

**KUAT LENTUR DAN RIGIDITAS BALOK DAN LANTAI PAPAN
KAYU LAMINASI SILANG DENGAN PEREKAT**



Disusun Oleh:

Dr. Johannes Adhijoso Tjondro

Sandra Natalia - 2009410074

Benny Kusumo - 2009410015

**Lembaga Penelitian dan Pengabdian Pada Masyarakat
UNIVERSITAS KATOLIK PARAHYANGAN
FAKULTAS TEKNIK**

DAFTAR ISI

Abstrak	1
Bab 1 Pendahuluan	2
Bab 2 Tinjauan Pustaka	4
Bab 3 Road Map dan Metode Penelitian	18
Bab 4 Kuat lentur dan perilaku balok papan kayu laminasi silang dengan perekat	21
Bab 5 Kuat lentur dan perilaku lantai papan kayu laminasi silang dengan perekat	28
Bab 6 Kesimpulan	36
Daftar Pustaka	37

ABSTRAK

Indonesia adalah negara dengan hutan yang sangat potensial sumber bahan kayu yang menjadi salah satu pilihan material untuk bangunan. Berkurangnya luas hutan karena penebangan hutan liar menyebabkan pada beberapa saat menjadikan pasokan kayu berkurang. Saat ini telah dikembangkan hutan tanaman industri dengan tanaman pohon kayu cepat tumbuh, seperti albasia, sengon, akasia dan pohon cepat tumbuh lainnya. Kelemahan dari kayu cepat tumbuh adalah berat jenis dan kekuatan yang relatif cukup rendah. Karena dipanen pada saat berumur relatif muda, yaitu 6-10 tahun sehingga kayu cepat tumbuh ini mempunyai dimensi yang tidak terlalu besar. Kayu albasia pada umumnya diperoleh berupa papan kayu. Perkembangan kayu rekayasa saat ini sangat pesat untuk mendapatkan dimensi maupun kekuatan yang lebih besar. Telah banyak dikenal kayu rekayasa seperti *glulam*, *laminated veneer lumber* dan perkembangan terkini, *cross laminated lumber*. Dalam penelitian ini terdiri dari dua elemen struktur yaitu balok dan pelat lantai. Balok dan lantai kayu pabrikan yang terbuat dari papan kayu laminasi silang diuji kuat lenturnya dengan *third point static loading*. Benda uji dibuat dari papan-papan kayu Albasia yang termasuk jenis kayu cepat tumbuh, yang disusun secara bersilangan tegaklurus seratnya dan direkatkan antara lapisan dengan menggunakan perekat PvAc.

Sejumlah tiga buah benda uji balok kayu terdiri dari lima lapis papan-papan kayu yang disusun secara bersilangan tegaklurus seratnya. Tebal dan lebar papan adalah 18 mm x 170 mm. Dimensi total benda uji lebar x tinggi x panjang adalah 90 mm x 340 mm x 1800 mm. Dari hasil uji kekakuan dan kuat lentur, balok tersebut dianalisis rigiditasnya dan hasilnya dipresentasikan dalam makalah ini.

Enam buah papan lantai kayu laminasi silang terdiri dari 3 lapis papan-papan kayu yang disusun secara bersilangan tegaklurus seratnya. Variasi benda uji terdiri dari pelat lantai dengan lapisan tengah penuh dan tidak kontinu. Dimensi total benda uji adalah 54 mm x 540 mm x 1260 mm. Faktor rigiditas dianalisis dan dipresentasikan dalam laporan ini. Keruntuhan yang terjadi bersifat daktail dan beban batasnya jauh lebih besar dari beban proporsional, hal ini menunjukkan adanya faktor keamanan yang cukup. Prediksi untuk beban hidup merata untuk berbagai panjang bentang juga diberikan.

BAB 1

PENDAHULUAN

Hutan di Indonesia sangat potensial untuk sumber bahan bangunan maupun untuk industri lainnya. Sumber bahan kayu mulai beralih pada hutan tanaman industri dan hutan rakyat dengan kayu cepat tumbuh dan panen seperti kayu albasia, sengon, akasia dan kayu cepat tumbuh lainnya. Material kayu juga ramah lingkungan (*green*) dan bersumber dari alam yang tidak akan pernah habis (*sustainable*). Kayu yang masih muda dalam pertumbuhannya akan menyerap banyak CO₂ dan menghasilkan O₂. Penggunaan bahan bangunan kayu di berbagai negara sebagai bahan yang ramah lingkungan dan hemat energi menyebabkan banyaknya penelitian yang menghasilkan teknologi dalam bidang konstruksi yang sangat maju.

Wilayah kepulauan Indonesia termasuk dalam daerah gempa aktif atau biasa disebut *Pacific Ring of Fire*. Dalam beberapa tahun terakhir terjadi gempa-gempa besar seperti, gempa Aceh (2004), gempa Yogyakarta (2006), gempa Bengkulu (2007), gempa Tasikmalaya (2009) dan gempa Padang (2009). Gempa-gempa besar tersebut menghancurkan sangat banyak gedung, fasilitas umum beserta isinya dan juga korban jiwa. Pelajaran dari kegagalan struktur akibat gempa-gempa yang sudah terjadi menimbulkan keprihatinan akan lemahnya pengetahuan baik teori, analisis maupun standar akan disain bangunan yang baik. Dari pengalaman yang ada bangunan dari kayu menunjukkan ketahanan yang baik terhadap gempa karena massanya yang ringan. Penelitian ini akan mencoba memberikan solusi untuk bangunan dari kayu yang memenuhi syarat kekuatan (*strength*), kekakuan (*stiffness*) dan stabilitas (*stability*).

Suatu teknologi tepat guna perlu disiapkan dalam upaya pemenuhan kebutuhan perumahan dan juga pengurangan risiko bencana khususnya akibat gempa. Kayu merupakan bahan lokal yang mudah didapat, dan pembuatan balok kayu dan lantai laminasi merupakan teknologi yang mudah dipelajari.

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengembangkan dan mendorong pemanfaatan material kayu sebagai bahan bangunan yang utama. Indonesia mempunyai keuntungan karena terletak di daerah tropis sehingga kayu cepat tumbuh karena matahari bersinar sepanjang tahun. Diharapkan kebutuhan akan kayu sebagai bahan bangunan akan dapat tetap terpenuhi pada masa mendatang. Sesuai dengan isu *Green*, material kayu yang juga ramah lingkungan dan bersumber dari alam dan tidak akan pernah habis (*sustainable*) diharapkan dapat dimanfaatkan untuk bahan bangunan. Dari hasil penelitian ini diharapkan masyarakat

dapat melihat bahan bangunan dari kayu sebagai salah satu pilihan yang ramah lingkungan dan banyak menggunakannya. Di daerah dimana kesulitan bahan semen dan baja untuk membuat bangunan dari beton atau baja, bangunan kayu merupakan solusinya karena dapat menggunakan material kayu lokal.

Tujuan Khusus:

Dari uji eksperimental di laboratorium akan didapatkan kekuatan, kekakuan dan daktilitasnya. Dari data eksperimental dapat dikembangkan lebih lanjut cara mendisain balok kayu dan lantai laminasi silang dengan perekat.

Keutamaan Penelitian

Teknologi tepat guna dan kemajuan teknologi: Penelitian ini akan menyiapkan teknologi tepat guna dalam upaya pemenuhan kebutuhan perumahan dan juga pengurangan risiko bencana khususnya akibat gempa dengan massa bangunan yang lebih ringan. Penelitian ini pada akhirnya diharapkan akan menghasilkan balok dan lantai prafabrikasi papan kayu silang laminasi dengan perekat.

Ruang Lingkup penelitian:

1. Penelitian adalah dengan uji eksperimental di Laboratorium
2. Masing-masing variasi benda uji terdiri dari 3 benda uji, total benda uji pelat lantai 2x3 =6 buah dan balok 3 buah
3. Ukuran luar benda uji pelat adalah $1260 \times 540 \times 54 \text{ mm}^3$ dan balok adalah $1800 \times 380 \times 90 \text{ mm}^3$
4. Pengujian dengan beban statis *third point loading bending test*.
5. Jenis papan kayu dan papan kayu silang untuk lapisan penutup adalah albasia dengan tebal 18 mm dan lebar 180 mm

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pendahuluan

Kayu rekayasa dapat diterapkan pada pembuatan balok, dinding serta pelat lantai. Pelat lantai sebagai bagian penunjang bangunan harus dibuat ringan serta mampu menahan beban yang besar. Pabrikasi pelat lantai kayu diperlukan untuk mempermudah proses konstruksi baik dari segi efisiensi waktu serta mobilisasi. Penggunaan pelat lantai pabrikasi dapat berupa *single stress skin panel*, *double stress skin panel*, serta pelat lantai kayu laminasi. Terdapat 2 jenis kayu laminasi yaitu kayu laminasi biasa (glulam) dan kayu laminasi silang. Kayu laminasi silang atau *Cross Laminated Timber* (CLT) merupakan produk kayu rekayasa yang terbuat dari papan yang tersusun bersilangan serat sejajarnya antara lapisan satu dengan lapisan yang lain dengan jumlah lapisan CLT umumnya berjumlah ganjil, dimana jumlah lapis minimum adalah 3 lapis dan ketebalan masing-masing lapis berkisar antara 16 mm – 51 mm, dengan ketebalan maksimum 508 mm yang direkatkan atau dengan dipaku. Panel CLT harus digunakan pada kondisi kering, seperti pada bagian struktur interior yang terlindungi, sehingga kandungan kadar air papan kayu bahan penyusun CLT harus kurang dari 16%. Yeh, B. et al. (2012).

CLT telah digunakan di Eropa sejak lebih dari 15 tahun yang lalu. Perbedaan CLT dengan kayu laminasi biasa (glulam) adalah kayu glulam tidak dipasang silang seratnya, tetapi tetap sejajar arah seratnya antara masing-masing lapisan sedangkan CLT dipasang silang antar lapisnya. Kayu laminasi silang sangat kuat dan kaku sehingga dimungkinkan penggunaan kayu dengan kualitas menengah/rendah yang berasal dari hasil kayu industri yang cepat tumbuh. Batasan minimum berat jenis kayu yang dapat digunakan untuk pembuatan CLT adalah 0.35. Yeh, B. et al. (2012). CLT memiliki bermacam-macam bahan perekat laminasi yaitu dengan baut, lem atau paku. Sambungan dengan perekat lem biasanya memiliki kekuatan yang lebih besar dibandingkan dengan sambungan paku. Sambungan dengan perekat lem tidak merusak material kayu dan hasil penyambungannya lebih rapi. Oleh karena itu, CLT dengan perekat lem lebih umum digunakan. Terdapat beberapa macam jenis perekat, salah satunya adalah perekat PVAc, dimana jenis perekat PVAc umum digunakan untuk melekatkan permukaan berpori seperti kayu. Pada studi pustaka ini akan dibahas mengenai uji eksperimental kuat lentur dan kekakuan pelat lantai kayu laminasi silang kayu. Penelitian penelitian dinding geser yang dahulu lebih banyak menggunakan

rangka kayu dengan lapisan penutup dari gypsum atau plywood saat ini beralih ke CLT. Perkembangan terakhir dari lapisan penutup ini adalah digunakannya papan kayu silang laminasi (Cross Laminated Timber / CLT). CLT ini dapat direkayasa sehingga mempunyai kekuatan dan kekakuan yang mencukupi untuk digunakan pada dinding geser bangunan bertingkat rendah/ sedang, seperti terlihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Struktur bangunan kayu dengan konstruksi dinding geser CLT untuk apartemen perumahan di United Kingdom, Sumber: Forintek 2008.

