

Kinerja dinding panel komposit beton ringan kalsiboard – mortar styrofoam akibat beban lateral siklik

Rudy Djamaluddin¹, Fatriady MR^{2,*}

¹Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, Makassar, Indonesia

²Teknik Pengairan, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah, Makassar, Indonesia

Article Info

Available online

Keywords:

Panel sandwich
Cyclic testing
Earthquake
House

Abstract

Precast Material Composite Panel Kalsiboard-Styrofoam is a lightweight concrete construction that utilizes recycled industrial waste. The low compressive strength of styrofoam material, obtains more strength and stiffness in the sandwich composite system with a layer of kalsiboard skin. Cyclic testing has been carried out based on ASTM E1216 in this study. The stability of the panel wall on the precast sloof with a notch and bolt system on the clamping seat engineering is able to increase the elastic behavior, stiffness and durability of the wall system that behaves swaying receiving cyclic horizontal forces without wall collapse. In this study, the LCP 1 test specimen which utilizes the production of panels for floors that have an additional layer in the form of wiremesh obtained the best strength, tenacity and performance in full-scale testing for the concept of earthquake-resistant simple house walls. This engineering is a new innovation for simple earthquake-resistant house walls to minimize building damage that causes casualties that offers strength, short processing time and minimizes the need for labor in narrow workspace conditions and complicated reach in handling earthquake disaster victims.

Corresponding Author:

Fatriady MR
fatriadyadhy@gmail.com

Copyright © 2025 Universitas Islam Indonesia
All rights reserved

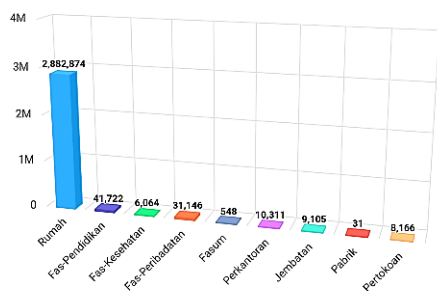
Pendahuluan

Indonesia secara geografis berada pada pertemuan lempeng Eurasia dan lempeng Indo-Asutralia serta lempeng pacific tentu akan terdampak pada pergerakan lempeng tektonik yang menjadi penyebab utama terjadinya gempa.

Statistik menunjukkan kerusakan infrastruktur bangunan dan 10.010 jiwa tewas adalah dampak dari musibah gempa bumi Yogyakarta (2006), Palu (2018), dan Mamuju (2024) menjadi potret permasalahan kesiapan kita menghadapi bencana.

Konferensi Dunia PBB di Sendai, Jepang pada tanggal 8 maret 2015 telah meresmikan Kerangka Kerja Sendai (SFDRR) untuk pengurangan Risiko Bencana tahun 2015 – 2030 yang menekankan pada manajemen risiko bencana. Salah satu starteginya adalah perlu kesiapsiagaan bencana yang efektif untuk membangun lebih baik.

Badan Nasional Penanggulangan Bencana menunjukkan data kerusakan infrastruktur akibat bencana seperti gambar 1. Rumah adalah infrastruktur yang paling banyak mengalami kerusakan hingga jumlah ratusan kali lipat dibandingkan infrastruktur lain dan menyebabkan korban jiwa.



Gambar 1 Data kerusakan infrastruktur akibat bencana Indonesia (Sumber : <https://dibi.bnpp.go.id/gbencana2>)

Studi seismik oleh Alarcon, et al, (2014) menunjukkan bahwa pengekanan beton yang buruk menjadi salah satu alasan utama kerusakan gempa yang serius. Sifat material berat dan getas menemukan masalah pada retakan akibat suhu dan keruntuhan akibat getaran, proses produksi membutuhkan banyak energi, pratek pekerjaan permanen dan pembongkaran harus merusak seluruh bangunan.

Amerika Utara dan Eropa dikembangkan rekayasa konstruksi bangunan tahan gempa dengan material beton ringan. Resistensi geser pada konektor bagian bawah dinding menjadi kekuatan terhadap resistensi lateral, sehingga mereka melakukan perkuatan atau menahan pada sudut-sudut dinding terhadap reaksi angkat akibat momen gaya lateral (Ceccotti, 2008; Dujic et al., 2010; Follesa et al., 2013; Izzi et al., 2018)

Penelitian oleh Fernando, et al, (2017) merekomendasikan aplikasi beton ringan yang kuat terbuat dari bahan polystyrene yang dikombinasikan dengan lembaran kulit yang kaku sebagai material sturktural maupun non struktural. Rekayasa ini juga diperoleh peningkatan modulus elastisitas dari material sandwich seperti yang diperoleh pada penelitian Rudy Djamaluddin et al., (2021).

Rangkaian konstruksinya material pracetak membutuhkan inovasi desain dan detail sambungan yang tepat untuk mendukung kekuatan, kekakuan, durability, kapasitas deformasi dan disipasi energi terhadap

beban gempa (Brunesi, et al, 2020; Simbolon¹ et al., 2019; Simbolon et al., 2020).

Pemanfaatan material lokal dan daur ulang limbah industri di Indonesia telah berkembang dan teraplikasi langsung di lapangan dalam program pembangunan rumah cepat dan penanggulangan bencana. Salah satunya, produksi panel pracetak beton ringan kombinasi styrofoam dan kalsiboard (sandwich quipanel) dengan berat jenis $\pm 700 \text{ kg/m}^3$ memiliki dimensi panel $3000 \times 600 \text{ mm}$ dengan tebal panel 75 mm untuk konstruksi lantai dan 50 mm untuk konstruksi dinding.

