

ANALISIS KEKUATAN LENTUR BALOK LAMINASI DARI LIMBAH KAYU PALET PINUS DENGAN PERKUATAN KAYU MAHONI

Bernanda Umawan¹, Yudhi Arnandha², Ali Murtopo³

Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Tidar,

Jl. Kapten Suparman 39 Potrobangsari, Magelang Utara, Magelang, Jawa Tengah 56116

bernanda.umawan@gmail.com

ABSTRAK

Kayu pinus adalah salah satu jenis kayu yang sering dimanfaatkan sebagai bahan produksi palet atau pengemasan berbahan kayu. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh perkuatan kayu Mahoni terhadap kuat lentur balok laminasi dan mengurangi limbah palet kayu pinus untuk digunakan sebagai bahan struktural maupun non struktural.

Metode laminasi dipilih untuk merekayasa kayu utuh dengan memanfaatkan limbah palet kayu pinus dan perkuatan kayu mahoni. Pengujian terdiri dari uji kadar air, kerapatan dan kuat lentur. Uji kuat lentur pengacu pada SNI 03-3959-1995 dengan beban terpusat di tengah bentang. Benda uji berukuran 76x5x5 cm³. Terdapat 4 variasi dengan masing masing 4 sampel pada penelitian ini. Variasi A0 (S-S-S-S) tebal tiap lapisan 1 cm, variasi A1 (I-S-I) tebal tiap lapisan 1,67 cm, variasi A2 (S-I-S-I) tebal tiap lapisan 1,25 cm, variasi A3 (I-S-I-S-I) tebal tiap lapisan 1 cm. Lem yang digunakan adalah lem PVAc (*polyvinyl acetate*) sebanyak 40 MDGL.

Hasil dari pengujian perkuatan menggunakan kayu mahoni berpengaruh terhadap kuat lentur balok laminasi dari limbah palet kayu pinus. Nilai rata-rata MOE balok laminasi A0, A1, A2, A3 berturut-turut sebesar 4739,163 MPa, 6236,593 MPa, 4810,598 MPa, 4828,639 MPa. Nilai rata-rata MOR balok laminasi A0, A1, A2, A3 berturut-turut sebesar 35,935 MPa, 48,913 MPa, 36,374 MPa, 37,099 MPa.

Kata kunci: balok laminasi, kayu mahoni, kuat lentur, limbah palet kayu pinus

ABSTRACT

Pine wood is one type of wood that is often used as a material for pallet production or packaging made of wood. This study aims to determine the effect of Mahogany wood reinforcement on the flexural strength of laminated beams and reduce the waste of pine wood pallets to be used as structural and non-structural materials.

Glue laminated timber method was chosen to engineer intact wood by utilizing waste pine pallets and mahogany reinforcement. The test consists of water content, density and flexural strength tests. The reference flexural strength test is based on SNI 03-3959-1995 with a concentrated load in the middle of the span. The test object is 76x5x5 cm³ in size. There are 4 variations with 4 samples each in this study. Variation A0 (SSSSS) is 1 cm thick for each layer, variation A1 (ISI) is 1.67 cm thick for each layer, variation A2 (SISI) is 1.25 cm thick for each layer, variation A3 (ISISI) is 1 cm thick for each layer. The glue used is 40 MDGL PVAc (polyvinyl acetate) glue.

The results of reinforcement testing using mahogany affect the flexural strength of laminated beams from waste pine wood pallets. The average MOE values of laminated beams A0, A1, A2, A3 were 4739.163 MPa, 6236.593 MPa, 4810.598 MPa, 4828.639 MPa, respectively. The average value of the MOR of laminated beams A0, A1, A2, A3 was 35.935 MPa, 48.913 MPa, 36.374 MPa, and 37.099 MPa, respectively.

Keywords: laminated beams, mahogany wood, flexural strength, pine pallet waste

PENDAHULUAN

Bangunan berbahan kayu telah banyak digunakan namun kayu yang dijual di

pasaran sangat terbatas terutama dari segi ukuran. Hal ini perlu diantisipasi salah satunya dengan menggunakan kayu yang

dapat menggantikan penggunaan kayu utuh meskipun dengan ukuran yang terbatas. Upaya yang dilakukan untuk membuat ukuran kayu menjadi ukuran yang diinginkan yaitu dengan menggunakan teknik laminasi. Salah satu produk laminasi yang sering dimanfaatkan menjadi bahan struktural ialah balok laminasi. Menurut SNI 7973-2013 tentang Spesifikasi Desain untuk Konstruksi Kayu, laminasi merupakan susunan bilah yang tersusun dari banyak lapisan kayu yang dibuat sedemikian rupa kemudian digabung menggunakan perekat.