2.2. Balok papan kayu silang laminasi-paku, Tjondro 2013c.

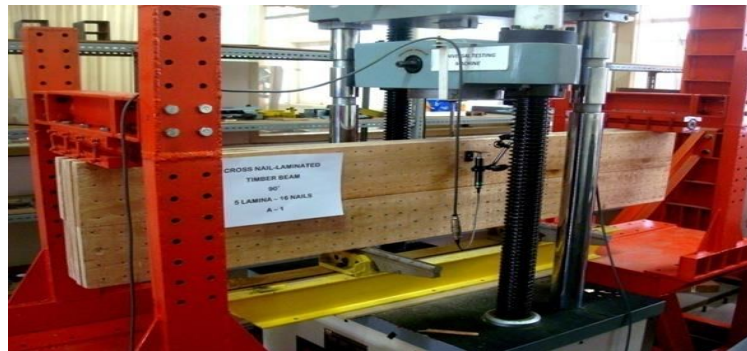
Bagian studi pustaka ini merupakan hasil penelitian dengan dana mandiri dan hasilnya sudah dipublikasikan pada Konferensi Nasional Teknik Sipil 7 (KoNTekS 7), Surakarta, 24-25 Oktober 2013. dengan judul makalah *Kuat lentur dan perilaku balok papan kayu laminasi silang dengan paku.*

Berbeda dengan yang umumnya dilakukan, balok kayu laminasi dalam penelitian Tjondro, 2013c ini terbuat dari lima lapis papan-papan kayu yang disusun secara bersilangan tegaklurus dan bersudut seratnya dan digabungkan menggunakan paku antara lapisan-lapisannya. Penampang papan dengan ukuran tebal dan lebar adalah 20 mm x 180 mm. Panjang papan horizontal 1800 mm dan panjang papan vertikal 360 mm. Dimensi total benda uji adalah 100 mm x 360 mm x 1800 mm. Papan-papan dalam arah vertikal diperlukan untuk menggabungkan papan-papan kayu horizontal yang lebih dari 1 buah papan agar mendapatkan tinggi balok yang lebih besar.



Gambar 2.4. Tampak atas benda uji balok papan kayu laminasi silang dengan paku

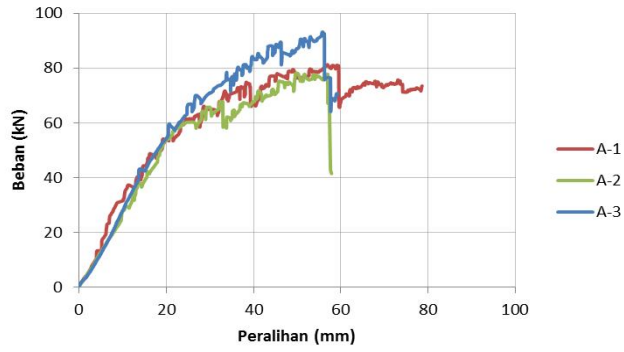
Benda uji diuji dengan *third point loading test* seperti Gambar 2.5 sesuai dengan ASTM D198-05a. Lendutan dari pengukuran UTM adalah pada $\frac{1}{3}$ bentang, dan lendutan pada tengah bentang diukur dengan menggunakan tambahan LVDT. Panjang total benda uji 1800 mm, bentang uji 1650 mm dengan 2 buah beban masing-masing sebesar $\frac{1}{2}$ P dan berjarak $\frac{1}{3}$ bentang uji dari masing-masing perletakan.



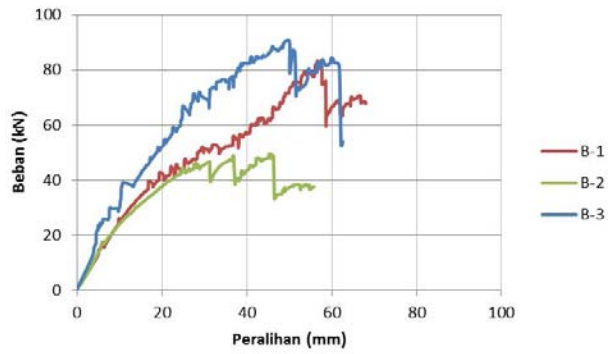
Gambar 2.5. Pengujian benda uji pada Universal Testing Machine dengan *third point loading*

LVDT digunakan untuk mengukur lendutan di tengah bentang karena lendutan yang diukur oleh UTM adalah lendutan pada $\frac{1}{3}$ bentang. Pada kayu yang berberat jenis rendah kadangkala konsentrasi tegangan pada perletakan atau titik beban mengalami deformasi lokal, hal ini akan menyebabkan lendutan yang diukur oleh UTM menjadi lebih besar. Dalam pengujian ini juga dijumpai kesulitan karena kontribusi deformasi/slip dari paku termasuk dalam deformasi total. Sehingga observasi yang akurat hanya dapat dilakukan pada besarnya beban dan kuat lentur saja.

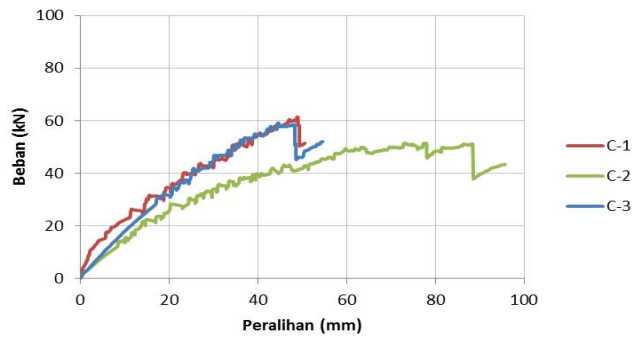
Grafik selengkapnya dari ke 12 benda uji dapat dilihat pada Gambar 2.6, 2.7, 2.8 dan 2.9. Dan data hasil observasi berupa batas daerah elastis, titik ultimit atau batas beban maksimum.



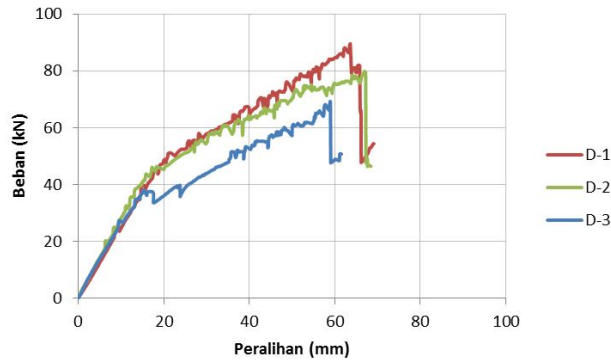
Gambar 2.6. Grafik beban vs lendutan hasil uji balok papan kayu silang laminasi-paku, papan vertikal kontinu $\alpha = 90^\circ$ (benda uji A)



Gambar 2.7. Grafik beban vs lendutan hasil uji balok papan kayu silang laminasi-paku, papan vertikal kontinu $\alpha = 45^\circ$ (benda uji B)



Gambar 2.8. Grafik beban vs lendutan hasil uji balok papan kayu silang laminasi-paku, papan vertikal diskontinu $s = 100$ mm (benda uji C)



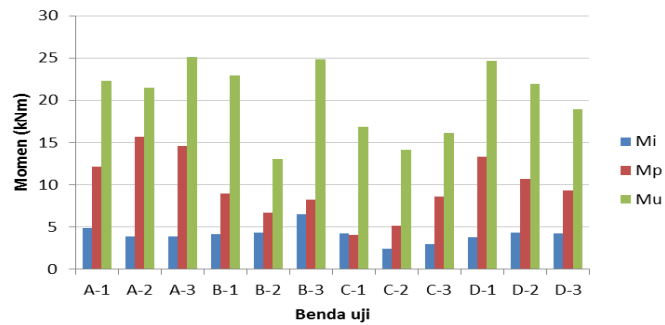
Gambar 2.9. Grafik beban vs lendutan hasil uji balok papan kayu silang laminasi-paku, papan vertikal diskontinu $s = 200$ mm (benda uji D)

Pada benda uji A dan D terlihat hasilnya dari ke tiga benda uji kekuatannya cukup seragam, sedangkan pada benda uji B dan C cukup berbeda. Hal ini menunjukkan persilangan bersudut 45° (benda uji B) dan $s = 100$ mm (benda uji C) kurang memberikan hasil yang baik. Penggunaan paku sebagai penghubung memberikan sifat daktilitas pada balok papan kayu silang, balok mempunyai cukup daktilitas antara 2,59 – 10,63 seperti dalam Tabel 2.1. Sedangkan kekuatan atau keruntuhan dari balok bergantung pada kuat lentur dari papan-papan. Kekuatan lentur untuk batas proporsional ketiga benda uji untuk varian yang sama cukup seragam. Pada umumnya keruntuhan akibat tegangan tarik akibat lentur. Besarnya momen pada batas proporsional dapat dihitung dengan $M_p = P_p \cdot L/6$.

Tabel 2.1. Data beban dan lendutan hasil uji eksperimental

No	Δ_i (mm)	P_i (kN)	Δ_p (mm)	P_p (kN)	Δ_u (mm)	P_u (kN)	μ_u	M_i (kNm)	M_p (kNm)	M_u (kNm)
A-1	5,5	17,85	14,64	44,23	59,32	80,93	4,05	4,91	12,16	22.26
A-2	5,5	14,15	21,72	56,88	56,32	78,10	2,59	3,89	15,64	21.48
A-3	5,5	14,01	19,28	53,01	53,04	91,45	2,75	3,85	14,58	25.15
B-1	5,5	15,08	13,96	32,68	57,48	83,31	4,12	4,15	8,99	22.91
B-2	5,5	15,58	10,08	24,27	36,08	47,37	3,58	4,28	6,67	13.03
B-3	5,5	23,72	7,76	30,01	49,96	90,47	6,44	6,52	8,25	24.88
C-1	5,5	15,29	4,60	14,80	48,92	61,37	10,63	4,20	4,07	16.88
C-2	5,5	8,77	13,00	18,71	77,72	51,45	5,98	2,41	5,15	14.15
C-3	5,5	10,69	18,24	31,33	48,08	58,52	2,64	2,94	8,62	16.09
D-1	5,5	13,86	20,60	48,56	63,60	89,55	3,09	3,81	13,35	24.63
D-2	5,5	15,67	13,88	38,95	67,00	79,78	4,83	4,31	10,71	21.94
D-3	5,5	15,29	13,20	33,88	58,88	69,03	4,46	4,20	9,32	18.98

Pada batas lendutan ijin 5,5 mm, besarnya momen lentur (M_i) mendekati nilai yang sama untuk semua variasi benda uji. Benda uji A dengan papan vertikal kontinu dengan sudut persilangan 90° memberikan hasil kuat lentur pada batas proporsional (M_p) yang paling besar dibandingkan ke tiga variasi yang lain. Keseragaman mutu dari papan yaitu berat jenis, arah serat dan mata kayu yang ada sangat mempengaruhi kekuatan batas dari momen lentur (M_u) dari benda uji, terlihat pada Gambar 2.10 cukup acak.



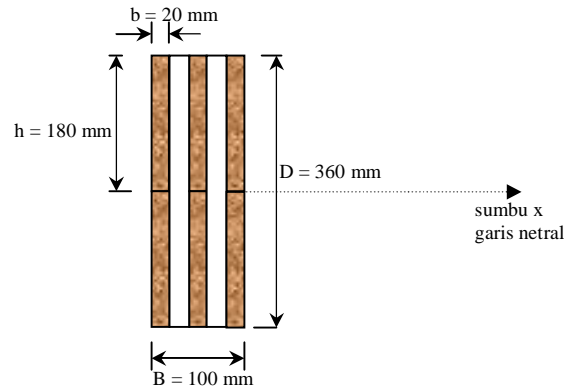
Gambar 2.10. Perbandingan kuat lentur

Besarnya lendutan di $\frac{1}{3}$ bentang pada batas elastis, Δ_p , akibat dari *two point loading* dan dengan memperhitungkan deformasi geser adalah:

$$\Delta_p = \frac{5 \cdot P_p \cdot L^3}{324 \cdot (EI_{xe})} + \frac{P_p \cdot L}{5 \cdot G \cdot A_e} \quad (2.1)$$

- dengan: P_p = Beban proporsional total (N)
 L = Bentang pengujian (mm)
 (EI_{xe}) = kekakuan efektif ($N \cdot mm^2$)
 G = modulus elastisitas (N/mm^2), diasumsikan $(1/20) E$
 A_e = luas penampang efektif papan-papan horisontal (mm^2)

Momen Inersia efektif penampang dari gabungan papan-papan kayu seperti Gambar 2.11 dapat dihitung dengan persamaan (2.3). Faktor k untuk memperhitungkan penampang kayu yang tidak solid karena merupakan gabungan dari papan-papan kayu. Bagian papan-papan yang vertikal diabaikan kontribusinya terhadap momen inersia karena antar papan vertikal tidak saling berhubungan. Modulus elastisitas penampang dianggap seragam.



