

# STUDI EKSPERIMENTAL PERILAKU STRUKTURAL LANTAI KACA LAMINASI TERHADAP BEBAN LENTUR (AN EXPERIMENTAL STUDY ON LAMINATED GLASS FLOOR STRUCTURAL BEHAVIOR UNDER FLEXURAL LOADING)

Widi Nugraha<sup>1,\*</sup>, Hari Triwibowo<sup>2</sup>, Budi Subrata<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Balai Jembatan, Direktorat Jenderal Bina Marga, Bandung, Indonesia

<sup>2</sup>Balai Geoteknik, Terowongan dan Struktur, Direktorat Jenderal Bina Marga, Bandung, Indonesia

\*widi.nugraha@pu.go.id

Diterima: 13 Maret 2024; direvisi: 28 Mei 2024; disetujui: 24 Juni 2024

## ABSTRAK

Perkembangan kaca laminasi dengan sifat yang lebih daktil daripada kaca standar membuka peluang baru untuk penggunaannya sebagai elemen struktur pemikul beban, termasuk lantai dan balok. Penggunaan kaca laminasi sebagai lantai jembatan telah berkembang luas di proyek konstruksi di berbagai lokasi. Namun, pengetahuan tentang perilaku struktural lantai kaca laminasi masih cukup terbatas karena perkembangannya yang relatif baru dalam industri konstruksi. Studi eksperimental ini bertujuan untuk mengetahui perilaku struktural lantai kaca laminasi yang mengalami gaya lentur akibat beban vertikal. Pengujian dilakukan di laboratorium dengan menggunakan sampel panel lantai kaca laminasi lengkap dengan sistem frame lantai. Terdapat empat sampel yang diuji, masing-masing terdiri atas tiga sampel dengan dua lapisan kaca laminasi dan satu sampel dengan tiga lapisan kaca laminasi. Ketebalan lapisan kaca laminasi dan lapisan interlayer yang digunakan untuk keempat sampel adalah sama, yaitu secara berurutan 12 mm dan 1,5 mm. Pengujian dilakukan dengan memberikan beban tekan vertikal di tengah bentang pelat lantai, sementara besaran deformasi lendutan lantai diukur untuk setiap penambahan besaran gaya tekan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa semua spesimen lantai kaca laminasi mampu menahan beban yang lebih besar daripada beban rencana, dengan nilai daktilitas dapat mencapai 2,23. Kegagalan lentur terjadi secara bertahap sehingga memungkinkan evakuasi dilakukan dengan aman. Hasil ini memberikan kontribusi signifikan terhadap pemahaman kita mengenai penggunaan kaca laminasi struktural dalam pengembangan konstruksi jembatan, membuka potensi baru untuk inovasi dalam desain struktur.

**Kata Kunci:** kaca laminasi, lantai struktural, uji lentur, daktilitas, kekakuan

## ABSTRACT

The development of laminated glass with enhanced ductility compared to standard glass presents promising opportunities for its utilization as load-bearing structural components, notably in floors and beams. Its application as bridge flooring has gained widespread acceptance across construction projects worldwide. Despite this, understanding laminated glass floor behavior remains limited due to its recent emergence in the construction sector. This study aims to investigate the structural response of laminated glass floors to vertical bending loads through bending tests conducted in a laboratory setting. Four samples were tested, including three with two layers of laminated glass and one with three layers, all using the same thickness of glass and interlayer, which is 12 mm and 1.5 mm, respectively. Vertical compressive loads were applied at the floor span center, with deformation measured incrementally. Test results show that all laminated glass floor specimens can withstand loads greater than the design load, with ductility reaching up to 2,23, showcasing post-failure ductile behavior and gradual bending failure conducive to safe evacuation. These findings significantly advance our comprehension of laminated glass in bridge construction, paving the way for innovative structural designs.

**Keywords:** laminated glass, structural floor, bending test, ductility, stiffness

## PENDAHULUAN

Dalam beberapa dekade terakhir, terjadi kemajuan signifikan dalam pengembangan material untuk konstruksi. Salah satu inovasi terkini yang menarik perhatian industri konstruksi adalah penggunaan kaca laminasi sebagai elemen struktural, terutama sebagai elemen lantai jembatan dan bangunan. Sebelumnya, material kaca cenderung dinilai kurang menguntungkan sebagai elemen struktur karena mekanisme kerusakannya yang bersifat getas. Namun, perkembangan kaca laminasi telah menjawab masalah ini dengan menambahkan lapisan *interlayer*, baik berupa *polyvinil butyral* (PVB) maupun *sentry glas plus* (SGP) sebagai lapisan perekat di antara beberapa lapisan kaca tipe *annealed float glass* (Huang et al. 2020). Hal ini membuat mekanisme kerusakannya menjadi jauh lebih daktil dibandingkan sebelumnya, di mana lantai kaca laminasi masih mampu memikul beban walaupun kerusakan pada lapisan kaca sudah terjadi sehingga menjadikan kaca laminasi sebagai pilihan yang menarik sebagai elemen struktur (Nugraha et al. 2023). Daktilitas merupakan suatu parameter yang menunjukkan karakteristik material yang mampu mengalami deformasi setelah mengalami kerusakan leleh sehingga memungkinkan untuk melakukan evakuasi keselamatan ketika kegagalan struktural terjadi jika suatu material memiliki nilai daktilitas yang cukup (Xu et al. 2022). Daktilitas pada umumnya diperhitungkan sebagai rasio deformasi *ultimate* terhadap deformasi leleh (Angelides, Talbot, and Overend 2019).