Kayu yang digunakan untuk kebutuhan konstruksi memiliki persyaratan mendasar yang harus dipenuhi, yaitu keteguhan dan kekuatan kayu dalam menerima beban rencana. Meningkatnya sifat fisis dan mekanis kayu berpengaruh pada kekuatan kayu dalam menahan suatu beban yang nantinya dapat digunakan sebagai keperluan bahan konstruksi apabila kekuatan kayu dapat memenuhi persyaratan [1].

Kayu pinus adalah salah satu tanaman tropis di kawasan Malesiana dan banyak ditemui di kawasan Asia Tenggara. Kayu pinus banyak dimanfaatkan untuk bahan mebel serta digunakan sebagai bahan bangunan meskipun hal ini masih jarang dijumpai. Kayu pinus lokal Indonesia dan pinus dari Eropa merupakan 2 jenis kayu pinus yang biasa tersedia di pasaran. Kayu pinus lokal Indonesia umumnya berwarna putih kekuningan sedangkan kayu pinus dari Eropa berwarna putih kekuningan sedikit kemerahan.

Kayu pinus adalah salah satu jenis kayu yang sering dimanfaatkan sebagai bahan produksi palet atau pengemasan berbahan kayu. Palet atau peti kemas yang sudah tidak dapat digunakan banyak menjadi limbah baik di pelabuhan maupun pada pabrik-pabrik yang menggunakan peti kemas sebagai alat pengemasan keamanan produk yang akan dipindahkan atau dikirimkan. Limbah kayu palet umumnya digunakan untuk kayu bakar atau dimanfaatkan untuk kebutuhan mebel lantaran kekuatan yang menurun karena kualitasnya berkurang [2]

Kayu mahoni berpotensi sebagai bahan

baku konstruksi karena memiliki kekuatan yang cukup besar dalam menahan suatu beban. Tumbuhan mahoni termasuk ke dalam anggota suku Meliaceae yang mencakup 50 genera serta 550 spesies tanaman kayu. Tumbuhan mahoni dikategorikan sebagai salah satu pohon besar karena diameternya sebesar 125 cm dan tinggi mencapai 35-40 m. Produktivitas tegangan hutan kayu mahoni cukup tinggi sementara pertumbuhan pohon mahoni selama 15 tahun. Hal ini menyebabkan perlunya memilimalisir penggunaan kayu Mahoni secara utuh salah satunya dengan cara memanfaatkan teknologi laminasi [3].

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui hubungan antara persentase ketebalan kayu mahoni pada lapisan laminasi terhadap kekuatannya serta mengetahui penggunaan kayu mahoni sebagai perkuatan pada balok laminasi dapat memberikan peningkatan kuat lentur pada balok laminasi dari limbah palet kayu pinus.

LANDASAN TEORI

Kayu Laminasi

Kayu laminasi atau glulam (*glued-laminated timber*) adalah suatu teknik yang menggabungkan dua atau lebih kayu potongan yang direkatkan sejajar serat satu sama lain [4]. Teknik laminasi dilakukan dengan beberapa proses antara lain pemotongan, perekatan, serta pengempaan hingga ketebalan dan bentuk balok laminasi sesuai dengan yang diinginkan [5].

Kadar Air

Kayu merupakan bahan yang dapat menyerap serta melepaskan air dengan wujud uap air maupun cairan atau disebut higroskopis. Suhu, kelembaban sekitar dan jumlah air pada kayu mempengaruhi banyaknya air yang diserap dan dilepaskan oleh kayu.

Berdasarkan SNI 03-6850-2002 pengujian kadar air dilaksanakan menggunakan ketentuan berikut: Ukuran benda uji untuk pengujian kadar air bersifat bebas, tidak ada ketentuan dimensi, oven yang digunakan diatur pada suhu $103 \pm 2^{\circ}\text{C}$ dan jumlah benda uji untuk pengujian kadar

air minimal 8 buah. Persamaan nilai kadar air sebagai berikut:

$$\text{Kadar air (M)} = \frac{B_A - B_B}{B_B} \times 100\% \dots\dots (1)$$

Keterangan:

- M = Kadar air (%)
- B_A = Berat sebelum di oven (gr)
- B_B = Berat setelah di oven (gr)

Kerapatan

Kerapatan kayu merupakan perbandingan lurus antara massa atau beban kayu dengan unit volume kayu. Sifat fisik dan mekanik kayu dapat diketahui dengan adanya nilai kerapatan kayu.

Kerapatan (*density*) kayu dinyatakan dalam berat kayu dibagi jumlah volume kayu, pengukuran keprapatan ditunjukkan untuk mengukur porositas atau presentase rongga kayu. Persamaan yang dipakai guna mendapatkan nilai kerapatan kayu berdasarkan SNI ISO 9427:2008 yakni :

$$\rho = \frac{W_g}{V_g} \dots\dots\dots (2)$$

Keterangan:

- ρ = Kerapatan kayu (gr/cm³)
- w_g = Berat kayu basah (gr)
- v_g = Volume kayu basah (cm³)

Kuat Lentur

Kuat lentur adalah keteguhan balok benda uji dalam menahan kuat tarik tidak langsung yang diletakkan di atas permukaan meja penekan yang selanjutnya dilakukan pengujian dengan mesin uji lentur.