Gambar 2.11. Penampang balok papan kayu laminasi silang

Momen inersia efektif dapat dihitung dengan:

$$I_{xe} = 6\left(\frac{1}{12}b \cdot h^3 + k \cdot b \cdot h\left(\frac{h}{2}\right)^2\right) \quad (2.2)$$

Sehingga,

$$I_{xe} = \frac{1}{2}b \cdot h^3 (1 + 3k) \quad (2.3)$$

Dengan data Δ_p dan P_p dari Tabel 2 dan disubstitusikan ke persamaan (1) dan (3), didapat nilai k atau faktor koreksi kekakuan, hasilnya sangat kecil antara 0 – 0,15. Sebagai pendekatan untuk perhitungan teoritis dapat diambil besarnya momen inersia seperti pada persamaan (4).

$$I_{xe} = \frac{1}{2}b \cdot h^3 \quad (2.4)$$

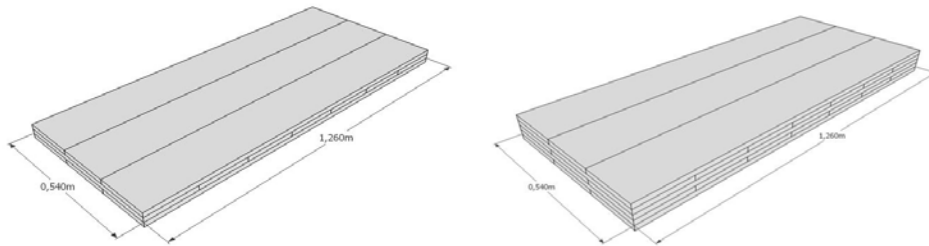
Ringkasan:

- Balok papan kayu silang laminasi-paku dalam penelitian ini dapat digunakan sebagai alternatif balok kayu rekayasa, dengan panjang bentang 1,65 m dapat menerima beban total antara 10 sampai dengan 15 kN pada syarat lendutan ijin.
- Kekakuan dari balok papan kayu silang laminasi-paku lebih rendah dibandingkan menggunakan perekat, sebagai pendekatan dapat digunakan besarnya momen inersia seperti pada persamaan (4).
- Daktilitas yang cukup antara 2,59 – 10,63 dari balok papan kayu silang laminasi-paku menunjukkan pengaruh dari penggunaan paku
- Pemilihan papan-papan kayu yang cukup seragam berat jenisnya dan bebas dari cacat akan memberikan kekuatan yang lebih seragam.

2.3 Papan lantai kayu silang laminasi paku, Tjondro 2013a

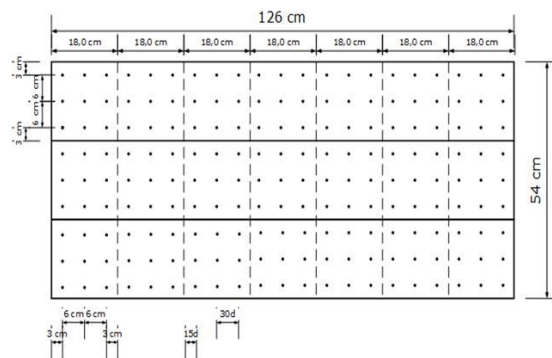
Bagian dari studi referensi ini adalah hasil penelitian dengan dana pribadi yang telah dipublikasikan di "The 6th Civil Engineering Conference in The Asian Region, Jakarta, August 20-22, 2013". Dengan judul makalah *The flexural strength and behaviour of cross nail-laminated timber floor*.

Pada studi ini paku digunakan untuk menggabungkan Antara lapisan-lapisan papan. Benda uji papan lantai terbuat dari kayu cepat tumbuh, *Albasia/ Albizia falcata* yang mempunyai berat jenis sebesar 0.30 dan modulus elastisitas sebesar 4200 MPa. Kadar air saat pengujian Antara 13-15 %. Benda uji bervariasi terbuat dari 3 dan 5 lapis papan kayu, saling bersilangan 90° dan dipaku seperti pada Gambar 2.12. Ketebalan dari papan kayu adalah 20 mm, dan lebar 200 mm.



Gambar 2.12 Benda uji papan kayu silang laminasi-paku

Jumlah paku yang digunakan adalah 9 buah per luas 180 mm² seperti terlihat pada Gambar 2.13. Berat dari panel lantai ini hanya sekitar 30 kg/m² dan 50 kg/m² untuk 3 dan 5 lapis, sangat ringan bila dibandingkan dengan pelat lantai dari beton bertulang. Berat yang ringan ini sangat menguntungkan karena gaya inersia akibat beban gempa akan relative kecil karena massa lantai yang kecil.



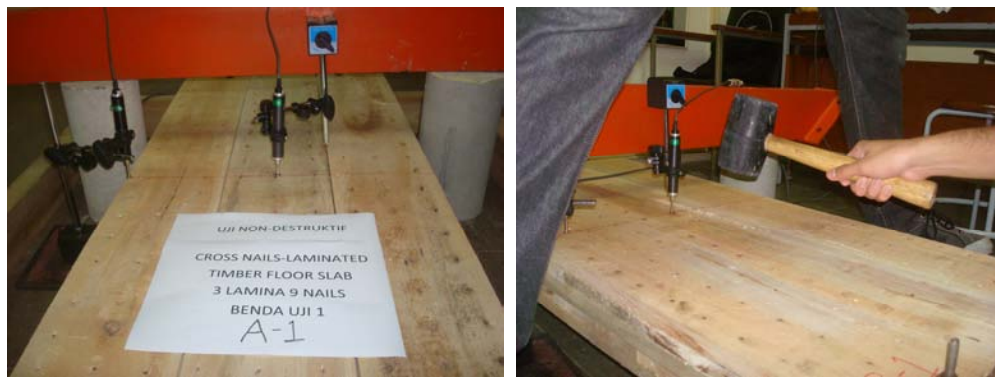
Gambar 2.13 Konfigurasi paku pada pelat lantai (CNLT), 9 paku per 180 mm²

Sejumlah enam buah papan lantai kayu silang laminasi-paku (CNLT) diuji dan dianalisis dengan uji non-destruktif dengan vibrasi dan juga destruktif *static two line loading test*. Setiap tipe lantai mempunyai 3 buah benda uji. Hasil uji statik berupa kurva beban-peralihan akan dikonversi

menjadi kurva momen-peralihan. Observasi untuk *static loading test* dilakukan pada kondisi beban pada titik proporsional dan ultimit. Hasil uji getaran berupa kurva peralihan-waktu dan dapat digunakan untuk menganalisis besarnya frekuensi dan redaman dengan *Fourier analysis*, Clough, 2003.

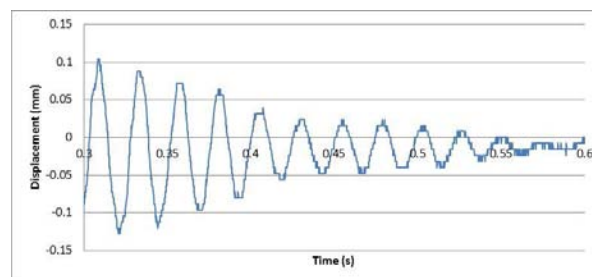
Uji Vibrasi:

Properti dinamik dapat diperoleh dengan uji getaran pada pada pelat lantai papan kayu silang laminasi paku. Pelat lantai diatur terletak pada dua perletakan, LVDT digunakan untuk mengukur peralihan vertikal saat uji getaran. Agar terjadi getaran, palu karet digunakan untuk memukul lantai secara tegaklurus. Pengaturan pengujian terlihat pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14 Uji vibrasi pada papan lantai CNLT

Hasil uji vibrasi di plot sebagai kurva peralihan dan waktu seperti pada Gambar 2.15. Hasil analisis dengan *Fourier analysis*, berupa frekuensi alami dan redaman di tabelkan seperti dalam Tabel 2.2.



Gambar 2.15 Kurva tipikal peralihan-waktu hasil uji getaran pada pelat papan lantai.

- Rijiditas dinamik papan lantai.
Rijiditas EI dapat dihitung dari frekuensi alami yang didapat, hubungan dengan frekuensi alami untuk balok/pelat di atas dua perletakan adalah seperti pada persamaan 2.5:

$$\omega = \frac{\pi^2}{L^2} \cdot \sqrt{\frac{E_d \cdot I}{\bar{m}}}, \quad (2.5)$$

Dengan ω frekuensi alami dalam rad/s, L adalah panjang bentang dalam mm dan \bar{m} adalah massa per unit panjang. I dan E_d adalah momen inersia dan modulus elastik dinamik.

- Rasio redaman

Rasio redaman dapat diperoleh dari hubungan *logarithmic decrement*

$$\delta = \ln \frac{x_1}{x_2} = \frac{2\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}, \quad (2.6)$$

Dengan δ adalah *logarithmic decrement* dan ξ adalah rasio redaman.

Tabel 2.2 menunjukkan properti dinamik dari pelat lantai CNLT. Terlihat pada papan lantai dengan 3 lapisan hasil properti dinamiknya lebih seragam dibandingkan dengan papan lantai yang terbuat dengan 5 lapis papan. Modulus elastisitas rata-rata dari uji dinamik adalah 5672 MPa untuk papan lantai 3 lapis dan 4299 MPa untuk papan lantai 5 lapis. Rasio redaman berkisar Antara 3.1% - 4.1%. Harga redaman ini mendekati harga rasio redaman yang umumnya ada pada struktur kayu, yaitu 2% - 5%.

Tabel 2.2 Harga rata-rata frekuensi alami, rijiditas dinamik dan rasio redaman.

Benda uji	panjang [mm]	Total massa m [kg]	Frekuensi alami, ω [rad/s]	Rijiditas dinamik, $E_d I$ [Nmm ²]	Rasio redaman, ξ [%]	Modulus of Elastisitas, E_d [MPa]
3-lapis lantai CNLT (A)	1160	12.5	274.8	13.93×10^9	3.1	5901
	1160	13.4	238.6	11.30×10^9	3.8	6254
	1160	12.3	251.7	11.54×10^9	4.1	4860
Rata-rata:				12.26×10^9	3.7	5672
5-lapis lantai CNLT (B)	1160	24.0	224.2	17.86×10^9	3.8	5840
	1160	26.3	178.1	12.36×10^9	4.0	3967
	1160	24.5	169.3	10.40×10^9	3.6	3099
Rata-rata:				13.54×10^9	3.8	4299

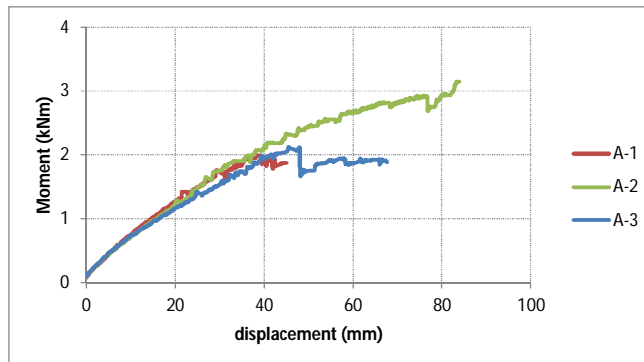
Uji Lentur:

Setelah uji vibrasi atau getaran benda uji pelat lantai diuji destruktif dengan *two point loading test* seperti ada Gambar 2.16. Beban dan peralihan pada batas elastis atau proporsional, dan ultimit diobservasi untuk menentukan besarnya kuat lentur pada level beban yang berbeda tersebut.