Hasil peneltian Irmawaty, R. et al, (2014); Yasser et.al. (2013) menyatakan bahwa penggunaan Styrofoam mengefisiensikan eksplorasi bahan alam yang terbatas serta mengurangi berat struktur, memiliki nilai fleksibilitas yang lebih, dan meminimalisir retakan.

Perkembangan teknologi beton ringan membutuhkan kajian eksperimental, sehingga penelitian ini dilaksanakan untuk rekayasa material pracetak quipanel dengan model perkuatan terhadap sistem sambungan dalam konstruksi dinding terfokus pada hubungan dinding dengan lantai/sloof untuk mempelajari perilaku dinding quipanel untuk konsep rumah sederhana tahan gempa.

Metodologi Penelitian

Prinsip desain struktur sandwich berupa panel komposit memiliki dua lapisan yang keras berupa kalsiboard sebagai lapis kulit menyatu dengan lapis inti berupa mortar styrofoam. Ketebalan lapis inti lebih besar dibandingkan dengan total lapisan panel komposit dengan muatan ringan sehingga tercipta panel komposit dengan rasio kekuatan terhadap berat dan kekakuan terhadap berat lebih tinggi (Kardomateas and Carlsson, 2001; Way et al., 2016) serta menghasilkan nilai ekonomis dan hemat energi (Seeber et al., 1997).

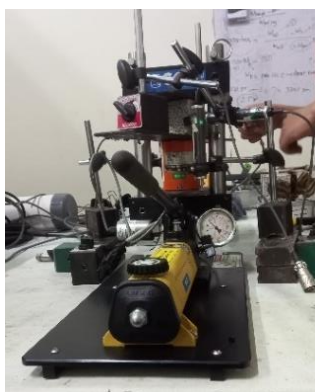
Uji Mekanik Material

Penyiapan pengujian diawali dengan uji mekanikal terhadap material quipanel. Sejumlah sampel uji diperoleh dari sampel kubus dan balok uji yang diperoleh dari hasil pecahan unit panel yang ada.



Gambar 2 Penyiapan sampel uji

Pengujian mekanikal yang dilakukan adalah kuat tekan (Compression Test) dengan menggunakan data logger berdasarkan SNI 03-1974-1990. Begitu juga dengan kapasitas defleksi akibat lentur material di uji bending untuk memperoleh kapasitas lentur berdasarkan ASTM 2015. Selanjutnya, dilakukan uji kompresi uniaxial terhadap inovasi konektor berupa baja ulir dan lem PV Ac pada quipanel untuk mengetahui kapasitas geser material.



Gambar 3 Pengujian kuat tekan material



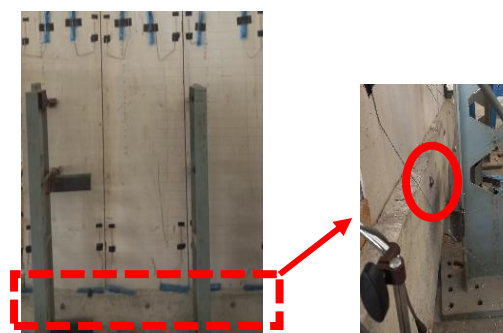
Gambar 4 Pengujian lentur material



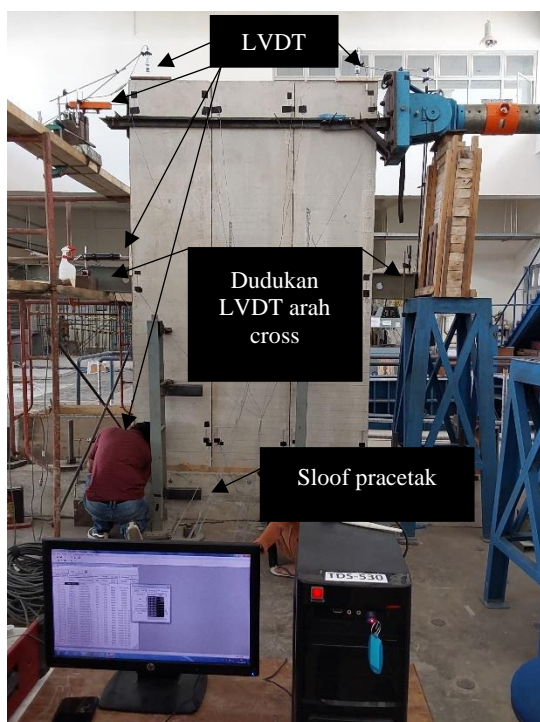
Gambar 5 Pengujian geser langsung

Setting Up Pengujian

Penelitian ini merangkai unit quipanel sebanyak 3 buah di atas sloof pracetak yang memiliki takikan sedalam 100 mm sebagai dudukan dinding yang dikunci dengan baut pada masing-masing unit panel. Konsep sambungan jepit dimaksudkan optimalisasi distribusi tegangan dinding terhadap sloof yang dapat memberi kekuatan tambahan dan bisa mencegah retak dan kegagalan pada dinding seperti pada gambar 6.