Persamaan yang digunakan untuk mengetahui MoR dan MoE berdasarkan SNI 03-3959-1995 sebagai berikut:

$$\text{MOR} = \frac{3P_{maks}L}{2bd^2} \dots\dots\dots (3)$$

Keterangan:

- MoR = *Modulus of Rupture* (MPa)
- Pmaks = Beban maksimum yang bisa ditahan (N)
- L = Panjang bentang bersih (mm)
- b = Lebar benda uji (mm)
- d = Tinggi benda uji (mm)

$$\text{MOE} = \frac{PL^3}{48I\delta y} \dots\dots\dots (4)$$

Keterangan:

- MoE = *Modulus of Elasticity* (MPa)
- P = Besarnya beban (N)

- L = Bentang bersih (mm)
- δy = Defleksi (mm)
- I = Momen inersia (mm⁴)

Sambungan Perekat

Glue spread merupakan banyaknya perekat yang digunakan dalam satuan luas permukaan bidang rekat. Dalam pengaplikasiannya banyaknya perekat diubah sebagai istilah yang disebut GPU (*gram pick up*) [6].

$$\text{GPU} = \frac{SA}{2048,3} \dots\dots\dots (5)$$

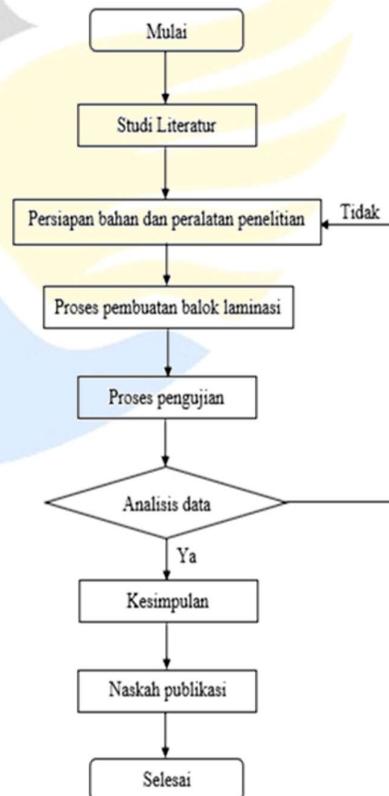
Keterangan:

- GPU = gram pick up (gram/cm²)
- S = banyaknya perekat yang digunakan dalam pound/MSGGL ataupun pound/MDGL
- A = luas bidang rekat (cm²)

METODE

Diagram Alir Penelitian

Langkah-langkah yang akan dilakukan dalam penelitian dapat dilihat padagambar di bawah ini:



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Lokasi Penelitian

Pembuatan benda uji dilaksanakan di Pd. Jaya Tayu, Sumberrejo, Kec. Mertoyudan, Kab. Magelang

Pengujian benda uji dilaksanakan di Laboratorium Struktur, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Tidar, Magelang.

Variabel Penelitian

Balok laminasi ini mempunyai 4 variasi yaitu A0, A1, A2 dan A3 dengan 4 benda uji setiap variasinya. Tiap variasi dibedakan berdasarkan ukuran ketebalan lapisan dan susunan kayu pada balok laminasi. Komposisi kayu pada balok laminasi sebagai berikut:

1. A0 (S-S-S-S-S)

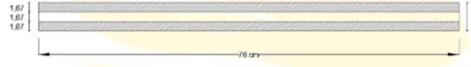
Variasi ini mempunyai ukuran 76 cm x 5 cm x 5 cm yang terdiri dari 5 segmen (lapis) dengan tebal sebesar 1 cm per lapis.



Gambar 1. Benda Uji A0

2. A1 (I-S-I)

Variasi ini mempunyai ukuran 76 cm x 5 cm x 5 cm yang terdiri dari 3 segmen (lapis) dengan tebal sebesar 1,67 cm per lapis



Gambar 2. Benda Uji A1

3. A2 (S-I-S-I)

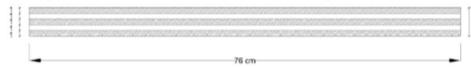
Variasi ini mempunyai ukuran 76 cm x 5 cm x 5 cm yang terdiri dari 4 segmen (lapis) dengan tebal sebesar 1,25 cm per lapis



Gambar 3. Benda Uji A2

4. A3 (I-S-I-S-I)

Variasi ini mempunyai ukuran 76 cm x 5 cm x 5 cm yang terdiri dari 5 segmen (lapis) dengan tebal sebesar 1 cm per lapis