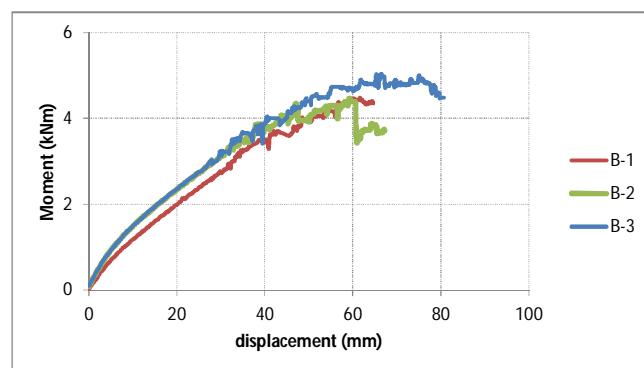


Gambar 2.16 Uji lentur dengan *two point loading*

Beban yang terjadi dikonversi menjadi momen ($\frac{1}{2} L$ dari masing-masing bentang) kurva dari momen vs peralihan dapat dilihat pada Gambar 2.17 dan Gambar 2.18. Keruntuhan yang terjadi umumnya adalah tarik akibat lentur dan tidak terjadi gagal geser atau leleh pada paku.



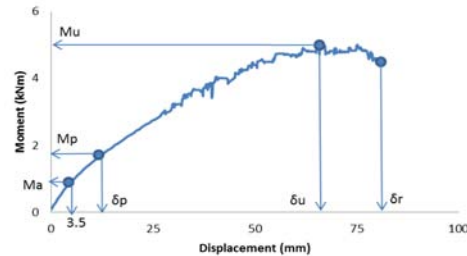
Gambar 2.17 Kurva momen – peralihan pada pelat lantai dengan 3 lapis



Gambar 2.18 Kurva momen – peralihan pada pelat lantai dengan 5 lapis

Dari hasil observasi dengan titik-titik seperti pada gambar 2.19 yaitu M_a , M_p , M_u , δ_a , δ_p dan δ_r dapat ditentukan besarnya. Analisis dari faktor keamanan dan angka daktilitas ditabelkan seperti pada Tabel 2.3. Lendutan ijin δ_a sebesar $1/300$ bentang L was adalah di bawah lendutan batas

proporsional δ_p , dan lendutan pada papan lantai dengan 5 lapis papan hasilnya dekat dengan lendutan pada batas proporsional. Momen pada batas ultimit jauh lebih besar dibandingkan dengan momen pada batas proporsional dan juga angka daktilitas sebesar 4.22 – 16.14, akan memberikan factor keamanan yang mencukupi.



Gambar 2.19 Titik-titik observasi, M_a , M_p , M_u , δ_a , δ_p dan δ_r

Tabel 2.3 Faktor keamanan dan angka daktilitas

Benda uji	M_a [kNm]	δ_a [mm]	M_p [kNm]	δ_p [mm]	M_u [kNm]	δ_r [mm]	M_u/M_p	δ_r/δ_p
A-1	0.3310	3.50	0.6860	8.72	1.9980	45.00	2.91	5.16
A-2	0.3413	3.50	1.2031	19.76	3.1487	83.40	2.62	4.22
A-3	0.3447	3.50	0.7735	11.32	1.9217	67.64	2.48	5.98
B-1	0.5089	3.50	0.8584	6.52	4.4856	64.64	5.23	9.91
B-2	0.7006	3.50	0.9330	5.00	4.4719	67.24	4.79	13.45
B-3	0.7332	3.50	0.9364	5.00	5.0387	80.68	5.38	16.14

A: 3-lapis, B: 5-lapis

Rijiditas statik dapat dihitung dengan persamaan mekanika bahan pada umumnya, Gere, 2001. Berdasarkan uji dinamik dan statik, rasio rijiditas dari uji dinamik terhadap statik dari pelat lantai adalah seperti dalam Tabel 2.4. Besaran rasio ini dapat digunakan untuk memprediksi rijiditas statik dari besarnya rijiditas dinamik yang diperoleh dari uji non-destruktif dengan vibrasi.

Tab.2.4 Rasio rijiditas dari uji dinamik terhadap uji statik

Benda uji	Rijiditas dinamik 10^9 [N/mm ²]	Rijiditas statik 10^9 [N/mm ²]	Rasio Dinamic/Statik
A-1	7.15	13.93	1.95
A-2	6.21	11.30	1.82
A-3	6.96	11.54	1.66
B-1	11.78	17.86	1.52
B-2*	13.97	12.36	0.88
B-3*	13.43	10.40	0.77

A: 3-lapis, B: 5-lapis

Besarnya beban juga dapat dikonversi menjadi beban terbagi rata berdasarkan besarnya lendutan ijin sebesar $1/300 L$, dari perhitungan konversi pelat lantai CNLT tersebut dapat memikul beban sebesar 2.5 kPa dan 4.5 kPa untuk masing-masing tebal 3 lapis dan 5 lapis.

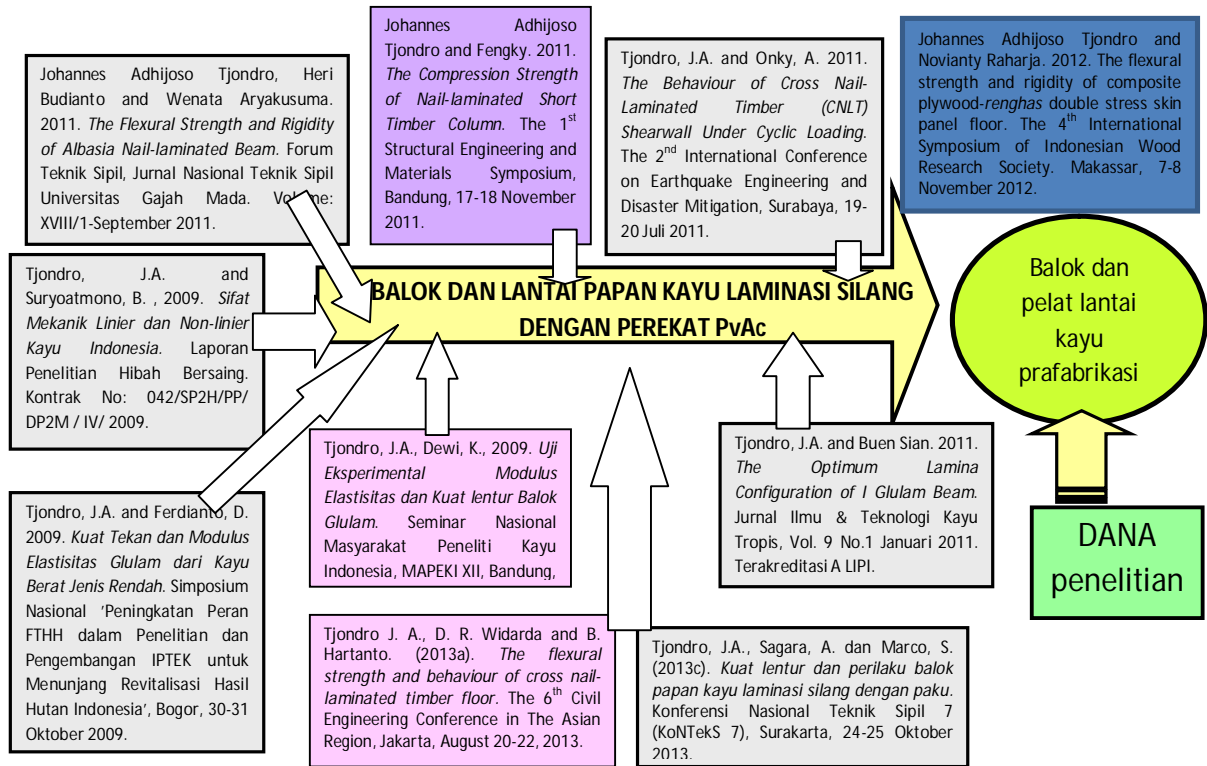
Ringkasan:

- Kayu albasia yang digunakan dapat memenuhi syarat untuk pambatan papan lantai CNLT
- Prediksi rijiditas statik dapat diperoleh dengan memprediksi besarnya rijiditas dinamik yang diperoleh dari uji non-destruktif dengan vibrasi
- Papan lantai CNLT dengan 3 lapis dapat memikul beban 2.5 kPa, yang merupakan beban hidup umumnya pada bangunan perkantoran/apartemen
- Angka redaman sebesar 3% - 4% seperti umumnya pada bangunan atau struktur kayu.

BAB 3

ROAD MAP DAN METODE PENELITIAN

Bagan alir penelitian seperti pada Gambar 3.1 menggambarkan apa yang sudah dilaksanakan peneliti dan apa yang akan dikerjakan dalam 2 – 3 tahun dalam bentuk *fishbone diagram*.



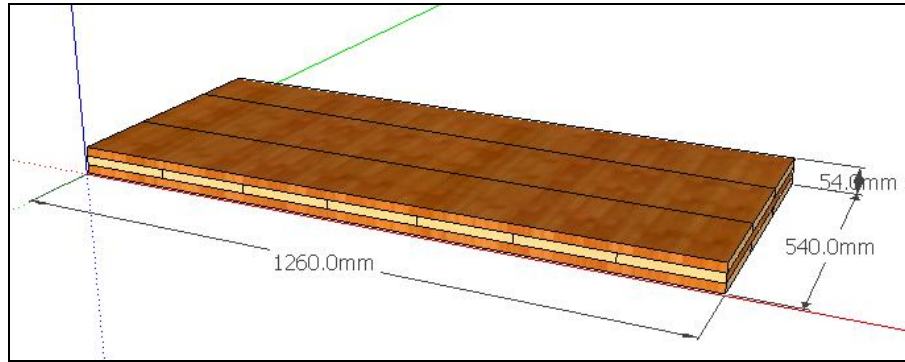
Gambar 3.1 Road Map Penelitian Dinding, Balok dan Papan Lantai Kayu Laminasi

Metode penelitian adalah dengan uji eksperimental dan pengembangan teori.