Penerapan kaca laminasi dapat ditemukan dalam proyek-proyek konstruksi terkemuka, seperti Jembatan Grand Canyon Zhangjiajie di Tiongkok dan *Skywalk* Glacier di Kanada. Keunggulan visual kaca laminasi, yaitu tetap mempertahankan sifat tembus pandang seperti kaca biasa, membuatnya sangat menarik dalam struktur bangunan sipil (Samieian et al. 2023). Dalam beberapa tahun belakangan ini, penggunaan kaca laminasi untuk proyek jembatan atau *skywalk* mulai berkembang di Indonesia. Salah satunya adalah Jembatan Kaca Seruni Point di Kawasan Taman Nasional Bromo Tengger Semeru yang dikembangkan oleh Direktorat Bina Teknik Jalan dan Jembatan, Kementerian PUPR. Kemudian, penggunaan

kaca laminasi tersebut diikuti beberapa proyek jembatan atau *skywalk* lainnya.

Pengetahuan tentang mekanika bahan kaca laminasi masih terbatas karena penggunaannya masih relatif baru dalam dunia konstruksi. Masih terdapat celah pengetahuan antara fakta penggunaan kaca laminasi secara aktual dalam konstruksi dengan teoretis (Samieian et al. 2023). Penelitian yang telah dilaksanakan sebelumnya lebih terfokus pada pengujian jembatan dengan sistem kaca secara keseluruhan, baik dengan uji statis untuk mengukur keandalan struktur jembatan dengan lantai kaca laminasi (Nugraha et al. 2023) maupun dengan uji dinamis untuk mengukur tingkat kenyamanan pengguna jembatan dengan lantai kaca laminasi (Nugraha et al. 2023).

Penelitian ini akan mengeksplorasi lebih jauh melalui studi eksperimental terhadap perilaku struktural lantai kaca laminasi saat diberikan beban lentur. Dengan pemahaman mendalam mengenai karakteristik dan respons material ini, diharapkan penelitian ini dapat memberikan kontribusi signifikan terhadap pengembangan konstruksi yang menggunakan lantai kaca laminasi. Spesimen yang digunakan dalam penelitian ini adalah lantai kaca laminasi dengan variasi tebal dan jumlah lapisan kaca yang digunakan. Setiap spesimen kaca laminasi akan dilakukan uji lentur di laboratorium sehingga bisa didapatkan titik kegagalan dan deformasi yang terjadi hingga kaca laminasi mengalami keruntuhan. Informasi tersebut dapat menjadi dasar analisis dan evaluasi kapasitas serta keandalan kaca laminasi sebagai elemen lantai pemikul beban pejalan kaki, membuka jalan untuk inovasi lebih lanjut dalam desain konstruksi sipil.

## HIPOTESIS

Jumlah lapisan kaca dalam kaca laminasi akan menentukan jumlah titik kegagalan yang akan terjadi, semakin banyak jumlah lapisan kaca laminasi, semakin banyak juga titik kegagalan, serta memberikan sifat yang lebih daktil dibanding dengan kaca laminasi yang memiliki jumlah lapisan kaca yang lebih sedikit.

## METODOLOGI

### Spesimen Lantai Kaca Laminasi

Kaca laminasi yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah kaca laminasi 2 lapis dan 3 lapis, dengan penggunaan material lapisan *interlayer* SGP. Untuk kaca laminasi 2 lapis yang terdiri atas 3 spesimen memiliki dimensi tebal total nominal 25.5 mm (12 mm kaca + 1.5 mm SGP *interlayer* + 12 mm kaca), panjang 1800 mm, dan lebar 1500 mm. Sementara itu, untuk kaca laminasi 3 lapis sebanyak 1 spesimen memiliki dimensi tebal total nominal 39 mm (12 mm kaca + 1.5 mm SGP *interlayer* + 12 mm kaca + 1.5 mm SGP *interlayer* + 12 mm kaca). Parameter dimensi dari spesimen lantai kaca laminasi ini dapat dilihat pada Tabel 1.

Spesimen lantai kaca laminasi yang digunakan dalam penelitian ini merupakan sistem lantai jembatan yang dilengkapi dengan balok baja pemikul lantai sesuai dengan sistem balok baja pemikul lantai yang digunakan pada konstruksi lantai jembatan setiap spesimen berasal. Spesimen ditempatkan pada alat uji yang akan memberikan beban tekan terpusat di tengah bentang lantai kaca laminasi secara bertahap hingga terjadi kegagalan pada semua lapisan lantai kaca laminasi. Adapun dimensi tapak beban tekan terpusat tersebut adalah sebesar 150 mm x 150 mm.