Gambar 6 Model dudukan dinding pada takikan ditambahkan baut pengunci



Gambar 10 setting up model pengujian

Ketiga rangkaian model uji dirangkai dengan 8 buah LVDT dengan ketelitian 0,01 mm yang terhubung pada data logger untuk mengukur besarnya displacement, uplift, dan deformasi. Gambar 10 memperlihatkan setting up model uji yang dilaksanakan di laboratorium. Peralatan uji loading frame, load cell, crane, hydraulic jack kapasitas 50 ton, data logger, dan computer dirangkai di atas rigid floor pada Laboratorium Struktur dan Material Departemen Teknik Sipil Universitas Hasanuddin. Pengujian gaya lateral siklik dilakukan pada 3 model pengujian rangkaian LCP (Lightweight Concrete Panels) yang memiliki dimensi 3000x1800 mm pada total rangkaian specimen uji. LCP 1 terdiri atas panel pracetak berdimensi 3000x600x75 mm merupakan produksi quipanel untuk lantai memiliki lapis tambahan wiremesh didudukkan di atas sloof pracetak sebagai model uji kontrol yang terangkai normal antar unit panel. LCP 2 terdiri atas panel pracetak berdimensi 3000x600x75 mm adalah rangkaian panel dinding dengan penambahan baja ulir D 10 mm sebagai konektor antar panel berjarak 20 cm dan

penambahan lapis perekat berupa lem PV Ac (Lem Fox).

Sementara LCP 3 terdiri atas panel pracetak berdimensi 3000x600x50 mm merupakan produksi quipanel untuk dinding tanpa lapis wiremesh adalah rangkaian panel dinding dengan tambahan lem perekat PV Ac (tanpa konektor baja).

Hasil dan Pembahasan

Uji mekanikal

Tipikal specimen uji pada pengujian kuat tekan yang dilakukan ada tiga jenis yaitu PTK (Panel tanpa kulit), PDK 1 (Panel dengan kulit) yaitu arah pembebanan searah kulit sistem quipanel dan PDK 2 yaitu arah pembebanan tegak lurus lapis kulit. Adapun hasil uji diperoleh :

Tabel 2 hasil uji kuat tekan

Benda Uji	Kuat tekan	Regangan
PTK a	2,15	0,03
PTK b	2,11	0,02
PTK c	2,16	0,03
PDK 1a	2,43	0,03
PDK 1b	3,04	0,02
PDK 1c	2,76	0,03
PDK 2a	3,58	0,03
PDK 2b	3,81	0,03
PDK 2c	3,02	0,03

Uji lentur dilakukan memperoleh rekapitulasi uji lentur pada tabel 3. Dua model pengujian lentur yang ada masing-masing sisi tekan adalah lapis kulit (K) dan sisi tekan adalah lapis inti (I). Hasil pegujian menunjukkan kuat lentur terbesar pada model specimen beban lentur pada lapis kulit, perilaku gagal retak geser dan keutuhan panel komposit ulet hingga terjadi gagal.

Perilaku goyangan rangkaian quipanel yang menerima beban lateral sesuai siklus pembebanan rencana terkontrol pada besaran displacement pada komputer pengujian.

Tabel 3 hasil uji lentur

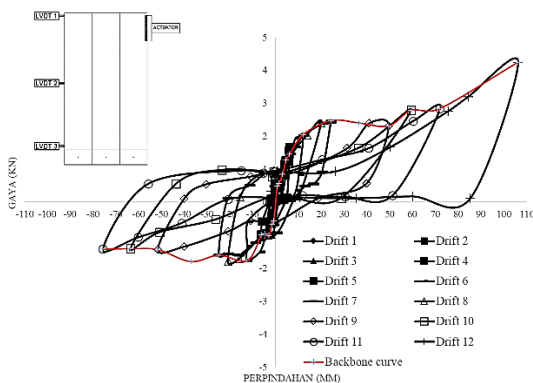
Kode	Beban Maks. (N)	Kuat Lentur (MPa)
2K	2700	2,06
3K	1200	2,88
4K	1150	2,76
1I	950	0,72
2I	1350	1,03
3I	600	1,44
4I	500	1,20

Uji Siklik

Perpindahan horisontal

Hasil uji diperoleh data pembacaan semua rangkaian LVDT. Untuk perilaku goyangan bolak balik analisis data menghasilkan kurva histerisis yang menunjukkan perbandingan antara gaya yang bekerja dengan displacement arah dorong dan arah tarik.

Kurva histerisis LCP 1 menunjukkan terjadi degradasi kekakuan dilihat dari perbedaan perilaku goyangan dinding yang tidak elastis sempurna. Displacement arah dorong linier terhadap peningkatan gaya hingga $P_p = 4,254$ kN, sementara displacement arah tarik terjadi penurunan gaya $P_p = 1,829$ kN.

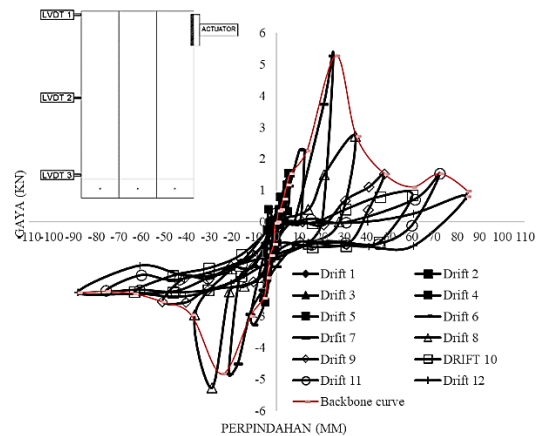


Gambar 11 Kurva histerisis LCP 1

Degradasi kekakuan ini disebabkan terjadinya peralihan perilaku kedudukan dinding dari konsep sistem jepit/rigid menjadi sistem semi-rigid, dimana kondisi

sambungan tidak sepenuhnya kaku seperti pada awal pengujian tetapi juga tidak sepenuhnya fleksibel.