Gambar 4. Benda Uji A3

Keterangan: I = Limbah Palet Kayu Pinus
S = Kayu Mahoni

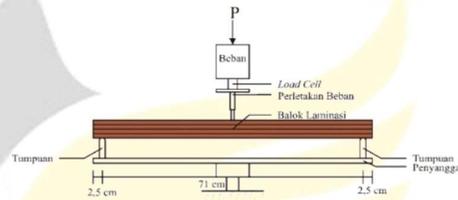
 = Limbah Palet Kayu Pinus

 = Kayu Mahoni

Perekat yang digunakan yaitu lem PVAc (*polyvinyl acetate*). Jumlah perekat yang dibutuhkan untuk kayu mahoni dan limbah palet kayu pinus adalah 40 MDGL. Perhitungan kebutuhan jumlah perekat dapat dihitung dengan rumus GPU pada Persamaan (5) dengan menambahkan 10% dari jumlah kebutuhan perekat pada setiap variasi. Kebutuhan perekat per lapisan pada benda uji kuat lentur adalah 8,163 gram/lapisan.

Mekanisme Pengujian Kuat Lentur

Pengujian yang dilakukan antara lain uji kadar air, uji kerapatan kayu, dan uji kuat lentur. Metode pengujian kuat lentur mengacu pada SNI 03-3959-1995. Skema pengujian kuat lentur bisa dilihat pada Gambar 6.



Gambar 5. Skema Pengujian Kuat Lentur

Berikut adalah tata cara pengujian kuat lentur balok laminasi:

1. Menyediakan benda uji berupa balok laminasi dengan jumlah dan ukuran yang telah ditentukan serta memberi kode pada setiap benda uji balok laminasi.
2. Mengatur jarak tumpuan berdasarkan SNI 03-3959-1995.
3. Meletakkan bantalan penekan atau perletakan beban di tengah bentang.
4. Menjalankan mesin uji dengan kecepatan 2,5 mm/s hingga mencapai beban maksimum yaitu saat benda uji mengalami patah dan mencatatnya.
5. Menentukan bentuk kerusakan pada benda uji.
6. Mengolah data dengan menghitung kuat lentur yang telah didapat dari pengujian.

HASIL PENELITIAN

Pemeriksaan Kayu

Permeriksaan kayu dilakukan untuk mengetahui sifat fisik kayu yang digunakan. Pemeriksaan ini dilakukan pada dua jenis kayu berbeda yang digunakan yaitu kayu mahoni dan limbah palet kayu pinus.

1. Kadar Air Kayu

Pengujian kadar air kayu terdiri dari dua kali pengujian yaitu pengujian kadar air kayu mahoni dan pengujian kadar air limbah palet kayu pinus. Pengujian ini dilakukan menggunakan alat ukur kadar air (*moisture meter*). Data hasil pengujian kadar air masing-masing kayu dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Pengujian Kadar Air Kayu

Benda Uji	Kadar Air (%)	Kadar Air Rata-rata (%)
Limbah Palet Kayu Pinus	P ₁	11,40
	P ₂	12,70
	P ₃	12,30
	P ₄	12,40
	P ₅	11,90
Kayu Mahoni	M ₁	11,70
	M ₂	11,80
	M ₃	11,00
	M ₄	11,50
	M ₅	11,70

Hasil kadar air rata-rata limbah palet kayu pinus dan kayu mahoni telah memenuhi standar kadar air kayu gergajian menurut SNI 7973:2013 yaitu tidak melebihi 19%. Banyaknya air yang terkandung dalam kayu akan berpengaruh terhadap kondisi kering udara balok laminasi.

2. Kerapatan Kayu

Pengujian kerapatan kayu terdiri dari dua kali pengujian yaitu pengujian kerapatan limbah palet kayu pinus dan kerapatan kayu mahoni. Data hasil pengujian kerapatan masing-masing kayu dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Pengujian Kerapatan Kayu

Benda Uji	Panjang Balok L (mm)	Lebar Balok b (mm)	Tinggi Balok h (mm)	Volume (mm ³)	Berat (gram)	Kerapatan (gr/cm ³)	Kerapatan Rata-rata (gr/cm ³)
P ₁	61,10	59,20	12,30	44490,576	20,60	0,463	0,458
P ₂	61,20	59,10	12,00	43403,040	20,60	0,475	
P ₃	61,50	59,30	12,00	43763,40	20,00	0,457	
P ₄	61,30	59,50	12,40	45227,140	19,90	0,440	
P ₅	61,30	59,30	12,50	45438,625	20,60	0,453	
M ₁	60,00	60,00	12,40	44640,00	20,60	0,461	0,465
M ₂	59,90	59,70	12,50	44700,375	20,90	0,468	
M ₃	59,70	58,90	12,40	43602,492	20,60	0,472	
M ₄	59,50	59,10	12,50	43955,625	20,40	0,464	
M ₅	59,80	59,90	12,50	44775,250	20,60	0,460	

Pemeriksaan Balok Laminasi

Permeriksaan balok laminasi dilakukan untuk mengetahui sifat fisik maupun sifat mekanik balok laminasi.