**Tabel 1.** Spesimen uji lantai kaca laminasi

No	Kode	L (mm)	B (mm)	t (mm)	n
1	T1	1800	1500	25.5	2
2	T2	1800	1500	25.5	2
3	T3	1800	1500	25.5	2
4	T4	1800	1500	39	3

Keterangan: L = panjang, B = lebar, t = tebal kaca laminasi, n = jumlah lapisan kaca

### Metode Pengujian

Pengujian yang dilakukan dalam penelitian ini menggunakan alat *Dartec Testing Machine* seperti ditampilkan pada Gambar 2. Fungsi alat uji ini serupa dengan *Universal Testing Machine* (UTM) yang dapat memberikan pembebanan secara vertikal pada spesimen uji di bawahnya. Alat uji ini dilengkapi sistem *platform* yang berupa *frame* baja sehingga memungkinkan untuk digunakan untuk pengujian tekan dan lentur. Dalam penelitian ini, akan dilakukan uji lentur pada spesimen lantai kaca laminasi yang akan diberikan beban secara

bertahap. Spesimen lantai kaca laminasi yang akan diuji ditempatkan secara mendatar di atas *platform* alat uji untuk kemudian dapat diberikan beban tekan terpusat yang menghasilkan mekanisme lentur yang dapat menggambarkan perilaku lantai yang diberikan beban vertikal akibat pejalan kaki yang melintas.

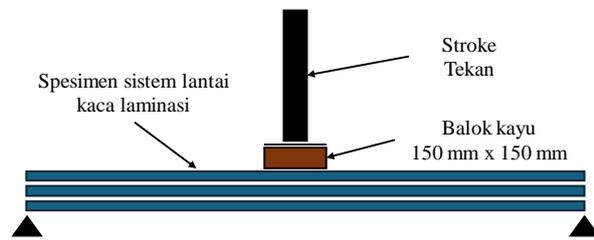
Beban aksial tekan dalam pengujian ini menggunakan sistem hidrolik yang dapat dikontrol besaran *stroke* pembebanan yang diberikan melalui komputer yang berada di ruang kendali pengujian. Laju *stroke* pembebanan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebesar 1 mm per menit sehingga memungkinkan untuk dilakukan pengukuran dalam rentang yang cukup rapat dan detail. Selanjutnya, untuk mengukur besaran beban yang diberikan dari *stroke* alat, digunakan sensor *load cell* sehingga bisa didapatkan besaran beban untuk setiap penambahan *stroke* yang diberikan oleh alat secara terkontrol.



**Gambar 1.** *Dartec Testing Machine*

Pengujian sistem lantai kaca laminasi ini menggunakan jenis beban titik (*point load*), dengan beban dari aktuator disalurkan ke benda uji melalui bidang kontak persegi. Aktuator beban dalam penelitian ini berupa lingkaran, ditambahkan bidang kontak persegi, yaitu berupa balok kayu berukuran 150 mm x 150 mm yang kemudian kontak langsung dengan permukaan lantai kaca laminasi, seperti dapat

dilihat pada Gambar 3. Penampang beban ini digunakan dalam penelitian ini sebagai simulasi efek beban terpusat. Beban terpusat diketahui dapat memberikan efek gaya dalam yang lebih besar dibanding beban merata (Xue et al. 2022). Sebagai ilustrasi, dengan memberikan suatu beban yang besarnya sama, tetapi dalam bentuk beban terpusat dan beban merata pada suatu balok tumpuan sederhana, dapat memberikan gaya dalam momen lentur yang berbeda secara signifikan, dengan beban terpusat menghasilkan momen lentur sebesar dua kali lipat dari momen lentur akibat beban merata (Al-Ghrery et al. 2021). Penggunaan beban terpusat dalam penelitian ini dilakukan dengan tujuan agar hasil pengujian dapat bersifat lebih konservatif dibanding kondisi aktual pembebanan pejalan kaki yang sifatnya dapat lebih tersebar ataupun beban rencana dalam SNI 1725 2016 untuk pejalan kaki yang berupa beban merata.



**Gambar 2.** Setup pengujian sistem lantai kaca laminasi

Untuk mengukur besaran deformasi lantai kaca laminasi, dalam pengujian ini digunakan sensor *linear variable differential transformer* (LVDT) yang dipasang di bagian bawah lantai pada tengah bentang. Pengukuran deformasi vertikal ini dilakukan secara menerus untuk setiap penambahan beban tekan terpusat yang diaplikasikan alat uji pada sistem lantai kaca. Dalam penelitian ini, dilakukan pengujian untuk keempat sampel lantai laminasi sesuai dengan Tabel 1 secara bergantian hingga didapat hasil berupa kurva beban terhadap deformasi vertikal yang terjadi di tengah bentang lantai. Perbandingan titik kegagalan dan besaran deformasi akan dianalisis lebih lanjut dalam penelitian ini untuk mendapatkan informasi lebih lanjut mengenai mekanisme kegagalan dari sistem lantai kaca laminasi untuk digunakan sebagai lantai struktur, baik pada konstruksi jembatan pejalan kaki maupun *skywalk*.