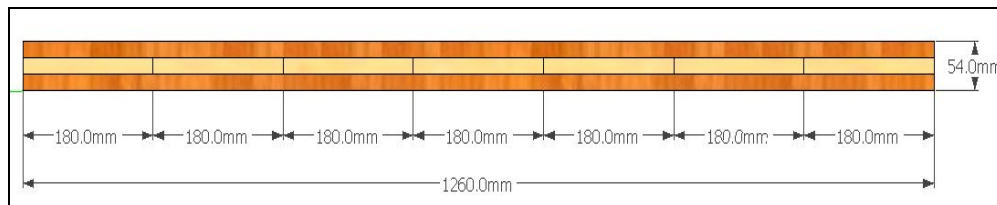
Rencana benda uji adalah sebagai berikut:

Variasi benda uji pelat yang digunakan adalah :

- Pelat lantai kayu laminasi silang 3 lapisan (Benda Uji A)

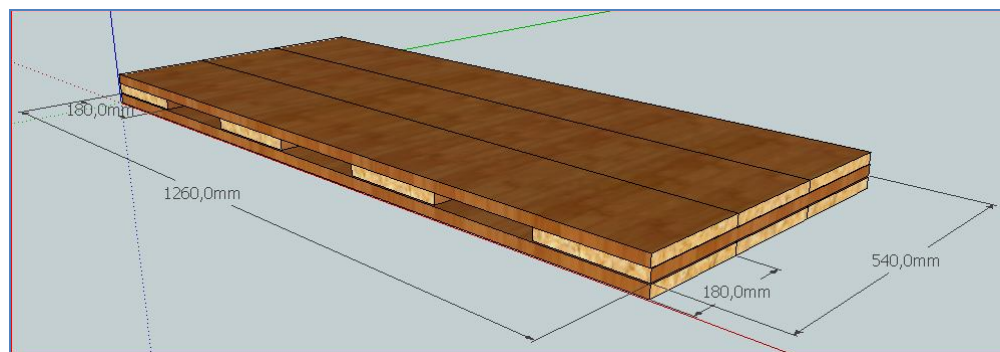


Gambar 3.2 Penampang Benda Uji A

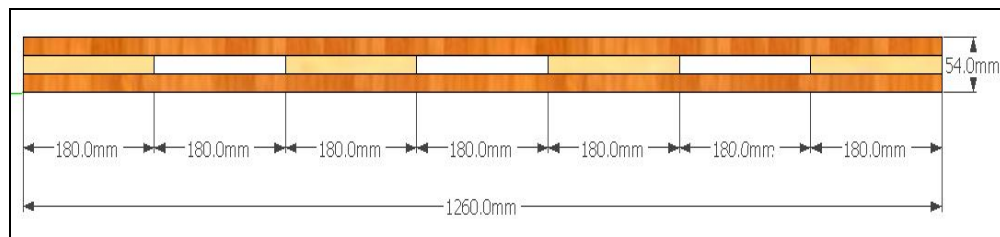


Gambar 3.3 Tampak sisi panjang penampang benda uji A

- Pelat kayu laminasi 3 lapisan dengan rongga di lapisan silangnya (Benda Uji B)

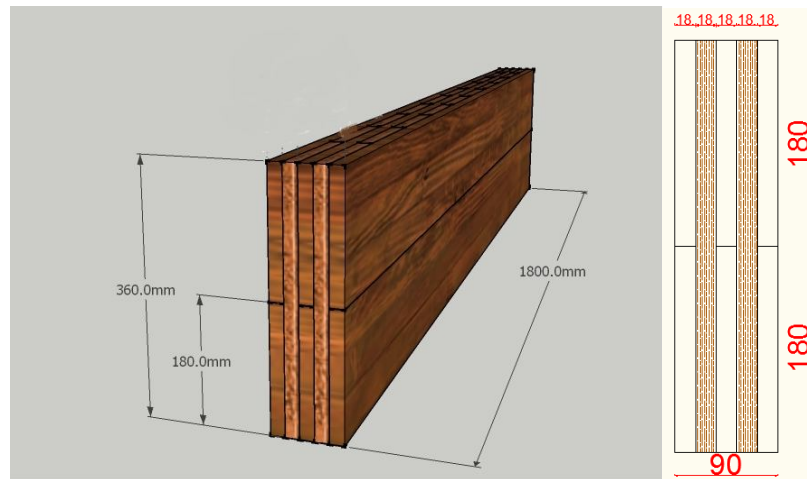


Gambar 3.4 Penampang Benda Uji B



Gambar 3.5 Tampak sisi panjang penampang benda uji B

Benda uji balok (Benda uji C) terdiri dari 3 buah benda uji adalah sebagai berikut:



Gambar 3.5 Tampak sisi panjang penampang benda uji C

Jadwal pelaksanaan penelitian dibuat dalam bentuk *bar chart* sebagai berikut:

	PEBRUARI	MARET	APRIL	MEI	JUNI	JULI	AGUSTUS	SEPTEMBER	OKTOBER
1 PROPOSAL	■								
2 PEMBELIAN BAHAN		■							
3 PENGERINGAN DAN FINISHING		■	■						
4 PEMBUATAN BENDA UJI		■	■						
5 TEST MATERIAL			■	■					
6 TEST BENDA UJI BALOK CLT			■	■	■				
7 TEST BENDA UJI PELAT LANTAI CLT			■	■	■				
8 ANALISIS					■	■			
9 MAKALAH							■	■	
10 LAPORAN AKHIR								■	■

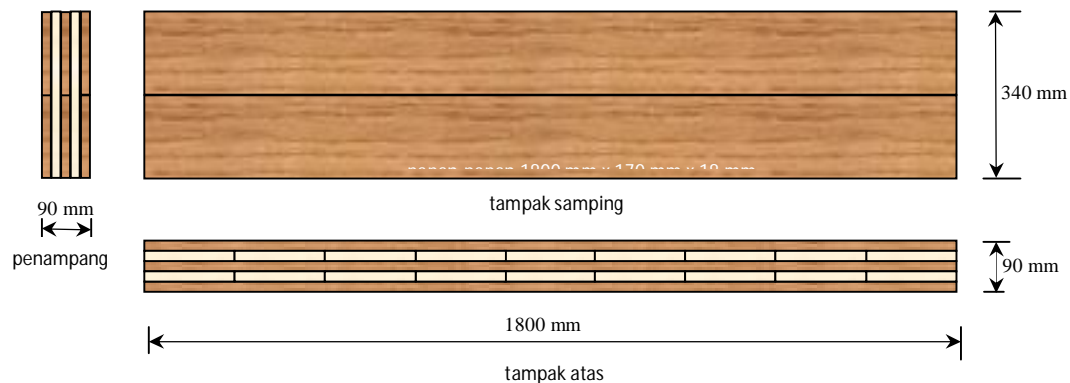
BAB 4

KUAT LENTUR DAN PERILAKU BALOK PAPAN KAYU LAMINASI SILANG DENGAN PEREKAT

Johannes Adhijoso Tjondro dan Benny Kusumo

4.1 PENDAHULUAN

Kebutuhan akan material untuk konstruksi bangunan yang meningkat termasuk balok kayu, dan berkurangnya kayu dalam dimensi yang besar dapat dipenuhi dengan kayu rekayasa seperti glulam dan *Cross Laminated Timber*. Dalam perkembangan kayu rekayasa saat ini *Cross Laminated Timber* sedang berkembang dengan pesat penggunaannya untuk bangunan bertingkat, terutama di Canada, Amerika, Inggris dll, Zumbunnen (2012), Yeh (2012). Balok kayu laminasi dalam penelitian ini terbuat dari lima lapis papan-papan kayu Albasia yang disusun secara bersilang tegak lurus seratnya dan dengan digabungkan menggunakan perekat antara lapisannya. Penampang papan dengan ukuran tebal dan lebar adalah 18 mm x 170 mm. Panjang papan horizontal 1800 mm dan panjang papan vertikal 340 mm. Dimensi total benda uji adalah 90 mm x 340 mm x 1800 mm seperti terlihat pada Gambar 4.1. Papan-papan dalam arah vertikal diperlukan untuk menggabungkan papan-papan kayu horizontal yang terdiri dari 2 buah papan agar mendapatkan tinggi balok yang lebih besar.



Gambar 4.1. Benda uji balok papan kayu laminasi silang dengan perekat PVAc.

4.2 BAHAN DAN METODE

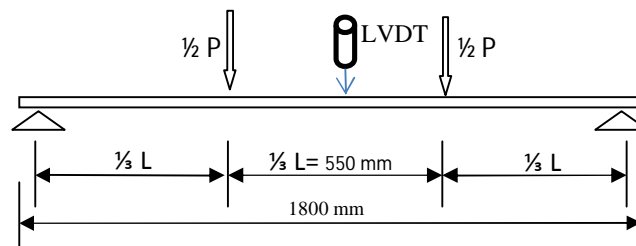
Dalam penelitian ini digunakan papan-papan kayu dari kayu cepat tumbuh Albasia dengan harga rata-rata berat jenis dari pengujian benda uji bebas cacat sebesar 0,31, modulus elastisitas 5722 MPa dan kuat lentur/ *modulus of rupture* 35 MPa. Perekat yang digunakan adalah perekat yang

pada umumnya digunakan yaitu lem putih atau PvAc. Kuat geser lekatan diuji dengan dua macam bidang kontak dengan arah serat saling sejajar dan arah serat saling tegaklurus. Hasil uji kuat geser perekat seperti tercantum pada Tabel 1, kuat geser perekat dengan bidang kontak arah serat yang saling sejajar lebih besar dibandingkan jika bidang kontak dengan arah serat saling tegaklurus.

Tabel 4.1. Kuat geser perekat, Tjondro 2013b

serat sejajar			serat saling tegaklurus		
No	F_v (MPa)	$F_{v_{rata2}}$	No	F_v (MPa)	$F_{v_{rata2}}$
S1	3,56		T1	2,36	
S2	4,50		T2	2,08	2,35
S3	5,24	3,84	T3	2,17	
S4	2,04		T4	2,79	

Benda uji diuji dengan *third point loding test* seperti Gambar 2 sesuai dengan ASTM D198-05a. Lendutan dari pengukuran UTM adalah pada $\frac{1}{3}$ bentang, dan lendutan pada tengah bentang diukur dengan menggunakan tambahan LVDT. Panjang total benda uji 1800 mm dan bentang uji 1650 mm dengan 2 beban masing-masing berjarak $\frac{1}{3}$ bentang uji dari perletakan.



Gambar 4.2. Skema pengujian balok dengan *third point loading*



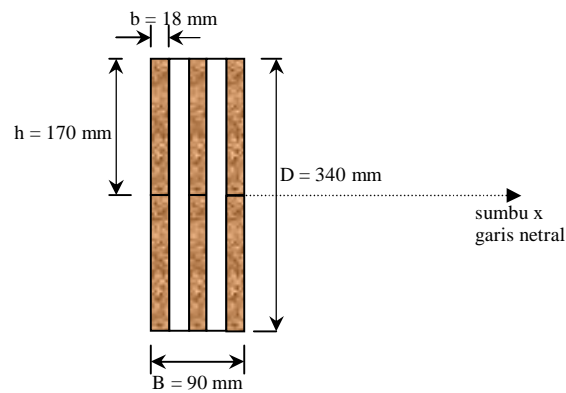
Gambar 4.3. Pengujian benda uji pada UTM dengan *third point loading*

Besarnya lendutan di tengah bentang pada batas elastis, Δ_p , akibat dari *two point loading* dan dengan memperhitungkan deformasi geser adalah:

$$\Delta_p = \frac{23P_p \cdot L^3}{1296 \cdot (EI)_e} + \frac{P_p \cdot L}{5 \cdot G \cdot A_e} \quad (4.1)$$

- dengan: P_p = Beban proporsional total (N)
 L = Bentang pengujian (mm)
 $(EI)_e$ = kekakuan efektif ($N \cdot mm^2$)
 G = modulus elastisitas (N/mm^2), diasumsikan $(1/20) E$
 A_e = luas penampang efektif papan-papan horisontal (mm^2)

Momen Inersia efektif penampang dari gabungan papan-papan kayu seperti Gambar 4 dapat dihitung dengan persamaan (3). Faktor k untuk memperhitungkan penampang kayu yang tidak solid karena merupakan gabungan dari papan-papan kayu. Bagian papan-papan yang vertikal diabaikan kontribusinya terhadap momen inersia karena antar papan vertikal tidak saling berhubungan. Modulus elastisitas penampang dianggap seragam.