1. Kadar Air Balok Laminasi

Pengujian kadar balok laminasi dilakukan untuk mengetahui banyaknya air yang terkandung pada balok laminasi. Pengujian ini dilakukan menggunakan alat ukur kadar air (*moisture meter*). Data hasil pengujian kadar air balok laminasi dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Pengujian Kadar Air Balok Laminasi

Kode Benda Uji	Kadar Air (%)					Kadar Air Rata-rata (%)	Kadar Air Rata-rata Per Varian (%)
	Lapisan 1	Lapisan 2	Lapisan 3	Lapisan 4	Lapisan 5		
A0	A0 ₁	11,40	12,90	11,00	11,10	13,30	11,94
	A0 ₂	12,70	14,30	11,10	12,20	13,80	12,82
	A0 ₃	12,30	11,90	10,30	14,00	13,40	12,38
	A0 ₄	12,40	13,80	11,90	12,30	12,10	12,50
A1	A1 ₁	11,70	10,60	11,70	-	-	11,33
	A1 ₂	11,80	14,10	11,20	-	-	12,36
	A1 ₃	11,00	13,60	10,20	-	-	11,60
	A1 ₄	11,50	13,50	11,70	-	-	12,23
A2	A2 ₁	12,40	11,70	11,90	11,50	-	11,87
	A2 ₂	10,30	11,10	13,40	13,80	-	12,15
	A2 ₃	12,20	11,30	13,10	13,30	-	12,47
	A2 ₄	11,60	11,30	13,30	13,10	-	12,32
A3	A3 ₁	12,80	11,00	13,80	12,50	9,60	12,52
	A3 ₂	11,50	12,10	11,70	12,70	8,40	12,00
	A3 ₃	13,30	12,70	12,00	10,60	10,30	12,15
	A3 ₄	11,80	12,60	12,60	13,60	7,70	12,65

Lapisan 1 sampai lapisan 5 tidak menunjukkan jenis kayunya dikarenakan tiap benda uji susunan nya berbeda-beda. Hasil kadar air rata-rata balok laminasi telah memenuhi standar kadar air untuk penggunaan balok laminasi menurut SNI 7973:2013 yaitu tidak melebihi 16%.

2. Kerapatan Balok Laminasi

Data hasil pengujian kerapatan balok laminasi dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Pengujian Kerapatan Balok Laminasi

Benda Uji	Panjang Balok L (mm)	Lebar Balok b (mm)	Tinggi Balok h (mm)	Volume (mm ³)	Berat (gram)	Kerapatan (gr/cm ³)	Rata-rata (gr/cm ³)
A0 ₁	50,00	50,50	56,10	141652,50	80,079	0,565	0,572
A0 ₂	50,00	50,50	56,70	143167,50	80,224	0,560	
A0 ₃	49,90	50,70	53,80	136110,23	72,303	0,531	
A0 ₄	50,00	48,50	51,20	124160,00	78,355	0,631	
A1 ₁	49,80	47,60	50,50	119709,24	80,855	0,675	0,624
A1 ₂	49,90	47,10	51,30	120569,87	81,184	0,673	
A1 ₃	50,00	48,70	49,40	120289,00	68,750	0,572	
A1 ₄	50,10	48,30	49,80	120507,53	69,539	0,577	
A2 ₁	50,00	48,10	50,60	121693,00	65,289	0,537	0,583
A2 ₂	49,90	47,50	50,60	119934,65	72,961	0,608	
A2 ₃	50,00	47,60	51,30	122094,00	73,592	0,603	
A2 ₄	49,80	47,20	51,20	120348,67	70,250	0,584	
A3 ₁	49,70	48,30	52,00	124826,52	70,724	0,567	0,592
A3 ₂	50,00	49,50	51,50	127462,50	75,987	0,596	
A3 ₃	50,00	49,50	52,10	128947,50	77,961	0,605	
A3 ₄	50,00	46,60	54,00	125820,00	75,789	0,602	

3. Modulus of Rupture (MoR)

Modulus of Rupture (MOR) adalah sifat mekanik yang memperlihatkan kekuatan untuk menahan beban yang bekerja

melawannya hingga mengalami keruntuhan. Data hasil pengujian *Modulus of Rupture* (MoR) balok laminasi dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil Pengujian *Modulus of Rupture* (MoR) balok laminasi

Benda Uji	Panjang Balok l (mm)	Lebar Balok b (mm)	Tinggi Balok d (mm)	P Maks (N)	Nilai MOR (MPa)	MOR Rata-rata (MPa)
A01	710	50,50	56,10	5451,345	36,529	35,935
A02	710	50,50	56,70	5061,140	33,200	
A03	710	50,70	53,80	5117,210	37,137	
A04	710	48,50	51,20	4402,094	36,875	
A11	710	47,60	50,50	5387,591	47,267	48,913
A12	710	47,10	51,30	5764,738	49,531	
A13	710	48,70	49,40	4948,227	44,342	
A14	710	48,30	49,80	6131,131	54,511	
A21	710	48,10	50,60	4732,385	40,925	36,374
A22	710	47,50	50,60	3974,251	34,802	
A23	710	47,60	51,30	4215,441	35,839	
A24	710	47,20	51,20	3941,990	33,930	
A31	710	48,30	52,00	4342,180	35,408	37,099
A32	710	49,50	51,50	3874,395	31,429	
A33	710	49,50	52,10	4933,632	39,105	
A34	710	46,60	54,00	5416,780	42,454	