## HASIL DAN ANALISIS

Dalam pengujian spesimen lantai kaca laminasi dalam penelitian ini, yang menggunakan jenis pembebanan dengan beban titik, dilakukan pembebanan bertahap hingga terjadi kerusakan yang bertahap sesuai dengan jumlah lapisan kaca laminasi dari setiap spesimen panel lantai kaca laminasi, seperti dapat dilihat pada Gambar 4. Seperti kerusakan akibat lentur, mekanisme kerusakan yang pertama terjadi adalah lapisan kaca pada serat paling bawah terlebih dahulu dengan tegangan tarik akibat beban yang menyebabkan mekanisme lentur pada sistem lantai kaca. Setelah kaca lapisan pertama, yaitu lapisan paling bawah dari sistem lantai kaca laminasi mengalami kerusakan, lapisan kedua, yaitu lapisan kaca di atasnya, memikul beban dan mengalami mekanisme lentur seperti lapisan pertama.

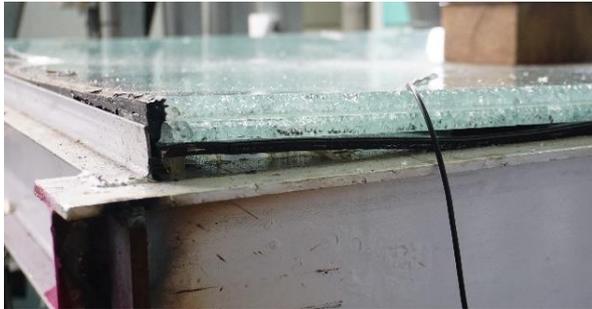


**Gambar 3.** Pengujian lantai kaca hingga mengalami kerusakan

Untuk spesimen pertama, kerusakan pertama pada lapisan pertama kaca terjadi saat diberikan beban sebesar 57,58 kN dengan defleksi yang dihasilkan sebesar 19,86 mm, dengan visualisasi kerusakan ditampilkan pada Gambar 5. Selanjutnya, beban uji dilepaskan untuk kemudian diberikan beban kembali untuk menguji lapisan kedua kaca yang masih belum mengalami kerusakan. Pada pengujian dengan beban tahapan kedua, terjadi kerusakan pada lapisan kedua kaca pada beban uji sebesar 40,83 kN dengan defleksi 37,41 mm, dengan visualisasi kerusakan ditampilkan pada Gambar 6. Karena spesimen pertama hanya memiliki dua lapis kaca laminasi, pengujian berakhir pada tahap kerusakan kedua tersebut.



**Gambar 4.** Kerusakan lapisan pertama lantai kaca laminasi



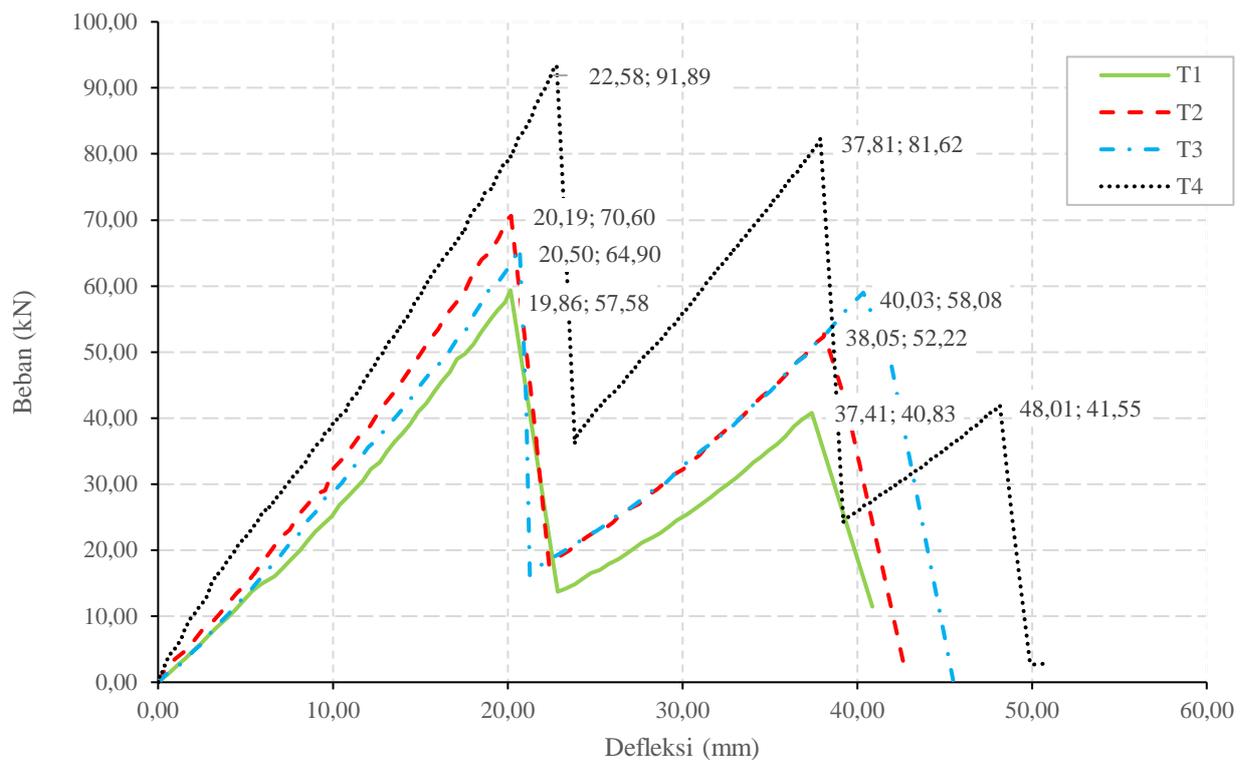
**Gambar 5.** Kerusakan lapisan kedua lantai kaca laminasi