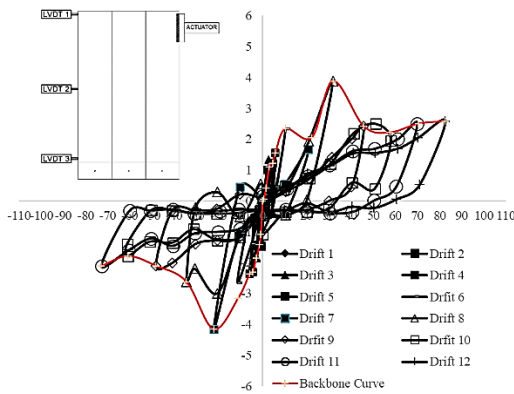
Perilaku semi-rigid diperoleh sambungan dinding dengan sloof dapat mengalami deformasi akibat peningkatan target displacement, namun deformasi yang terjadi pada lubang baut masih dalam batas toleransi karena konstruksi dinding tetap berdiri stabil tanpa terjadinya retakan atau kerusakan runtuh pada dinding dan menjaga integritas bangunan secara keseluruhan. Kontrol capaian displacement maksimal tercapai, bahkan pada kurva histerisis terlihat arah dorong mencapai displacement 140% hingga batas jangkauan alat uji. Masing-masing unit quipanel dalam rangkaian bekerja secara individu memanfaatkan joint sitim yang telah tersedia hasil fabrikasi. Perilaku goyangan terlihat normal pada sambungan antar unit quipanel.



Gambar 12 Kurva histerisis LCP 2

Kurva histerisis LCP 2 dengan penambahan konektor baja ulir dan perekat lem PV Ac menunjukkan peningkatan gaya yang cukup drastis pada drift 40% rencana simpangan maksimal. Pasca beban puncak di sini, selanjutnya perilaku goyangan terjadi penurunan kekuatan yang cukup besar. Pembacaan P_p arah dorong sebesar 5,282 kN dan arah tarik diperoleh $P_p = 4,828$ kN pada drift target displacement 23,84 mm. Menarik diperhatikan pola kurva terlihat lebih elastis, kondisi ini dipengaruhi oleh adanya konektor yang menyebabkan

formasi rangkaian unit panel bekerja pada sistem tunggal sempurna. Penambahan konektor dan perekat lem PV Ac dipeoleh kekakuan pada sistem dinding tunggal. Deformasi akibat gaya lateral terkonsentrasi pada sambungan semi-rigid seperti pada penelitian oleh Gavric et al, (2012, 2015a, 2015b) bahwa terjadi deformasi pada sambungan penahan kaki dinding.



Gambar 13 Kurva histeresis LCP 3

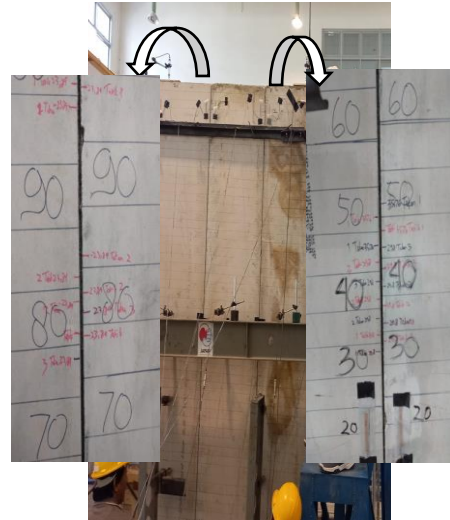
Sementara itu, kurva histeresis LCP 3 berupa rangkaian quipanel tebal 50 mm tanpa wiremesh dengan penambahan perekat lem PV Ac. Gaya dorong mencapai Pp sebesar 3,878 kN pada drift 60%, sementara arah tarik diperoleh Pp sebesar 4,162 kN pada drift 40%. Perilaku goyangan dinding sepenuhnya terjadi simpangan sisa pada saat peralihan arah gaya. Kondisi ini menunjukkan kekakuan pada sistem dinding LCP 3 bergoyang mengikuti arah gaya mencapai target displacement tanpa perlawanan terhadap stabilitas dinding.

Perpindahan vertikal

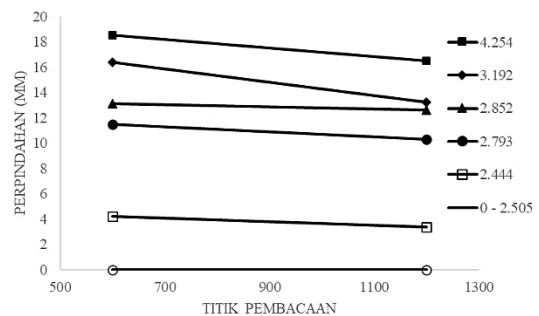
Perilaku goyangan pada dinding berasal dari sambungan dalam perilaku slip (perpindahan horisontal) dan rotasi dinding sehingga terjadi uplift (displacement arah vertikal).