Berdasarkan data yang terdapat pada Tabel 5 dapat dilihat bahwa nilai *Modulus of Rupture* (MOR) tiap variasi berbeda-beda. Nilai MOR rata-rata untuk variasi A0 (Mahoni 0%) sebesar 35,935 MPa, variasi A1 (Mahoni 66,67%) sebesar 48,913 MPa, variasi A2 (Mahoni 50%) sebesar 36,374 MPa, dan variasi A3 (Mahoni 60%) sebesar 37,099 MPa.

4. *Modulus of Elasticity* (MoE)

Modulus of Elasticity (MOE) adalah sifat mekanik yang memperlihatkan tingkat elastisitas suatu balok. Data hasil pengujian *Modulus of Elasticity* (MOE) balok laminasi dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil Pengujian *Modulus of Elasticity* (MOE) balok laminasi

Benda Uji	Panjang Balok L (mm)	Momen Inersia I (mm ⁴)	Lendutan δ (mm)	Pendutan (N)	Nilai MOE (MPa)	MOE Rata-rata (MPa)
A01	710	743016,941	11,842	4700,000	3982,978	4739,163
A02	710	767112,940	8,690	3675,200	4110,889	
A03	710	657920,684	7,870	3569,600	5140,497	
A04	710	542463,317	8,000	3330,400	5722,290	
A11	710	510857,579	7,500	3066,667	5968,144	6236,593
A12	710	529897,361	7,265	3297,101	6386,144	
A13	710	489247,440	9,727	3733,330	5849,553	
A14	710	497111,618	8,214	3692,307	6742,532	
A21	710	519296,482	8,000	2894,000	5194,299	4810,598
A22	710	512818,772	9,461	3260,000	5010,147	
A23	710	535522,598	7,733	2509,333	4518,209	
A24	710	527923,063	5,000	1600,000	4519,737	
A31	710	565947,200	6,978	2657,391	5017,442	4828,639
A32	710	563437,359	7,176	2400,000	4426,057	
A33	710	583360,639	11,538	3925,000	4348,163	
A34	710	611485,200	7,816	3540,000	5522,892	

Berdasarkan data yang terdapat pada Tabel 6 dapat dilihat bahwa nilai *Modulus of Elasticity* (MOE) tiap variasi berbeda-beda. Nilai MOE rata-rata untuk variasi A0 (Mahoni 0%) sebesar 4739,163 MPa, variasi A1 (Mahoni 66,67%) sebesar 6236,583 MPa, variasi A2 (Mahoni 50%) sebesar 4810,598 MPa, dan variasi A3 (Mahoni 60%) sebesar

4828,639 MPa.

5. Bentuk Kegagalan Balok Laminasi

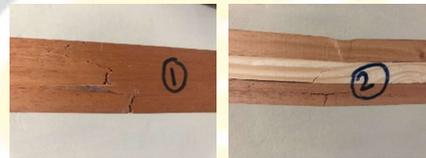
Kegagalan balok laminasi saat dilakukan pengujian kuat lentur bermacam-macam. Hal ini disebabkan oleh beberapa faktor diantaranya karena tidak dapat menahan kuat lentur maupun kuat geser pada balok laminasi. Selain itu faktor lain seperti lem yang digunakan, proses pengompresan, cacat kayu dan kayu acak yang digunakan juga berpengaruh terhadap kekuatan kayu.

Benda uji A₀₄ yang memiliki kuat lentur tertinggi dibandingkan benda uji A0 lainnya, mengalami perilaku kegagalan balok laminasi yang berupa retak berserabut dan retak tarik.



Gambar 7. Pola Kerusakan Benda Uji A₀₄

Benda uji A₁₄ yang memiliki kuat lentur tertinggi dibandingkan benda uji A1 lainnya, mengalami perilaku kegagalan balok laminasi yang berupa retak berserabut dan retak tarik.



Gambar 8. Pola Kerusakan Benda Uji A₁₄

Benda uji A₂₁ yang memiliki kuat lentur tertinggi dibandingkan benda uji A2 lainnya, mengalami perilaku kegagalan balok laminasi yang berupa retak mendatar.



Gambar 9. Pola Kerusakan Benda Uji A₂₁

Benda uji A₃₄ yang memiliki kuat lentur tertinggi dibandingkan benda uji A3 lainnya, mengalami perilaku kegagalan balok laminasi yang berupa retak mendatar.