Kemudian, pengujian dilakukan untuk spesimen berikutnya dengan metode yang sama seperti yang digunakan untuk spesimen pertama. Kerusakan yang terjadi akibat pembebanan, yaitu kaca pecah menjadi serpihan, tetapi tidak

lepas dari lapisan *interlayer* seperti terlihat pada Gambar 4, Gambar 5, dan Gambar 6. Pada saat terjadi kerusakan berikutnya, semua lapisan kaca pecah, tetapi tetap terikat satu sama lain dan kerusakan yang terjadi tidak bersifat *brittle*. Hal ini membuktikan bahwa kerusakan lantai kaca laminasi memberikan daktilitas yang dibutuhkan sebagai syarat elemen struktur pemikul beban, yang memungkinkan evakuasi dapat dilakukan setelah kegagalan struktur yang mungkin dapat terjadi di atas beban rencana. Adapun hasil pengujian untuk keempat spesimen panel lantai kaca laminasi yang menggunakan beban terpusat ini direkapitulasi dalam bentuk tabel yang dapat dilihat pada Tabel 2, dan divisualisasikan dalam bentuk grafik kurva beban terhadap defleksi pada Gambar 6.

**Tabel 2.** Titik kegagalan lentur hasil uji lantai kaca laminasi

No	Kode	Titik kerusakan 1		Titik kerusakan 2		Titik kerusakan 3	
		Beban (kN)	Defleksi (mm)	Beban (kN)	Defleksi (mm)	Beban (kN)	Defleksi (mm)
1	T1	57,58	19,86	40,83	37,41	-	-
2	T2	70,60	20,19	52,22	38,05	-	-
3	T3	64,90	20,50	58,08	40,03	-	-
4	T4	91,89	22,58	81,62	37,82	41,55	48,01



**Gambar 6.** Kurva beban vs defleksi hasil pengujian spesimen lantai kaca laminasi

Dari kurva beban terhadap defleksi seperti terlihat pada Gambar 6 di atas, terlihat bahwa setiap spesimen memiliki hasil pengujian yang berbeda-beda. Selain titik kerusakan, ada parameter lain yang dapat dianalisis dari pengujian ini, yaitu kekakuan dan daktilitas. Kekakuan adalah parameter yang menggambarkan respons defleksi yang terjadi untuk setiap unit pembebanan yang diberikan. Semakin tinggi kekakuan, semakin kecil lendutan yang terjadi akibat unit beban yang diberikan (Aloisio, Alaggio, and Fragiacommo 2021). Perhitungan kekakuan dari hasil pengujian lantai kaca laminasi dapat dilakukan dengan menghitung kemiringan (gradien) dari setiap kurva beban-defleksi yang terjadi. Adapun hasil perhitungan kekakuan yang didapat dari pengujian ini ditampilkan pada

Tabel 3 sebagai berikut. K1 merupakan kemiringan dari kurva kerusakan pertama, K2 merupakan kemiringan dari kerusakan kedua, dan K3 merupakan kemiringan dari kerusakan K3.

**Tabel 3.** Kekakuan lantai kaca laminasi hasil uji

No	Kode	K1 (kN/mm)	K2 (kN/mm)	K3 (kN/mm)
1	T1	2,90	1,09	-
2	T2	3,50	1,37	-
3	T3	3,17	1,45	-
4	T4	4,07	2,16	0,87

Parameter berikutnya adalah daktilitas hasil uji terhadap keempat sampel panel lantai kaca laminasi. Parameter daktilitas menggambarkan seberapa besar suatu elemen struktur dapat berdeformasi setelah mengalami kegagalan dan memungkinkan untuk evakuasi pascakegagalan terjadi (Möckel, Lohr, and Weller 2020). Semakin tinggi nilai daktilitas, semakin besar deformasi yang dapat terjadi sebelum terjadi kegagalan akhir dari suatu elemen struktur setelah kegagalan leleh pertama terjadi. Secara matematis, parameter daktilitas ( $\mu$ ) dapat dihitung sebagai perbandingan antara deformasi saat kegagalan akhir ( $\Delta u$ ) tercapai dibandingkan dengan deformasi kerusakan leleh pertama ( $\Delta y$ ). Hasil pengukuran deformasi akhir, deformasi leleh, serta daktilitas dari setiap sampel lantai kaca laminasi ditampilkan pada Tabel 4 sebagai berikut.