Pengamatan perilaku sambungan antar panel bisa dilakukan secara manual dengan memanfaatkan pengukuran pergeseran garis marking yang telah disiapkan pada

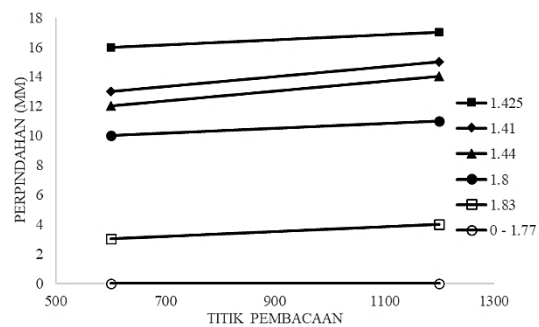
permukaan rangkaian unit panel seperti pada gambar 14.



Gambar 14 Kontrol marking perilaku uplift



(a)



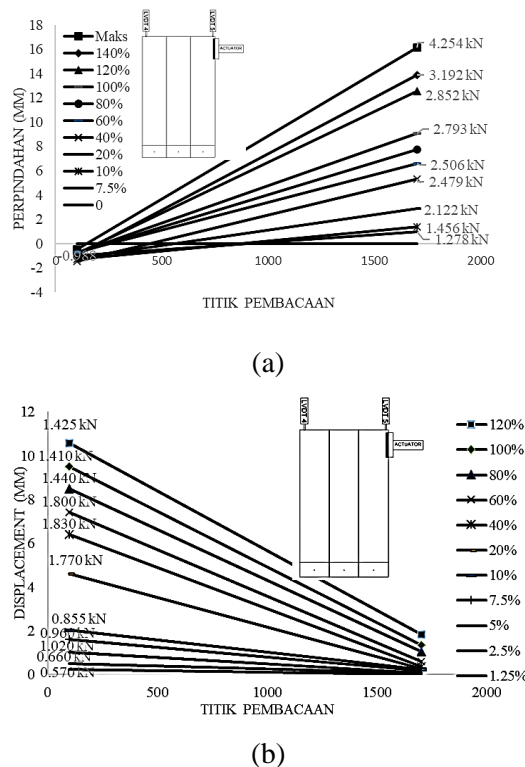
(b)

Gambar 15 Pembacaan nilai uplift pada pertemuan antar unit quipanel (a) arah dorong (b) arah tarik

Pertemuan unit quipanel mencapai nilai pergeseran 18.5 mm arah dorong dan mencapai nilai pergeseran 16.5 mm arah

tarik. Keberadaan joint sitim pada unit quipanel mendukung stabilitas rangkaian panel dinding bergerak secara individu. Reaksi uplift sesuai data pembacaan terlihat pada gambar 15.

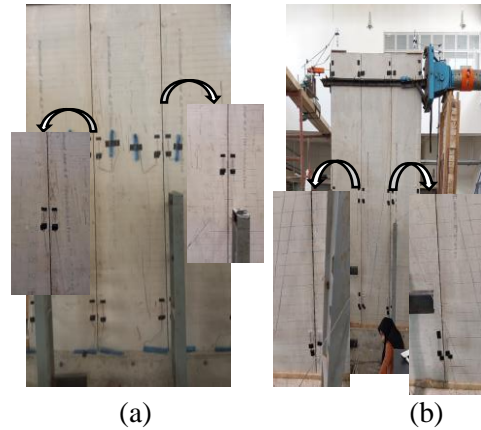
Sementara itu, berdasarkan pembacaan LVDT arah vertikal pada rangkaian pengujian diperoleh nilai maksimal uplift 16 mm arah dorong, sementara arah tarik maksimal 10.5 mm. Menghubungkan pembacaan manual sebelumnya, kondisi ini menunjukkan perilaku goyangan dinding terus bergerak pada sambungan sitim masih dalam kondisi stabil seperti yang terlihat pada gambar 16 di bawah disebabkan oleh deformasi permukaan quipanel akibat putaran sudut di masing-masing titik baut. Kondisi fisik deformasi pada lubang baut dapat dilihat pada gambar 20.



Gambar 16 Pembacaan LVDT arah vertikal LCP 1 (a) arah dorong (b) arah tarik

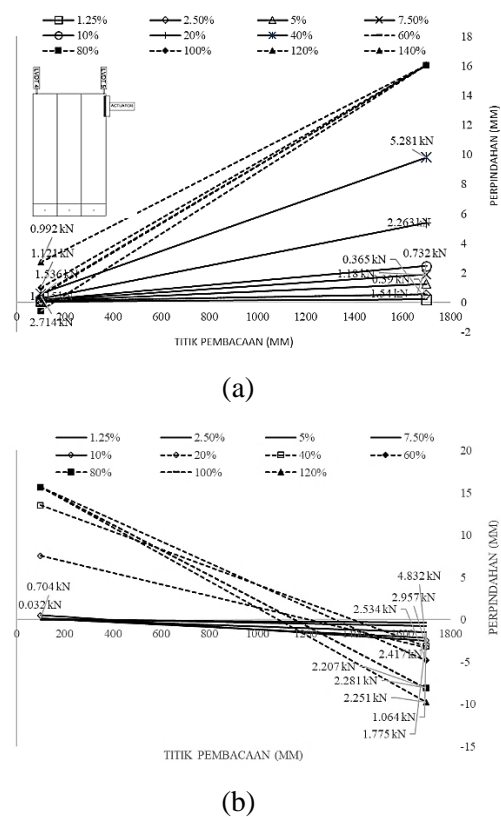
Tinjauan pada sambungan LCP 2 dan LCP 3 dengan penambahan konektor atau perekat diperoleh grafik pergeseran marking sambungan antar unit panel tidak terjadi

pergeseran pada sistem dinding tunggal, kondisi bisa dilihat seperti pada gambar 17.