Gambar 4. Penampang balok papan kayu laminasi silang

Momen inersia efektif dapat dihitung dengan:

$$I_{xe} = 6\left(\frac{1}{12}b \cdot h^3 + k \cdot b \cdot h\left(\frac{h}{2}\right)^2\right) \quad (4.2)$$

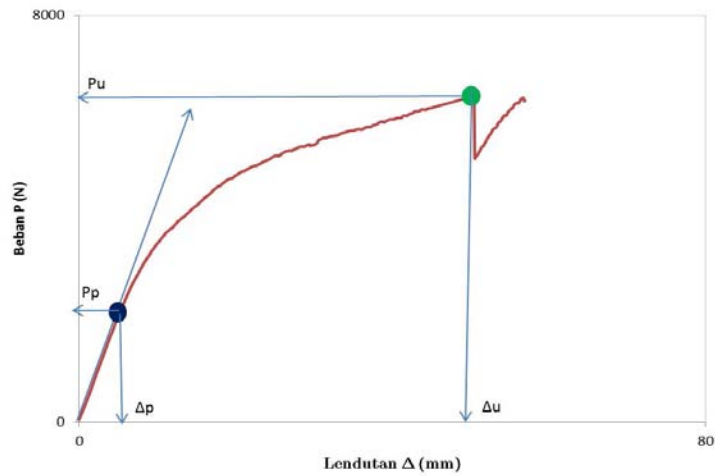
Sehingga,

$$I_{xe} = \frac{1}{2}(b \cdot h^3 + 3k \cdot b \cdot h^3) \quad (4.3)$$

4.3 HASIL UJI EKSPERIMENTAL

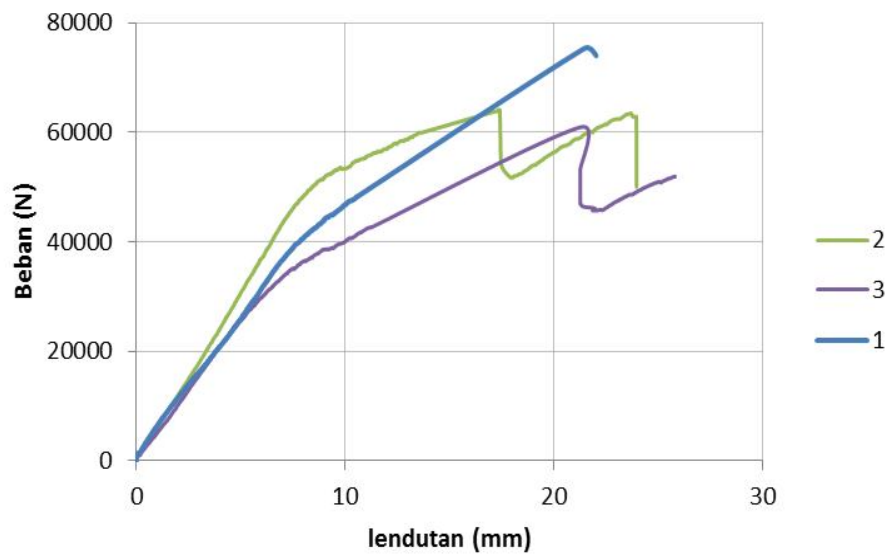
Grafik tipikal antara lendutan dan beban diplot dan titik-titik pada batas proporsional yang merupakan batas daerah elastis, titik ultimit atau batas beban maksimum, seperti terlihat pada

Gambar 5. Beban adalah beban total dari dua buah beban terpusat pada jarak $\frac{1}{4}L$ dari masing-masing tumpuan.



Gambar 4.5. Titik-titik observasi pada grafik beban vs lendutan dari hasil uji balok

Grafik selengkapnya dari ke 3 benda uji dapat dilihat pada Gambar 4.6. Data hasil observasi ditabelkan seperti dalam Tabel 4.2.



Gambar 4.6. Grafik beban vs lendutan hasil uji balok papan kayu laminasi silang

Walaupun menggunakan perekat, balok mempunyai cukup daktilitas antara 2,86 – 3,51 seperti dalam Tabel 2.

Tabel 4.2. Data beban dan lendutan hasil uji eksperimental, Tjondro 2013b

Benda uji	P _p (kN)	Δ _p (mm)	P _u (kN)	Δ _u (mm)	μ
1	38,93	7,49	75,44	21,45	2,86
2	47,98	7,91	64,06	17,39	2,20
3	30,00	6,05	60,92	21,24	3,51

4.4 ANALISIS DAN DISKUSI

Dengan menggunakan persamaan (4.1) dan (4.3) dan modulus elastisitas rata-rata sebesar 5722 MPa dan asumsi nilai modulus geser 1/20 dari modulus elastisitas akan dapat dihitung besarnya nilai k. Harga P_p disubstitusikan dalam persamaan (1) dan dengan cara *trial and error* untuk nilai k, tercapai nilainya saat besarnya lendutan Δ_p sama besar dengan harga Δ_p dari data eksperimental. Hasilnya dapat dilihat di Tabel 4.3, dengan nilai k antara 0,423 – 0,696.

Tabel 4.3. Faktor koreksi kekakuan k, Tjondro 2013b

Benda uji	P _p	Δ _p	b	h	A _e =6b·h	E	G=E/20	k
1	38,93	7,49	18	170	18360	5722	286,1	0,477
2	47,98	7,91	18	170	18360	5722	286,1	0,696
3	30,00	6,05	18	170	18360	5722	286,1	0,423

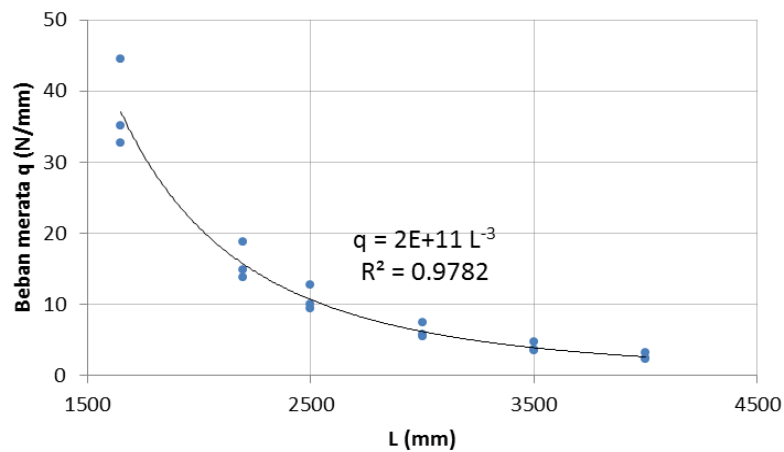
Nilai k tersebut dapat dipakai untuk disain balok papan kayu laminasi silang dengan panjang bentang yang lainnya. Konversi untuk panjang bentang lainnya menggunakan dasar kekakuan atau lendutan ijin Δ_i, karena syarat kekakuan lebih menentukan dari syarat kuat lentur. Contoh hasil konversi seperti pada Tabel 4.4 dan grafik dalam Gambar 4.7. Nilai q dicari dengan cara *trial and error* dengan menggunakan persamaan (4.4) dengan mengabaikan lendutan geser.

$$\Delta_i = \frac{5 \cdot q \cdot L^4}{384 \cdot (EI)_e} \quad (4.4)$$

Tabel 4.4. Konversi panjang bentang terhadap beban merata, Tjondro 2013b

L	Δ_i	b	h	I_e	E	G=E/20	k	q
(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm ⁴)	(N/mm ²)	(N/mm ²)		(kN/m)
1650	5.50	18	170	107491527	5722	286.1	0.477	35.05
1650	5.50	18	170	136542096	5722	286.1	0.696	44.50
1650	5.50	18	170	100328373	5722	286.1	0.423	32.70
2200	7.33	18	170	107491527	5722	286.1	0.477	14.78
2200	7.33	18	170	136542096	5722	286.1	0.696	18.78
2200	7.33	18	170	100328373	5722	286.1	0.423	13.80
2500	8.33	18	170	107491527	5722	286.1	0.477	10.07
2500	8.33	18	170	136542096	5722	286.1	0.696	12.80
2500	8.33	18	170	100328373	5722	286.1	0.423	9.40
3000	10.00	18	170	107491527	5722	286.1	0.477	5.83
3000	10.00	18	170	136542096	5722	286.1	0.696	7.41
3000	10.00	18	170	100328373	5722	286.1	0.423	5.45
3500	11.67	18	170	107491527	5722	286.1	0.477	3.68
3500	11.67	18	170	136542096	5722	286.1	0.696	4.67
3500	11.67	18	170	100328373	5722	286.1	0.423	3.43
4000	13.33	18	170	107491527	5722	286.1	0.477	2.46
4000	13.33	18	170	136542096	5722	286.1	0.696	3.13
4000	13.33	18	170	100328373	5722	286.1	0.423	2.30

Dari data pada Tabel 4.4, dapat dibuat korelasinya antara q dan L dalam grafik pada Gambar 4.7, di bawah ini.



Gambar 4.7. Grafik konversi terhadap beban merata vs bentang balok.

Dari grafik pada Gambar 4.7 atau Tabel 4.4, sebagai contoh untuk panjang bentang 4 m dapat menerima beban garis merata sebesar 2,3 kN/m (230 kg/m).

4.5 KESIMPULAN DAN SARAN

- Secara teoritis untuk perhitungan momen inersia penampang dapat menggunakan faktor k sebesar 0,42 - 0,69.
- Penggunaan perekat PvAc memberikan hasil yang baik dan pengerjaannya cukup mudah untuk merekatkan antara papan.
- Dengan ukuran penampang yang sama, konversi terhadap beban garis merata dapat dihasilkan dengan mudah menggunakan grafik konversi atau tabel yang tersedia.
- Balok papan kayu laminsai silang ini mempunyai daktilitas yang cukup besar antara 2,20 – 3,51.
- Mutu papan yang lebih seragam akan meningkatkan kekuatan balok dan pengerjaan perekatan yang lebih baik akan meningkatkan nilai k .

BAB 5

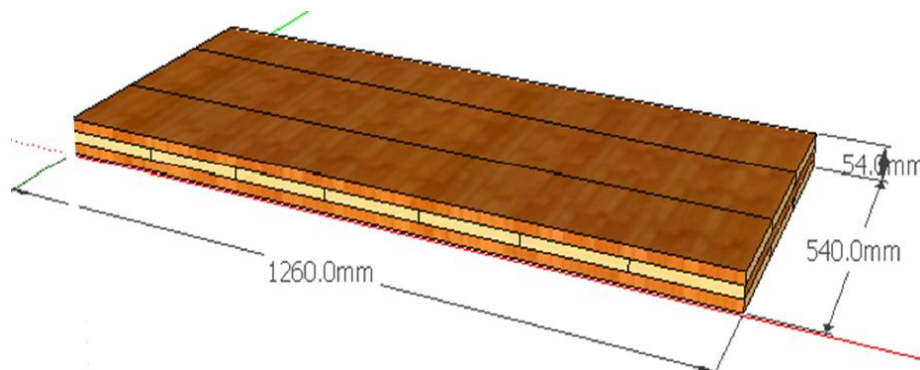
KUAT LENTUR DAN PERILAKU LANTAI PAPAN KAYU SILANG LAMINASI DENGAN PEREKAT

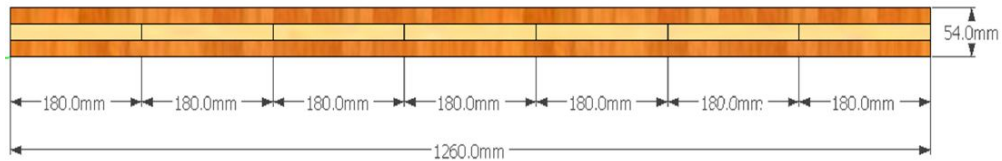
Johannes Adhijoso Tjondro dan Sandra Natalia