**Tabel 4.** Daktilitas lantai kaca laminasi hasil uji

No	Kode	$\Delta u$ (mm)	$\Delta y$ (mm)	$\mu$
1	T1	40,87	19,86	2,06
2	T2	42,76	20,19	2,12
3	T3	45,49	20,50	2,22
4	T4	50,46	22,58	2,23

## PEMBAHASAN

Hasil pengujian dari keempat spesimen lantai kaca laminasi dalam penelitian ini menunjukkan bahwa lantai kaca laminasi dapat memenuhi kriteria kekuatan. Beban rencana yang harus mampu dipikul lantai jembatan berdasarkan SNI, yaitu  $500 \text{ kg/m}^2$  berupa beban merata. Jika dikonversi menjadi beban titik ekuivalen, besaran beban  $500 \text{ kg/m}^2$  dapat dikalikan dengan luas penampang panel lantai kaca laminasi sebesar  $1,5 \text{ m} \times 1,8 \text{ m}$  sehingga didapat beban titik ekuivalen hasil konversi sebesar  $13,24 \text{ kN}$  sebagai beban rencana. Besaran beban hidup ini dalam kondisi layan sehingga jika akan dibandingkan dengan hasil pengujian yang berupa kondisi *ultimate*, perlu

diberikan faktor beban hidup sesuai dengan SNI 1725-2016, yaitu 1,8 menjadi  $23,83 \text{ kN}$ . Seperti terlihat dari hasil uji beban sistem lantai kaca laminasi pada Tabel 2, semua spesimen lantai kaca laminasi terbukti mampu memikul beban yang lebih besar dibandingkan dengan beban rencana terfaktor, dengan besaran beban kegagalan pertama terkecil di antara semua sampel adalah sebesar  $57,58 \text{ kN}$  untuk sampel T1. dengan rasio 242% terhadap beban rencana. Kemudian, untuk T2 dan T3 secara berurutan sebesar  $70,60 \text{ kN}$  dan  $64,90 \text{ kN}$  dengan rasio 296% dan 272%. Sementara itu, untuk T4 yang memiliki tiga lapis kaca laminasi, didapat hasil kegagalan pertama yang lebih tinggi dibanding tiga sampel sebelumnya yang hanya memiliki dua lapis kaca laminasi, yaitu sebesar  $91,89 \text{ kN}$  dengan rasio terhadap beban rencana terfaktor yaitu sebesar 386%. Dapat ditarik kesimpulan bahwa sistem lantai kaca laminasi yang diuji dapat memenuhi persyaratan kekuatan untuk dapat memikul beban pejalan kaki sesuai dengan SNI 1725-2016.

Dari hasil pengujian terlihat ada kontribusi dari lapisan tambahan terhadap titik kegagalan pertama dari T4 dibanding T1, T2, dan T3. Pada hasil kegagalan kedua juga sampel T4 memiliki beban puncak jauh lebih tinggi dibanding T1, T2, dan T3, sedangkan pada titik kegagalan ketiga dari T4, memiliki besaran beban puncak yang setara dengan titik kegagalan kedua dari T1, T2, dan T3. Dengan ketebalan lapisan kaca individual yang sama, T4 yang memiliki tiga buah lapisan kaca laminasi memiliki beban puncak yang lebih tinggi dibanding T1, T2, dan T3. Kesamaan yang dapat terlihat, yaitu titik kegagalan akhir dengan tersisa satu lapisan kaca akhir yang memikul beban dan belum mengalami kerusakan, untuk semua sampel nilai beban puncak berada di kisaran nilai yang sama, yaitu 40 hingga  $58 \text{ kN}$ . Begitu juga titik kegagalan kedua dari T4 yang cukup serupa dengan titik kegagalan pertama dari T1, T2, dan T3 dengan tersisa dua lapisan kaca yang memikul beban dan belum mengalami kerusakan, memiliki nilai beban puncak dalam kisaran nilai yang cukup setara, yaitu 57 hingga  $81 \text{ kN}$ . Sementara itu, titik kegagalan pertama T4 memiliki beban puncak yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan titik kegagalan pertama dari T1, T2, dan T3 karena jumlah lapisan yang dimiliki T4 lebih banyak dibandingkan dengan T1, T2, dan T3.

Dari sisi kekakuan, seperti dapat dilihat dari Tabel 3, juga terlihat bahwa spesimen T4 memiliki kekakuan pertama (K1) yang paling tinggi, yaitu 4,07 kN/mm. Seperti yang telah diuraikan sebelumnya, kekakuan ini merupakan kemiringan dari kurva kerusakan yang terjadi, sedangkan kekakuan tahap pertama untuk sampel T1, T2, dan T3 berada pada kisaran yang sama, secara berurutan adalah sebesar 2,90 kN/mm, 3,50 kN/mm, dan 3,17 kN/mm. Kekakuan ini menggambarkan seberapa curam kurva gaya terhadap lendutan pada tahap kerusakan pertama setiap spesimen, yang berarti semakin tinggi kekakuan, semakin curam kurva gaya terhadap lendutan sehingga gaya yang dibutuhkan untuk memberikan suatu unit lendutan tertentu semakin besar. Sifat kurva gaya terhadap lendutan sebelum tercapai titik kerusakan pertama ini pada umumnya cukup linear yang menggambarkan bahwa perbandingan gaya terhadap lendutan yang terjadi juga bersifat linear dan merupakan karakteristik menarik dari kaca laminasi yang digunakan sebagai sistem lantai struktural.