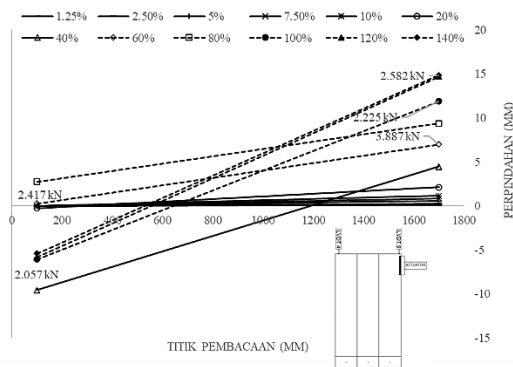
Gambar 17 Perilaku sambungan antar unit quipanel tunggal (a) LCP II (b) LCP III

Pembacaan rangkaian LVDT arah vertikal pada LCP 2 diperoleh nilai uplift arah dorong 9.80 mm dan nilai uplift arah tarik 7.65 mm masing-masing pada saat pasca gaya puncak Pp.

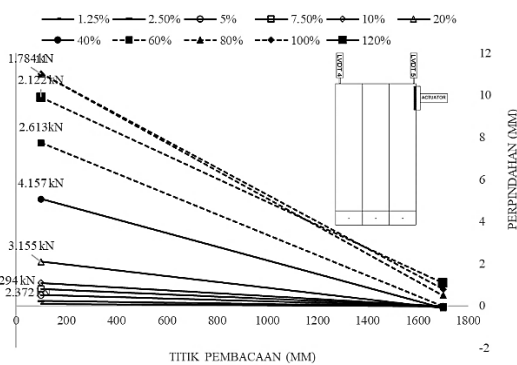


Gambar 18 Pembacaan LVDT arah vertikal LCP 2 (a) arah dorong (b) arah tarik

Nilai uplift pada rangkaian quipanel tiba-tiba meningkat tajam setelah sebelumnya kondisi uplift terbatas akibat kekakuan rangkaian dinding. Pada gambar 18 terlihat jelas nilai uplift terbatas oleh titik baut terdekat pada sudut pusat momen. Sehingga terlihat pola goyangan panel terhadap nilai uplift sudah tidak beraturan dan memiliki margin nilai uplift yang besar. Kerusakan yang diperoleh pada kaki panel sisi di bawah baut memperjelas bahwa terjadi kerusakan ini akibat perilaku goyang menyebabkan tegangan terbesar pada titik baut terdekat dari pusat momen. Sehingga, terjadi kerusakan pecah permukaan quipanel seperti yang terlihat pada gambar 20.



(a)



(b)

Gambar 19 Pembacaan LVDT arah vertikal LCP 3 (a) arah dorong (b) arah tarik

Perilaku goyangan dinding menyebabkan kondisi uplift rangkaian panel tunggal pada LCP 3 juga terjadi. Berdasarkan data pembacaan LVDT vertikal di atas dinding, terjadi perilaku yang sama dengan LCP 2.

Kerusakan berupa pecahnya permukaan quipanel sisi bawah baut menyebabkan terjadinya peningkatan nilai uplift yang cukup besar hingga tidak beraturan seperti pada gambar 19.

Model kerusakan dinding uji

Mekanisme goyang dan rotasi terpusat pada titik baut pada kaki dinding menjadi faktor utama model kerusakan yang terjadi dan pencapaian performa struktur aman.



(a)



(b)



(c)

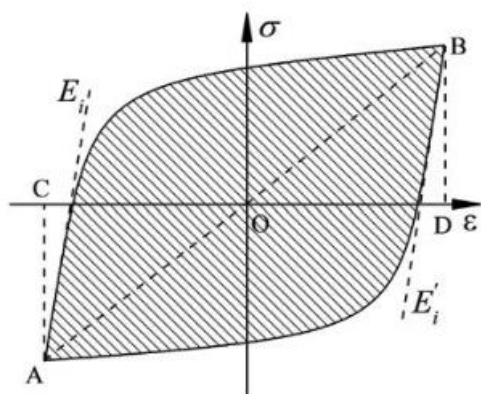
Gambar 20 model kerusakan pengujian dinding

Masing-masing specimen ditemukan kerusakan :

1. LCP I deformasi lubang baut, luas lubang baut membesar terjadi pada semua titik baut hingga kondisi akhir stabil. Diperoleh pergoyangan adaptif pada rangkaian panel dinding.
2. LCP II diperoleh kerusakan terjadinya patah pada permukaan kaki dinding di bawah titik baut pada drift 40%.
3. Kondisi di kerusakan sisa patahan pada salah satu titik baut di dalam takikan sloof. LCP III diperoleh kerusakan terjadinya patah pada permukaan kaki dinding drift maksimal 60%.

Analisis Numerik

Luas area yang dikelilingi oleh kurva histerisis adalah nilai ukuran dalam penentuan disipasi energi sebagai evaluasi kinerja seismic struktur. Menurut Qiao *et al.* (2020) bahwa semakin gemuk kurva histerisisnya, semakin baik kinerja dalam konsumsi energi.