Gambar 6. Pola Kerusakan Benda Uji A₃₄

Bentuk kegagalan tiap variasi terjadi pada perekat antar lamina dan rusak pada kayu. Kerusakan pada perekat antar lamina merupakan jenis retak mendatar sedangkan kerusakan pada kayu berupa retak serabut dan retak tarik. Kegagalan pada antar lamina terjadi akibat balok laminasi mengalami kegagalan geser pada saat menerima beban atau *debonding*. Kegagalan retak serabut dan retak tarik terjadi akibat kegagalan lentur balok laminasi pada saat menerima beban. Selain itu kadar air yang tinggi berpengaruh pada proses pengeleman dan berakibat pada keteguhan perekat antar lamina balok laminasi. Hal ini serupa dengan Arnandha (2006) yang menyebutkan bahwa kegagalan balok pada pengujian lentur dapat disebabkan oleh berbagai hal seperti kadar air, kualitas lem, kualitas pada saat pengempaan, ada tidaknya cacat pada bahan baku atau bahkan kesalahan pembacaan saat pengujian.

PEMBAHASAN

Modulus of Rupture (MOR) dan *Modulus of Elasticity (MOE)*

Nilai *Modulus of Rupture (MOR)* dan *Modulus of Elasticity (MOE)* tiap variasi berbeda-beda. Nilai MOR dan MOE rata-rata yang berbeda salah satunya disebabkan karena persentase atau banyaknya kayu mahoni pada balok laminasi juga berbeda. Perbedaan kekuatan yang tidak begitu signifikan juga dapat disebabkan karena kadar air kayu penyusun balok laminasi yang berpengaruh pada saat proses perekatan.

Ditinjau dari kerapatan balok laminasi pada tiap variasi, kerapatan balok laminasi memiliki perbedaan yang cukup signifikan. Bowyer dkk (2003) juga menyatakan bahwa perbedaan nilai kerapatan dipengaruhi oleh jenis lamina, tebal dinding sel, kadar air dan proses perekatan. Berdasarkan nilai kerapatan rata-rata pada Tabel 4 dapat dilihat bahwa variasi A1 memiliki kerapatan paling tinggi sementara variasi A0 memiliki kerapatan paling rendah. Hal ini sesuai dengan Walker (1993) yang menyatakan bahwa kekuatan kayu dipengaruhi oleh

beberapa faktor salah satunya adalah kerapatan. Semakin tinggi kerapatan maka kekuatan kayu akan semakin meningkat.

Analisis Batang Lentur Balok Laminasi

Batang lentur yang mengalami lendutan mengakibatkan terjadinya peningkatan tegangan pada balok laminasi. Modulus elastisitas lentur terkoreksi merupakan hasil perkalian antara modulus elastisitas dengan faktor koreksi. Lendutan ijin komponen batang lentur pada konstruksi terlindung adalah $L/300$. Dalam penelitian ini lendutan ijin sebesar 2,367 mm. Rekapitulasi perhitungan tahanan batang lentur terhadap lendutan ijin pada balok laminasi dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7. Tahanan Batang Lentur Terhadap Lendutan Ijin

Benda Uji	Nilai MOE (MPa)	MOE Terkoreksi (E') (Mpa)	Lendutan (Δ) (mm)	Keterangan
A01	3982,978	3385,531	13,932	Melebihi Lendutan Ijin
A02	4110,889	3494,255	10,224	Melebihi Lendutan Ijin
A03	5140,497	4369,422	9,259	Melebihi Lendutan Ijin
A04	5722,290	4863,946	9,412	Melebihi Lendutan Ijin
A11	5968,144	5072,923	8,824	Melebihi Lendutan Ijin
A12	6386,144	5428,222	8,547	Melebihi Lendutan Ijin
A13	5849,553	4972,120	11,444	Melebihi Lendutan Ijin
A14	6742,532	5731,152	9,664	Melebihi Lendutan Ijin
A21	5194,299	4415,154	9,412	Melebihi Lendutan Ijin
A22	5010,147	4258,625	11,131	Melebihi Lendutan Ijin
A23	4518,209	3840,477	9,098	Melebihi Lendutan Ijin
A24	4519,737	3841,776	5,882	Melebihi Lendutan Ijin
A31	5017,442	4264,826	8,209	Melebihi Lendutan Ijin
A32	4426,057	3762,148	8,442	Melebihi Lendutan Ijin
A33	4348,163	3695,939	13,574	Melebihi Lendutan Ijin
A34	5522,892	4694,458	9,195	Melebihi Lendutan Ijin

Berdasarkan Tabel 7 semua benda uji melebihi lendutan ijin sehingga terjadi peningkatan tegangan pada balok laminasi. Lendutan sebuah batang lentur ditentukan oleh banyak faktor, seperti gaya-gaya luar yang bekerja, bentang balok, momen inersia penampang, dan modulus elastisitas lentur terkoreksi. Sehingga pada beberapa jenis struktur tertentu sering kali dimensi penampang balok ditentukan oleh pembatasan nilai lendutan tidak oleh tegangan lentur. Selain itu, besarnya nilai lendutan disebabkan oleh pengaruh dari balok laminasi yang terdiri dari beberapa lapisan yang terpisah (tidak solid) sehingga turunnya elastisitas balok dapat dipengaruhi

oleh beberapa hal seperti kualitas perekat yang tidak seragam, kekuatan tiap lapisan kayu yang tidak sama hingga kemungkinan adanya bagian yang cacat pada salah satu lapisan terutama pada limbah palet kayu pinus.