5.1 Pendahuluan

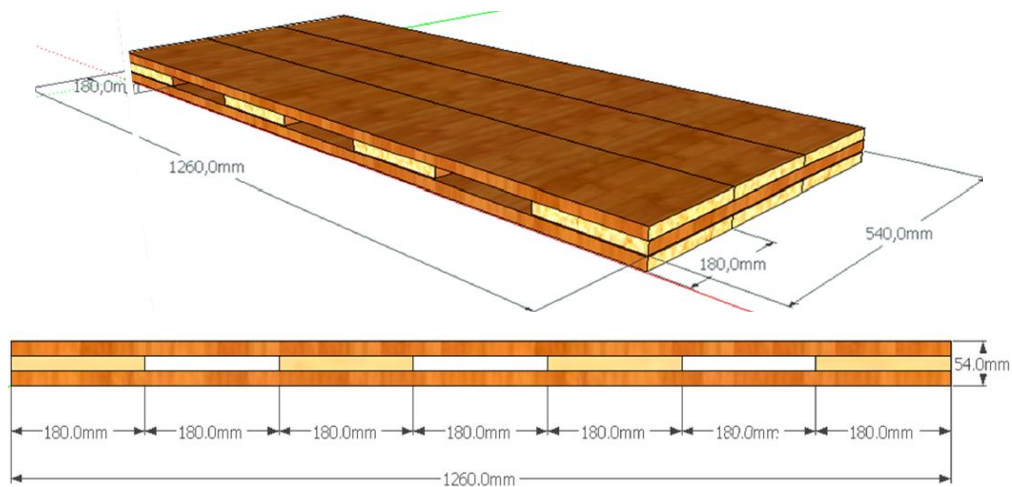
Kayu laminasi silang (cross laminated timber/CLT) menjadi elemen baru pada sistem konstruksi bangunan yang telah berkembang dengan pesat di Eropa dan Amerika Utara. Banyak bangunan bertingkat sedang dan bahkan beberapa buah dapat mencapai 10 lantai telah dibangun menggunakan cross laminated timber, diantaranya di Inggris, Swedia dan Australia. Sistem bangunan tersebut terbuat dari cross laminated timber dengan panel sebagai dinding penahan beban, lantai dan atap. Panel-panel tersebut sangat ringan dan mudah serta cepat dalam konstruksinya dan tidak memerlukan pondasi yang sangat besar, sangat menghemat biaya untuk mendirikan bangunan, Karacabeyli, 2013. CLT panel umumnya terbuat dari lapisan dengan jumlah ganjil yang saling tegak lurus dan direkatkan dengan perekat. Pada penelitian ini perekat jenis Pv.Ac digunakan untuk menggabungkan 3 buah lapisan papan kayu yang terbuat dari kayu cepat tumbuh yaitu albasia.

Benda uji terbuat dari 3 lapis papan kayu dengan variasi lapisan tengah penuh dan diskontinu, seperti terlihat pada Gambar 5.1 dan Gambar 5.2. Ketebalan dari papan kayu adalah 18 mm, dan lebarnya 180 mm, dengan dimensi total dari papan lantai sebesar 54 mm x 540 mm x 1260 mm. Jumlah benda uji adalah enam buah dan papan lantai diuji dengan *destructive static two line loading*. Tiap variasi benda uji yaitu lapisan tengah penuh atau diskontinu mempunyai 3 buah benda uji. Hasil uji berupa kurva beban-peralihan yang dapat dikonversi ke kurva momen-peralihan. Observasi hasil dilakukan pada beban batas proporsional dan ultimit.





Gambar 5.1. Benda uji lantai CLT dan penampang dengan lapisan tengah penuh



Gambar 5.2. Benda uji lantai CLT dan penampang dengan lapisan tengah diskontinu

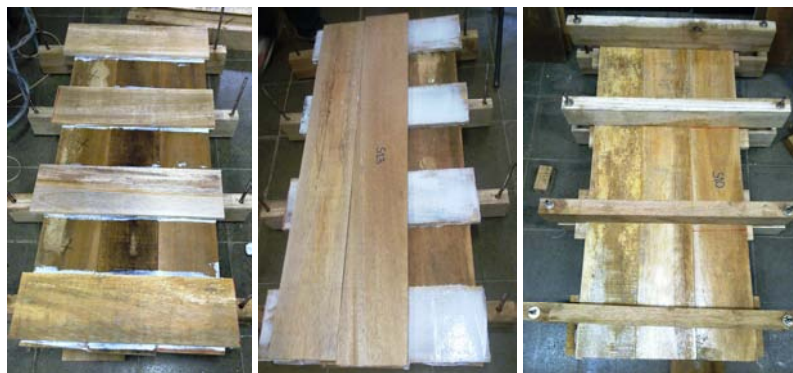
5.2 Bahan dan metode

Seperti telah disebutkan di atas benda uji terbuat dari 3 lapis papan kayu dengan variasi lapisan tengah penuh dan diskontinu, ketebalan dari papan kayu albasia (*Albizia falcata sp.*) adalah 18 mm, dan lebarnya 180 mm, dengan dimensi total dari papan lantai sebesar 54 mm x 540 mm x 1260 mm. Sifat fisik dan mekanik kayu diuji dengan benda uji bebas cacat berdasarkan standar ASTM D143. Berat jenis kayu 0.31 dan modulus elastisitasnya sebesar 5162 MPa. Kuat lentur atau MOR adalah 35 MPa. Perekat PvAc yang digunakan diuji kekuatan gesernya terhadap 2 macam bidang kontak, yang pertama bidang kontak dengan permukaan kayu sama-sama sejajar dan ke dua bidang kontak dengan permukaan kayu arah serat saling tegaklurus. Kuat geser hasil uji geser perekat di Tabelkan pada Tabel 5.1. Pengujian kadar air menunjukkan nilai antara 14-16%.

Tabel 5.1. Kuat geser perekat PvAc, Tjondro 2013d.

paralel			tegaklurus		
No	F_v (MPa)	$F_{v_{avr}}$ (MPa)	No	F_v (MPa)	$F_{v_{avr}}$ (MPa)
S1	3,56		T1	2,36	
S2	4,50		T2	2,08	2,35
S3	5,24	3,84	T3	2,17	
S4	2,04		T4	2,79	

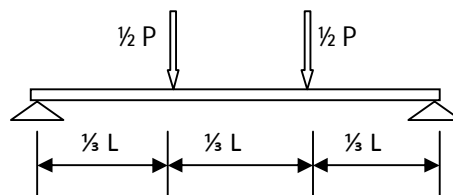
Pembuatan benda uji papan lantai CLT lapis demi lapis seperti terlihat dalam ilustrasi Gambar 5.3. sebagai contoh untuk lapisan tengah diskontinu. Berat dari papan lantai CLT floor ini sangat ringan hanya 20 kg/m^2 untuk jenis lapisan tengah penuh dan 18 kg/m^2 untuk lapisan tengah diskontinu.



Gambar 5.3. Pembuatan papan lantai CLT (lapisan tengah diskontinu) lapis demi lapis.

Metode uji:

Penelitian ini berdasarkan pada uji eksperimental, benda uji di uji dengan *third point loading test* berdasarkan standar ASTM D198-05a seperti terlihat pada Gambar 5.4 dan Gambar 5.5. Lendutan pada tengah bentang diukur dengan menggunakan LVDT. Panjang bersih bentang uji adalah 1050 mm.



Gambar 5.4. Skema pengujian lantai CLT dengan *third point loading test*, ASTM D198-05a



Gambar 5.5. Benda uji lantai CLT saat pengujian dengan *third point loading test*

Perhitungan lendutan ditengah bentang, Δ_p , akibat *third point loading* secara teoritis dapat dengan menggunakan persamaan (5.1) dari Gere, 2001 dengan mengabaikan lendutan akibat geser:

$$\Delta_p = \frac{23 \cdot P_p \cdot L^3}{1296 \cdot (EI_{xe})} \quad (5.1)$$

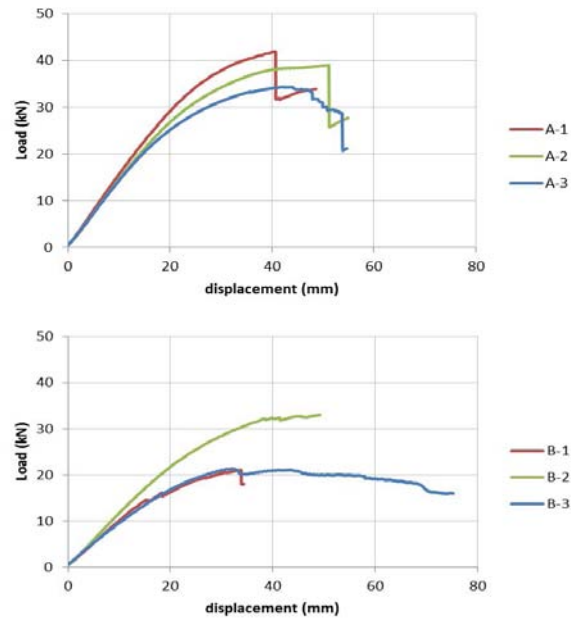
Rijiditas efektif (EI_{xe}) dari pelat lantai akibat *third point loading* dapat dihitung dengan persamaan (5.2).

$$(EI_{xe}) = \frac{23 \cdot P_p \cdot L^3}{1296 \cdot \Delta_p} \quad (5.2)$$

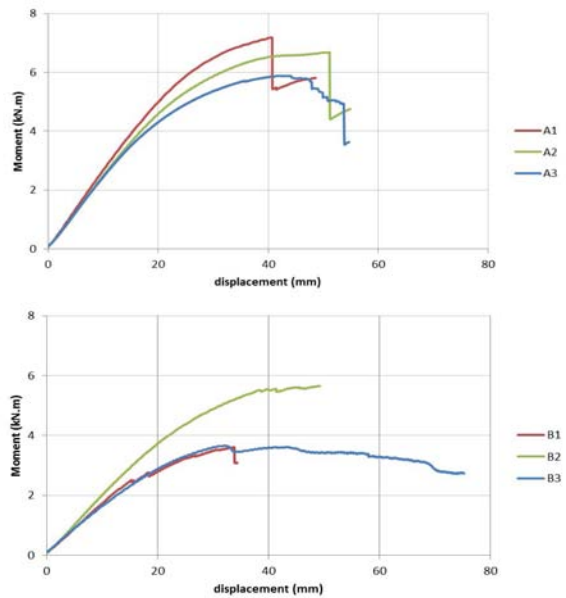
dengan (EI_{xe}) = rijiditas efektif pelat lantai (N.mm²)
 P_p = beban total (N/mm²)
 L = bentang bersih (mm)
 Δ_p = lendutan pada batas proporsional (mm)

5.3 Hasil pengujian

Hasil pengujian di plot berupa kurva beban-lendutan seperti ada Gambar-gambar 5.6 dan 5.7, dan observasi dilakukan pada beban-beban saat batas lendutan ijin (P_a), beban proporsional (P_p) dan beban ultimit (P_u). Syarat besar lendutan ijin diambil sebesar 1/300 L.



Gambar 5.6. Kurva beban vs. lendutan, Tjondro 2013d.



Gambar 5.7. Kurva momen vs. lendutan, Tjondro 2013d.

Gambar 5.6 adalah kurva untuk lapisan tengah penuh dan Gambar 5.7 adalah untuk lapisan tengah diskontinu. Besarnya beban, momen dan lendutan pada setiap kondisi beban ditabelkan dalam Tabel 5.2. Angka daktilitas menunjukkan bahwa lantai CLT tidak akan mengalami keruntuhan getas atau mendadak.