Gambar 21 Loop histerisis energi disipasi (Yu, Y. *et al.*, 2019)

he adalah koefisien redaman ekuivalen; S(ACD+BCD) adalah luasan area kurva histerisis; S(OBD+OAC) adalah luasan segitiga dibatasi garis putus-putus; dan Π adalah nilai phi.

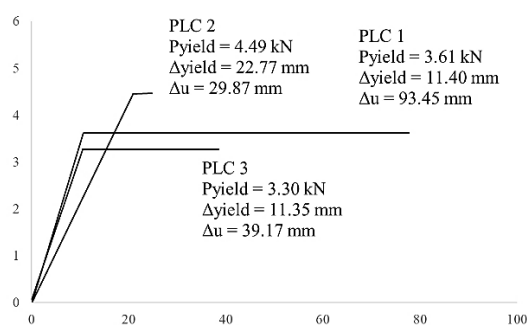
$$he = \frac{S(ACD+BCD)}{2\pi S(OBD+OAC)} \quad (1)$$

Tabel 4 menyajikan data luas loop histerisis masing-masing dinding uji menunjukkan kesetimbangan luasan arah doorong dan tarik. Perbedaan yang besar diperoleh pada model kontrol memiliki besaran konsumsi energi paling kecil.

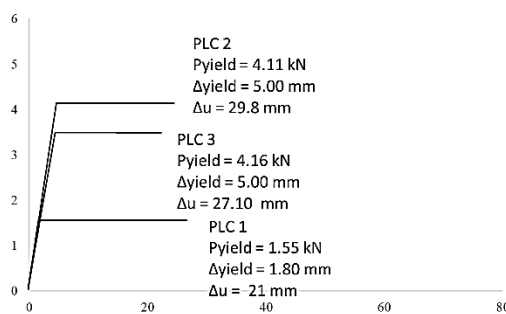
Tabel 4 Rekapitulasi luas loop histeresis

Panel uji	Luas loop histeresis (kN.mm)	
	(Dorong)	(Tarik)
PLC 1	168,70	115,43
PLC 2	66,97	72,18
PLC 3	68,17	64,95

Rasio daktilitas μ adalah rasio pada displacement ultimit Δu dan displacement leleh Δyield pada panel dinding berdasarkan kurva ekuivalen energi elastis-plastik (EEEP). Kurva EEEP adalah metode yang diberikan dalam standar internasional (ASTM) untuk menentukan kinerja daktilitas struktur ringan.



(a)



(b)

Gambar 22 Kurva EEEP dinding Quipanel (a) arah tekan (b) arah tarik

Kemiringan bagian elastis sama dengan kekakuan $K_{0,4Ppuncak}$ dan bagian plastik horisontalnya sama dengan P_u , yang dapat dihitung dengan Pers. 2 :

$$P_{yield} = \left(\Delta u + \Delta u^2 + \frac{2A}{K_{0,4Ppuncak}} \right) K_{0,4Ppuncak} \quad (2)$$

A artinya luas kurva dari 0 hingga displacement Δu ; $K_{0,4Ppuncak}$; dan Δe artinya displacement tepi atas dinding pada $0,4 P_p$. Hasil analisis memperoleh kurva EEEP dinding seperti pada gambar 22. Kurva EEEP yang diperoleh memperjelas capaian daktilitas rangkaian panel dinding untuk specimen uji LCP 1 mencapai 93.45 mm pada displacement ultimit arah dorong. Dan mencapai 31 mm pada displacement ultimit arah tarik. Masing-masing capaian displacement terbesar pada kondisi panel dinding masih berdiri kokoh tanpa kerusakan struktural dibandingkan dengan yang terjadi pada LCP 2 dan LCP 3.

Performa Struktur

Hasil pengujian diperoleh data simpangan arah bolak-balik masing-masing model dinding uji. Kondisi simpangan 2% menunjukkan level performa struktur dalam menerima beban gempa. Kekakuan pada sistem dinding dengan wiremesh mampu meningkatkan kapasitas menerima gaya lateral lebih besar, namun perlu bertambahnya lebar dinding dalam sistem tunggal, meningkatkan nilai perpindahan dan reaksi uplift. Kondisi ini menyebabkan tegangan bertambah besar pada titik baut terdekat dari pusat momen. Tabel 5 menunjukkan performa struktur LCP 1 hingga melebihi nilai standar aman. Kondisi ini menguatkan rekomendasi penggunaan rekayasa ini untuk meminimisir runtuhnya dinding yang rawan menyebabkan korban bencana gempa bumi. Sementara LCP 2 dan LCP 3 tidak mencapai target simpangan 2% karena telah terjadi kerusakan pada kaki dinding lebih pada drift 40 dan 60%.

Tabel 5 Perbandingan simpangan menurut standar konstruksi

Parameter	Level Performa Struktur		
	Standar	Dorong	Tarik
LCP I	2%	3.42%	1.23%
LCP II	2%	0.88%	0.82%
LCP III	2%	1.05%	0.73%

Kesimpulan

1. Resistensi dinding terhadap beban horisontal siklik meningkat dalam rekayasa sistem dudukan kaki jepit di atas takikan sloof pracetak. Pada umur pembebanan sistem perletakan beralih menjadi perletakan semi sendi tanpa kerusakan struktur (mayor) pada permukaan panel.
2. Sloof pracetak dengan takikan meningkatkan besar gaya yang mampu diterima panel, meningkatkan elektabilitas perpindahan dan meminimalisir perilaku geser dinding. Permodelan ini juga memberi solusi perakitan dan perbaikan sistem knock down (bongkar pasang) dalam menunjang percepatan pembangunan rumah sederhana tahan gempa.
3. Kapasitas struktur dinding menerima gaya horisontal atau beban gempa, tidak diperlukan kekuatan material yang linier dengan muatannya. Tetapi, dibutuhkan material bangunan yang ringan, memiliki kekakuan yang tinggi dan durabiliti yang besar.

