Post-disaster, in: Belayutham, S., Che Ibrahim, C.K.I., Alisibramulisi, A., Mansor, H., Billah, M. (Eds.), *Proceedings of the 5th International Conference on Sustainable Civil Engineering Structures and Construction Materials, Lecture Notes in Civil Engineering*. Springer Singapore, Singapore, pp. 767–785. https://doi.org/10.1007/978-981-16-7924-7_50
- Nadeem, G., Safiee, N.A., Bakar, N.A., Karim, I.A., Nasir, N.A.M., 2021b. Connection design in modular steel construction: A review. *Structures* 33, 3239–3256. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.06.060>
- Maidiawati, Sanada, Y., Konishi, D., Tanjung, J., 2011. Seismic performance of nonstructural brick walls used in Indonesian R/C buildings. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 10(1), 203–210. <https://doi.org/10.3130/jaabe.10.203>
- Powell, G., 2010. *Modelling for Structural Analysis*. Computer and Structure.
- Shah, S. P., Ludirdja, D., Daniel, J. I. & Mobasher, B., 1988. Toughness-Durability of Glass Fiber Reinforced Concrete Systems. *ACI Materials Journal*, September-Oktober.p. 352.
- Sutrisno, W., Satyarno, I., Awaludin, A., Saputra, A., Setiawan, A.F., 2022. Seismic Performance of Instant Steel Frame House for Post Earthquake Reconstruction, in: Belayutham, S., Che Ibrahim, C.K.I., Alisibramulisi, A., Mansor, H., Billah, M. (Eds.), *Proceedings of the 5th International Conference on Sustainable Civil Engineering Structures and Construction Materials, Lecture Notes in Civil Engineering*. Springer, Singapore, pp. 81–97. https://doi.org/10.1007/978-981-16-7924-7_6
- Wuryanti, W., 2008. Perilaku rangka struktur baja konstruksi bangunan sederhana terhadap uji monotonik simulasi beban gempa. *Jurnal pemukiman* vol. 3 no. 4
- Zhang, G., Xu, L.-H., Li, Z.-X., 2022a. Experimental evaluation on seismic performance of a novel plug-in modular steel structure connection system. *Eng. Struct.* 273, 115099. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.115099>
- Zovkic, J., Sigmund, V., Gulkas, I., 2012. Cyclic Testing of a Single Bay Reinforced Concrete Frames with Various Types of Masonry Infill. <https://doi.org/10.1002/eqe.2263>