Tabel 5.2. Beban, momen, lendutan dan daktilitas

No	P_a (kN)	M_a (kN.m)	Δ_a (mm)	P_p (kN)	M_p (kN.m)	Δ_p (mm)	P_u (kN)	M_u (kN.m)	Δ_u (mm)	μ_u (mm)
A1	5.39	0.94	3.5	24.79	4.34	18.64	41.06	7.19	40.44	2.17
A2	4.91	0.86	3.5	16.77	2.94	12.81	38.20	6.68	51.16	3.99
A3	4.93	0.86	3.5	18.71	3.27	14.71	33.64	5.89	42.40	2.88
B1	3.61	0.63	3.5	12.55	2.20	12.88	20.63	3.61	33.72	2.62
B2	4.03	0.71	3.5	14.81	2.59	14.21	32.31	5.65	49.24	3.47
B3	3.77	0.66	3.5	12.55	2.20	14.94	20.94	3.66	32.08	2.15

RAGAM KERUNTUHAN

Ragam keruntuhan dari semua lantai yang terjadi adalah Tarik karena lentur pada beban ultimit seperti terlihat pada Gambar 5.8 dan Gambar 5.9. Beberapa bagian dari perekat mengalami pemisahan, hal ini terjadi karena pada benda uji B2 dan B3 umur dari perekat belum sampai satu minggu waktu pengujian dilakukan, ada kemungkinan ada bagian yang belum mengering dengan sempurna.



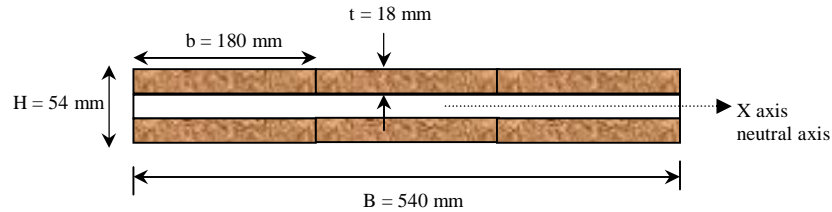
Gambar 5.8. Keruntuhan Tarik akibat lentur pada bagian bawah lantai CLT



Gambar 5.9. Keruntuhan tarik pada bagian tengah (kiri) dan terpisahnya perekat (kanan).

5.4 Analisis dan diskusi

Berdasarkan keadaan pada kondisi elastis, rijiditas dari penampang pelat lantai pada Gambar 5.10 dapat dianalisis dan dihitung sebagai berikut.



Gambar 5.10. Penampang pelat lantai

Momen inersia efektif I_{xe} dapat dihitung berdasarkan lapis ke 1 dan 3, sedangkan lapisan yang tegak lurus dianggap tidak berpengaruh dan diabaikan. Karena penampang bukan penampang yang utuh maka suatu factor rijiditas k digunakan pada persamaan (5.3) dan (5.4) dalam menghitung besarnya momen inersia efektif.

$$I_{xe} = 6\left(\frac{1}{12}b \cdot t^3 + k \cdot b \cdot t(t^2)\right) \quad (5.3)$$

dan

$$I_{xe} = \frac{1}{2}b \cdot t^3(1 + 12k) \quad (5.4)$$

Tabel 5.3. Faktor koreksi rijiditas k dan tegangan lentur ultimit, Tjondro 2013d

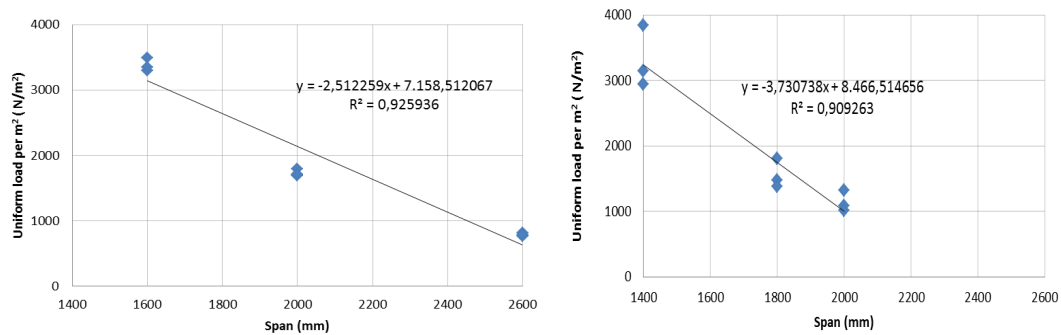
No	b (mm)	t (mm)	k	I_x (mm ⁴)	L (mm)	P_p (N)	Δ_p (mm)	E (MPa)	P_u (N)	M_u (N.mm)	S (mm ³)	f_{bu} (MPa)
A1	180	18	0.76	5311786	1050	24789	18.64	5162	41062	7185850	193156	36.5
A2	180	18	0.74	5185814	1050	16773	12.81	5162	38196	6684213	188575	34.8
A3	180	18	0.72	5059843	1050	18708	14.71	5162	33639	5886738	183994	31.4
B1	180	18	0.53	3863117	1050	12554	12.88	5162	20629	3610075	140477	25.2
B2	180	18	0.58	4178045	1050	14813	14.21	5162	32311	5654355	151929	36.5
B3	180	18	0.45	3359232	1050	12554	14.94	5162	20939	3664269	122154	29.5

Faktor k didapat dengan menggunakan data eksperimental beban dan lendutan proporsional dan persamaan (5.2) untuk mendapatkan EI_{xe} dan disubstitusikan dalam persamaan (5.4) untuk mendapatkan nilai k , nilai E diambil dari uji material.

Beban merata ekuivalen (q) dapat dihitung dengan melakukan konversi berdasarkan syarat lendutan ijin $\Delta_i = 1/300 L$, hal ini karena lendutan atau kekakuan lantai CLT lebih menentukan dalam disain dibandingkan kekuatan. I_{xe} dihitung berdasarkan persamaan (5.4) dengan factor k yang didapat dalam Tabel 5.3, dan besarnya q dihitung dengan persamaan (5.5).

$$\Delta_i = \frac{5 \cdot q \cdot L^4}{384 \cdot (EI_{xe})} \quad (5.5)$$

Hasil konversi untuk ke dua macam pelat lantai CLT dapat dilihat pada grafik dalam Gambar 5.11 Pelat lantai CLT dengan lapisan tengah penuh dan panjang 2.0 m dapat menerima beban 2.0 kPa, tetapi untuk lapisan tengah diskontinu hanya dapat menerima beban 1.0 kPa. Beban merata untuk panjang pelat yang lainnya dapat diperoleh dengan menggunakan grafik pada Gambar 5.11.



Gambar 5.11. Beban merata ekuivalen pelat lantai CLT, Tjondro 2013d.

5.5 Kesimpulan

- Pelat lantai papan kayu silang laminasi dengan perekat (CLT floor) dengan kayu *albasia* memenuhi syarat untuk digunakan pada bangunan perumahan, beban dan panjang bentang dapat ditentukan dengan menggunakan grafik konversi.
- Faktor k untuk pelat lantai CLT dengan lapisan diskontinu jauh lebih rendah dibandingkan lapisan tengah penuh.
- Besarnya angka daktilitas pada pelat lantai CLT ini dapat menjamin tidak terjadi keruntuhan getas atau mendadak.
- Berat dan massa lantai yang ringan dapat meminimalkan besarnya gaya inersia akibat gempa.

BAB 6

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan:

- Kekuatan kayu Albasia memenuhi syarat untuk dipergunakan sebagai balok atau lantai papan kayu silang laminasi dengan menggunakan perekat.
- Perekat PvAc yang digunakan memenuhi syarat dan sesuai dengan kekuatan kayu albasia, tidak diperlukan perekat yang lebih kuat seperti strong epoxy.
- Kekuatan dan rijiditas balok dan lantai yang terbuat dari papan kayu silang laminasi dengan menggunakan perekat PvAc lebih kuat dan kaku dibandingkan dengan menggunakan penghubung paku.
- Berat balok dan lantai papan kayu silang laminasi dengan menggunakan perekat PvAc sangat ringan dan mempunyai cukup daktilitas, sehingga massa yang ringan dapat mereduksi gaya inersia akibat gempa.
- Tabel-tabel konversi panjang bentang dalam laporan ini dapat digunakan untuk berbagai panjang bentang dan beban yang dapat dipikul pada daerah elastis dan memenuhi syarat kekakuan.

Saran:

- Penelitian pada jenis kayu cepat tumbuh yang lainnya atau lebih kuat perlu dilakukan untuk memanfaatkan berbagai macam jenis kayu yang ada.
- Penggunaan untuk dinding geser papan kayu silang albasia dengan menggunakan perekat dapat diteliti lebih lanjut untuk dimanfaatkan sebagai dinding geser pada bangunan kayu tahan gempa.
- Ketahanan dan keawetan balok atau pelat lantai kayu harus dibarengi dengan pengawetan dan treatment tahan rayap atau organisme yang lain bila dipergunakan terpapar cuaca.

DAFTAR PUSTAKA

- American Society for Testing and Materials. (2010). ASTM D143-94: *Standard Methods of Testing Small Clear Specimens of Timber*. Annual Book of ASTM Standards volume 04.10. Baltimore, U.S.A.
- American Society for Testing and Materials. (2010). ASTM D198-05, *Standard Methods of Static Tests of Lumber in Structural Size*. Annual Book of ASTM Standards volume 04.10. Baltimore, U.S.A.
- American National Standard, 2012. Standard for Performance-Rated Cross-Laminated Timber. ANSI/APA PRG 320-2012. Chapman, J. et al. (2012).
- A 30 Level Cross Laminated Timber building System and Analysis of The Eurocode Dynamic Wind Loads. World Conference on Timber Engineering, Auckland, New Zealand, 15-19 July 2012.
- Forest Product Laboratory, 2010. *Wood Handbook, Wood as an Engineering Material*, Centennial ed., Forest Product Laboratory, Madison, Wisconsin.
- Gere, J.M. (2001), '*Mechanics of Materials*', Fifth Edition, Brooks/Cole, Thomson Learning
- Karacabeyli, E. & Douglas, B. (2013), '*CLT Handbook*', FPIInnovations, Pointe-Claire, QC.
- Okabe, M. et al. (2012). *Effect of Vertical Load under Cyclic Lateral Load Test for Evaluating Sugi CLT Wall Panel*. World Conference on Timber Engineering, Auckland, New Zealand, 15-19 July 2012.
- Pei, S. et al. (2012). *Seismic Design of A Multi-Story Cross Laminated Timber Building Based on Component Level Testing*. World Conference on Timber Engineering, Auckland, New Zealand, 15-19 July 2012.
- Popovski, M. and Karacebeyli, E. (2012). *Seismic Behaviour of Cross-Laminated Timber Structures*. World Conference on Timber Engineering, Auckland, New Zealand, 15-19 July 2012.
- Tjondro, J.A. and Onky, A. (2011). *The Behaviour of Cross Nail-Laminated Timber (CNLT) Shearwall under Cyclic Loading*. The 2nd International Conference on Earthquake Engineering and Disaster Mitigation, Surabaya, 19-20 July 2011.
- Tjondro J. A., D. R. Widarda and B. Hartanto. (2013a). *The flexural strength and behaviour of cross nail-laminated timber floor*. The 6th Civil Engineering Conference in The Asian Region, Jakarta, August 20-22, 2013.
- Tjondro, J.A. dan Benny Kusumo. (2013b). *Kuat lentur dan perilaku balok papan kayu laminasi silang dengan perekat*. Konferensi Nasional Teknik Sipil 7 (KoNTekS 7, Surakarta, 24-25 Oktober 2013.

- Tjondro, J.A., Sagara, A. dan Marco, S. (2013c). *Kuat lentur dan perilaku balok papan kayu laminasi silang dengan paku*. Konferensi Nasional Teknik Sipil 7 (KoNTekS 7), Surakarta, 24-25 Oktober 2013.
- Tjondro, J.A. and Natalia, S. (2013d). *The flexural strength and behavior of cross laminated timber floor*. The 5th International Symposium of Indonesian Wood Research Society. Balikpapan, 7-8 November 2013.
- Yeh, B. et al. (2012). *The Cross Laminated Timber Standard in North America*. World Conference on Timber Engineering, Auckland, New Zealand, 15-19 July 2012.
- Zumbrunnen, P. and Fovargue, J. (2012). *Mid Rise CLT Buildings – The UK's Experience and Potential for Australia and New Zealand*. World Conference on Timber Engineering, Auckland, New Zealand, 15-19 July 2012.