Pada tahapan kerusakan kedua, kekakuan diperhitungkan sebagai kemiringan kurva gaya terhadap defleksi sebelum tercapainya titik kerusakan kedua, yaitu K2. Dari Tabel 2, terlihat bahwa kekakuan T4 juga memiliki nilai yang paling tinggi, yaitu sebesar 2,16 kN/mm, sedangkan kekakuan tahap kedua untuk sampel T1, T2, dan T3 berada pada kisaran yang cukup seragam, yaitu secara berurutan adalah sebesar 1,09 kN/mm, 1,37 kN/mm, dan 1,45 kN/mm. Kekakuan pada tahap kerusakan kedua (K2) ini secara umum lebih kecil dibandingkan dengan kekakuan pada tahap kerusakan pertama (K1). Hal ini menggambarkan bahwa gaya yang dibutuhkan untuk memberikan suatu unit defleksi tertentu menjadi lebih kecil dibandingkan pada tahap pertama sehingga semua lapisan kaca laminasi masih utuh.

Setelah terjadi kegagalan pertama, lapisan paling bawah dari kaca laminasi mengalami kerusakan sehingga lapisan kaca di atasnya yang memikul mekanisme lentur akibat pembebanan yang diberikan sehingga kekakuan yang dihasilkan menjadi lebih kecil. Selain itu, terdapat fakta menarik, yaitu besaran K2 dari T4 baru bisa dibandingkan dengan K1 dari T1, T2, dan T3 karena jumlah lapisan utuh yang tersisa adalah sama, yaitu tersisa dua lapis kaca laminasi. Begitupun nilai K3 dari T4 yang

besarannya adalah 0,87 kN/mm, tidak jauh berbeda dengan K2 dari sampel T1, T2, dan T3 yaitu secara berurutan sebesar 1,09 kN/mm, 1,37 kN/mm, dan 1,45 kN/mm. Kemudian, seiring bertambahnya jumlah tahapan kerusakan yang terjadi, nilai kekakuan juga semakin menurun secara konsisten untuk semua sampel, dari tahap K1, K2, dan K3 (khusus untuk T4 yang memiliki tiga lapis kaca laminasi). Hal ini menunjukkan bahwa kekakuan semakin berkurang seiring jumlah lapisan kaca laminasi utuh yang ada juga berkurang setiap setelah tercapainya titik kerusakan akibat pembebanan.

Untuk parameter daktilitas, sebagaimana dapat dilihat pada Tabel 4, keempat sampel T1, T2, T3, dan T4 secara berurutan memiliki nilai daktilitas dengan kisaran yang serupa, yaitu 2,06; 2,12; 2,22; dan 2,23. Seperti yang telah diuraikan sebelumnya, parameter daktilitas menggambarkan rasio antara deformasi saat kegagalan akhir ( $\Delta u$ ) terhadap deformasi kerusakan leleh pertama ( $\Delta y$ ). Dengan demikian, semakin besar nilai daktilitas, semakin besar kemampuan lantai kaca laminasi mampu berdeformasi lebih jauh seiring penambahan beban, setelah titik kegagalan leleh pertama terlampaui. Sampel T4 yang memiliki jumlah lapisan kaca laminasi yang paling banyak, parameter daktilitas yang dimiliki memang yang paling besar di antara keempat sampel yang diuji, tetapi besarannya tidak terlalu jauh berbeda dengan T1, T2, dan T3. Hal ini disebabkan oleh besaran deformasi leleh pertama dan juga deformasi kegagalan akhir dari T4 ini sama-sama cukup besar dibanding T1, T2, dan T3 sehingga rasio antara kedua besaran deformasi tersebut menghasilkan nilai daktilitas yang tidak berbeda jauh dengan T1, T2, dan T3.

Dari seluruh uraian pembahasan di atas, untuk parameter titik kerusakan, kekakuan, dan daktilitas, hipotesis penelitian ini dapat dikonfirmasi, yaitu jumlah lapisan kaca dalam kaca laminasi akan menentukan jumlah titik kegagalan yang akan terjadi sehingga semakin banyak jumlah lapisan kaca laminasi, semakin banyak titik kegagalan, memberikan sifat yang lebih daktil dibanding dengan kaca laminasi yang memiliki jumlah lapisan kaca yang lebih sedikit. Selain itu, dengan kaca laminasi diketahui memiliki sifat yang cukup daktil dan memiliki kekuatan dan kekakuan yang cukup memadai untuk digunakan sebagai lantai

struktur untuk menopang beban pejalan kaki sesuai dengan standar yang ditetapkan dalam SNI.

## KESIMPULAN DAN SARAN

### Kesimpulan

Dari penelitian ini dapat disimpulkan bahwa lantai kaca laminasi dapat memenuhi kriteria kekuatan yang ditetapkan oleh standar SNI 1725-2016 untuk beban pejalan kaki. Hasil pengujian menunjukkan bahwa semua spesimen lantai kaca laminasi mampu menahan beban yang lebih besar daripada beban rencana, dengan nilai daktilitas berkisar antara 2,06 sampai dengan 2,23 dan rasio kegagalan pertama terhadap beban rencana terfaktor berkisar antara 242% hingga 386%. Lapisan tambahan pada spesimen T4 memberikan kontribusi signifikan terhadap kekuatan dan kekakuan, dengan nilai daktilitas, nilai kekakuan, dan titik kegagalan lentur yang lebih tinggi dibandingkan dengan T1, T2, dan T3.