Daftar Pustaka

- Alarcon, C., Hube, M.A. and de la Llera, J.C. (2014) 'Effect of axial loads in the seismic behavior of reinforced concrete walls with unconfined wall boundaries', *Engineering Structures*, 73, pp. 13–23. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.04.047>.
- ASCE (2000) 'American Society of Civil Engineers, Fema 356 Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Building', *Rehabilitation* [Preprint], (November).
- Brunesi, E., Nascimbene, R. and Peloso, S. (2020) 'Evaluation of the Seismic Response of Precast Wall Connections: Experimental Observations and Numerical Modeling',

- Journal of Earthquake Engineering*, 24(7), pp. 1057–1082. Available at: <https://doi.org/10.1080/13632469.2018.1469440>.
- Ceccotti, A. (2008) ‘New technologies for construction of medium-rise buildings in seismic regions: The XLAM case’, *Structural Engineering International: Journal of the International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE)*, 18(2), pp. 156–165. Available at: <https://doi.org/10.2749/101686608784218680>.
- Djameluddin, R., Tjaronge, M.W. and Amiruddin, A.A. (2018) ‘PERILAKU MEKANIK PANEL KOMPOSIT BETON RINGAN (LIGHTWEIGHT CONCRETE) PREFABRIKASI PADA PEMBEBAAN AXIAL’.
- Dujic, B. *et al.* (2010) ‘Prediction of dynamic response of a 7-storey massive XLam wooden building tested on a shaking table’, *11th World Conference on Timber Engineering 2010, WCTE 2010*, 4(October 2007), pp. 3450–3457.
- Fatriady, M.R. and Djameluddin, R. (2024) ‘Study of Capacity Calcium Board – Styrofoam Sandwich Panels on Wall Systems under Cyclic Lateral Force’, 14(5), pp. 16148–16153.
- Fernando, P.L.N., Jayasinghe, M.T.R. and Jayasinghe, C. (2017) ‘Structural feasibility of Expanded Polystyrene (EPS) based lightweight concrete sandwich wall panels’, *Construction and Building Materials*, 139, pp. 45–51. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.027>.
- Follesa, M. *et al.* (2013) ‘Seismic design of multi-storey cross laminated timber buildings according to eurocode 8 | Progettazione sismica di edifici multipiano in cross laminated timber secondo l’Eurocodice 8’, *Ingegneria Sismica*, 30(4).
- Gavric, I., Fragiaco, M. and Ceccotti, A. (2012) ‘Strength and deformation characteristics of typical X-lam connections’, *World Conference on Timber Engineering 2012, WCTE 2012*, 2, pp. 146–155.
- Gavric, I., Fragiaco, M. and Ceccotti, A. (2015a) ‘Cyclic Behavior of CLT Wall Systems: Experimental Tests and Analytical Prediction Models’, *Journal of Structural Engineering*, 141(11), pp. 1–14. Available at: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0001246](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0001246).
- Gavric, I., Fragiaco, M. and Ceccotti, A. (2015b) ‘Cyclic behavior of typical screwed connections for cross-laminated (CLT) structures’, *European Journal of Wood and Wood Products*, 73(2), pp. 179–191. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00107-014-0877-6>.
- Izzi, M. *et al.* (2018) ‘Seismic behaviour of Cross-Laminated Timber structures: A state-of-the-art review’, *Engineering Structures*, 170, pp. 42–52. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.05.060>.
- Kardomateas, G.A. and Carlsson, L.A. (2001) *Structural and Failure Mechanics of Sandwich Composites, Solid Mechanics and its applications*.
- Qiao, W. *et al.* (2020) ‘Experimental study of insulated sandwich concrete wall connections under cyclic loading’, *Structures*, 28(17), pp. 2000–2012. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.10.029>.
- Seeber, K.E. *et al.* (1997) ‘State-of-the-art of precast/prestressed sandwich wall panels’, *PCI Journal*, 42(2), pp. 92–134. Available at: <https://doi.org/10.15554/pci.42.2-05>.
- Simbolon, R. *et al.* (2020) ‘Behavior of precast reinforced concrete beam-column connection by double straight notch models under lateral cyclic loading’, *International Journal of Engineering Research and Technology*, 13(11), pp. 3222–3229. Available at: <https://doi.org/10.37624/ijert/13.11.2020.3222-3229>.
- Simbolon¹, R. *et al.* (2019) ‘Daktilitas Sambungan Model Takikan Rangkap Pada Hubungan Balok-Kolom Beton Pracetak, Akibat Beban Lateral Siklik’, *Jurnal Spektran*, 7(2), p. 162. Available at: <http://ojs.unud.ac.id/index.php/jsn/index>.
- Sni 1726:2019 (2019) ‘Sni 1726:2019’, *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung*, (8), p. 254.
- Way, D. *et al.* (2016) ‘Evaluation of a Wood-Strand Molded Core Sandwich Panel’, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(9), pp. 1–9. Available at: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001589](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001589).