PENUTUP

Kesimpulan

1. Penambahan kayu mahoni sebagai perkuatan balok laminasi dari limbah palet kayu pinus berpengaruh terhadap kuat lenturnya. Penambahan kayu mahoni sebagai perkuatan pada balok laminasi dapat meningkatkan nilai *Modulus of Rupture* (MoR) dan *Modulus of Elasticity* (MoE). Meskipun penambahan kayu mahoni dengan limbah palet kayu pinus dengan perbandingan 1:1 (variasi A2) tidak memiliki perbedaan yang begitu signifikan dengan balok laminasi yang hanya menggunakan limbah palet kayu pinus saja.
2. Nilai *Modulus of Rupture* (MOR) rata-rata untuk variasi A0 (Mahoni 0%) sebesar 35,935 MPa, variasi A1 (Mahoni 66,67%) sebesar 48,913 MPa, variasi A2 (Mahoni 50%) sebesar 36,374 MPa, dan variasi A3 (Mahoni 60%) sebesar 37,099 MPa. Nilai *Modulus of Elasticity* (MOE) rata-rata untuk variasi A0 (Mahoni 0%) sebesar 4739,163 MPa, variasi A1 (Mahoni 66,67%) sebesar 6236,583 MPa, variasi A2 (Mahoni 50%) sebesar 4810,598 MPa, dan variasi A3 (Mahoni 60%) sebesar 4828,639 MPa. Variasi A1 dengan persentase ketebalan kayu mahoni terbanyak memiliki nilai MOE dan MOR tertinggi.

Saran

1. Dapat dilakukan pengujian pendahuluan yang lebih rinci lagi untuk mengetahui karakteristik dari masing-masing kayu agar memudahkan pada saat pembuatan benda uji kuat lentur.
2. Untuk meningkatkan kuat lentur yang lebih tinggi sebaiknya dikombinasikan menggunakan jenis kayu lain yang lebih tinggi kode mutu nya dibandingkan kayu Mahoni.
3. Pada saat dilakukan pengempaan sebaiknya dilakukan dengan beban rencana agar setiap benda uji diperlakukan sama rata dan pegempaan lebih kuat tekanannya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Sinaga, M., 1994, Pengaruh Bentuk Sambungan dan Jumlah Paku Terhadap Kekuatan Sambungan Kayu. *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*, Bogor.
- [2] Patria, A., A., & Pribadi, T., W., 2017, Analisis Teknis dan Ekonomis Pembangunan Kapal Ikan Tradisional Ukuran < 10 GT Berbahan Kayu Utuh Dengan Teknologi Laminasi Kayu Mahoni. *Jurnal Teknik ITS*, Surabaya.
- [3] Safitri, R., & Rachmat, G., 2016, *Studi Kelayakan Kayu Bekas Landasan Peti Kemas sebagai Elemen Interior Lepas*. ATRAT: *Jurnal Seni Rupa*, Institut Seni Budaya Indonesia, Bandung.
- [4] Jihannanda, P., 2013, *Studi Kuat Lentur Balok Laminasi Kayu Sengon dengan Kayu Kelapa di Daerah Gunung Pati Semarang*. Skripsi, Universitas Negeri Semarang, Semarang.
- [5] Moody RC., Hernandez R., Liu JY., 1999, *Glued structural members*. In: *Wood Handbook, Wood as an Engineering Material*. WI: USDA Forest Service, Forest Products Laboratory. Madison.
- [6] Sugiarto, B., Fakhri, Kamaldi, A., 2019, *Kekuatan Sambungan Perpanjangan Batang Kayu Ulin dengan Kombinasi Baut dan Perekat Epoxy*, *JOM FTeknik* 6(2), Universitas Riau, Pekanbaru.
- [7] Arnandha, Y., 2006, *Pengaruh Jenis Perekat terhadap Keruntuhan Lentur dan Geser Balok Laminasi Galar Serta Bilah Vertikal Bambu Peting*. Tesis, Universitas Gajah Mada, Yogyakarta.
- [8] Bowyer JL, Rubin S, Jhon GH. 2003. *Forest Products and Wood Science : An Introduction Fourth edition*. United State of Amerika : Iowa State Press.
- [9] Walker, J. C. F. 1993. *Primary wood processing principle and practice champman and hall*. London