Analisis kekakuan juga menunjukkan bahwa kekakuan pada tahap kerusakan kedua umumnya lebih rendah daripada pada tahap pertama yang menunjukkan sifat yang lebih daktil seiring bertambahnya jumlah tahapan kerusakan. Selain itu, daktilitas semua sampel berada dalam kisaran serupa, menunjukkan kemampuan yang relatif sebanding dalam berdeformasi lebih jauh setelah terjadi kegagalan pertama. Dari hasil penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa jumlah lapisan kaca dalam kaca laminasi mempengaruhi jumlah titik kegagalan yang terjadi, dengan tambahan lapisan kaca meningkatkan daktilitas dan kekuatan lantai kaca laminasi. Ini menegaskan bahwa kaca laminasi memiliki potensi untuk digunakan sebagai lantai struktur dengan keamanan dan kinerja yang memadai.

### Saran

Dalam penelitian ini, belum dilakukan analisis terhadap parameter regangan pada kaca akibat pembebanan lentur. Oleh karena itu, untuk melengkapi kajian yang telah dilakukan dalam penelitian ini, disarankan untuk melakukan penelitian lanjutan yang fokus pada aspek tersebut. Selain itu, pengujian kondisi beban dinamis juga perlu dilakukan pada penelitian selanjutnya, mengingat beban pejalan

kaki pada lantai jembatan merupakan beban yang sifatnya dinamis.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Balai Geoteknik, Terowongan, dan Struktur, Direktorat Bina Teknik Jalan dan Jembatan, Kementerian PUPR atas kesempatan untuk terlibat dalam kegiatan uji laboratorium material lantai kaca laminasi sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik dan lancar.

## DAFTAR PUSTAKA

- Al-Ghrery, K., Al-Mahaidi, R., Kalfat, R., Oukaili, N., and Al-Mosawe, A. (2021). Experimental Investigation of Curved-Soffit RC Bridge Girders Strengthened in Flexure Using CFRP Composites. *Journal of Bridge Engineering*, 26(4), 1–12. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)be.1943-5592.0001691](https://doi.org/10.1061/(asce)be.1943-5592.0001691)
- Aloisio, A., Alaggio, R., and Fragiaco, M. (2021). Bending Stiffness Identification of Simply Supported Girders using an Instrumented Vehicle: Full Scale Tests, Sensitivity Analysis, and Discussion. *Journal of Bridge Engineering*, 26(1), 1–9. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)be.1943-5592.0001654](https://doi.org/10.1061/(asce)be.1943-5592.0001654)
- Angelides, S. C., Talbot, J. P., and Overend, M. (2019). The effects of high strain-rate and in-plane restraint on quasi-statically loaded laminated glass: a theoretical study with applications to blast enhancement. *Glass Structures and Engineering*, 4(3), 403–420. <https://doi.org/10.1007/s40940-019-00107-4>
- Huang, X., Cui, M., Liu, Q., and Nie, J. (2020). An experimental study on the structural behaviour of laminated glass members under combined axial compression and in-plane bending. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 53(2). <https://doi.org/10.1617/s11527-020-01476-x>

- Möckel, M., Lohr, K., and Weller, B. 2020. Load-bearing Behaviour of Laminated Tempered Glass with Reground Edges. Dalam B. & L. Belis (Ed.), *Challenging Glass 7 Conference on Architectural and Structural Applications of Glass* (hlm. 1–11). Ghent University. <https://doi.org/10.7480/cgc.7.4433>
- Nugraha, W., Sidik Permadi, I., Sukmara, G., Riza Chairulloh, A., Triwibowo, H., Subrata, B., and Saripudin, U. 2023, Agustus 28). Serviceability Evaluation of the Bromo Glass Floor Suspension Footbridge. *Asia Australasia Road Conference 2023: Advance Technology Implementation Towards Sustainable Road Development*.
- Nugraha, W., Subrata, B., Sidik Permadi, I., Sukmara, G., Riza Chairulloh, A., Triwibowo, H., dan Saripudin, U. 2023. Evaluasi Performa Jembatan Gantung Tipe Suspended Pejalan Kaki dengan Lantai Kaca Berdasarkan Uji Pembebanan Statis. *Jurnal Jalan-Jembatan*, 40(1), 1–16.
- Samieian, M. A., Cormie, D., Smith, D., Wholey, W., Blackman, B. R. K., Dear, J. P., and Hooper, P. A. 2023. A Study on the Bending of Laminated Glass Under Blast Loading. *Experimental Mechanics*, 63(3), 385–400. <https://doi.org/10.1007/s11340-022-00927-6>
- Xu, Q., Sebastian, W., Lu, K., Yao, Y., and Wang, J. 2022. Parametric Experimental Study of Ultra-Short Stud Connections for Lightweight Steel-UHPC Composite Bridges. *Journal of Bridge Engineering*, 27(2), 1–13. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)be.1943-5592.0001821](https://doi.org/10.1061/(asce)be.1943-5592.0001821)
- Xue, M.-S., Yi, T.-H., Qu, C.-X., & Li, H.-N. 2022. Deck Flexibility Identification of Bridges through a Submode Shape Combination Screening Method without a Reference Point. *Journal of Bridge Engineering*, 27(8), 1–15. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)be.1943-5592.0001908](https://doi.org/10.1061/(asce)be.1943-5592.0001908)