

REKAYASA PEMBUATAN BALOK KAYU STRUKTURAL BERUKURAN BESAR DARI BALOK-BALOK KAYU BERUKURAN KECIL DENGAN PERKUATAN BAJA TULANGAN

Abdul Rochman

Jurusan Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Surakarta
Jl. Ahmad Yani Pabelan Kartasura Tromol Pos 1 Surakarta 57102
Email : ab_rochman@yahoo.com

ABSTRACT

At present, it is difficult to obtain the large size of wood beams, whereas the need to support heavy constructions is high. On the other hand, significant amount of small wood beams and log are available everywhere. Usually, these small wood beams and log are used to non-structural, or even for firewood. The objective of this study is to create a technology to made large structural wood beam by using the small wood beams.

This study used 17 test models with the dimensions 40 mm x 90 mm x 1900 mm with the composition, 5 test beams made of whole mahoni (full section-BU), 6 test compiled wood beams made of 2 side layers (BS2BS), and 6 test compiled wood beams of 3 side layers (BS3BS). From those compiled beams made, three of them are made without strengthening, and the other three are given double steel bar strengthening using steel bar with the diameter is 8 mm.

The result of this research shows that the load capacity of compiled wood beam increase significantly, i.e. about 87 % for BS2BS and 96% for BS3BS. The stiffness also increses as well, i.e. 79,4% for BS2BS and 90,5% for BS3BS. Therefore, it can proved technically, that it is possible to make big wood beam structure for heavy construction by using smaller dimension beams which has load capacity and performance is near with the whole beam.

KEYWORDS: *compiled beam, load capacity, stiffness*

PENDAHULUAN

Permintaan kayu sebagai bahan konstruksi selalu meningkat dari tahun ke tahun, padahal kemampuan penyediaan volume kayu semakin menipis. Kayu kualitas baik (kelas kuat I/II) umumnya memiliki usia tebang sampai puluhan tahun (30 tahun lebih). Usia tebang yang lama, apalagi dengan areal penanaman yang semakin menyempit, menimbulkan masalah tersendiri bagi penyediaan kayu. Sekarang ini sudah sangat sulit diperoleh balok kayu dengan ukuran besar, padahal untuk mendukung konstruksi bentang panjang, seperti gelagar jembatan misalnya, seringkali memerlukan balok berukuran besar. Disisi lain, tersedia cukup melimpah balok dan batang kayu berukuran kecil dan pendek, baik dari potongan cabang pohon, limbah akibat kesalahan proses produksi, ataupun kayu bekas struktur yang sudah tidak dipakai. Umumnya balok dan batang kayu tersebut digunakan untuk keperluan non-struktural, atau bahkan hanya sebagai kayu bakar.

Sesuai dengan prinsip ekoefisiensi, perlu kiranya diupayakan suatu teknologi yang tepat sehingga balok-balok kayu limbah di atas dapat dimanfaatkan kembali (*reuse*). Hasil pemanfaatan haruslah tetap memenuhi standar dan spesifikasi teknis yang disyaratkan. Teknologi balok susun sangat tepat dipilih sebagai solusi bagi permasalahan di atas. Namun sudah diketahui, sebaik apapun balok susun dibuat, kekuatannya tidak dapat menyamai kekuatan balok tunggal non-susun, untuk dimensi yang sama tentunya. PKKI 1961 mensyaratkan, untuk menghitung momen inersia netto tampang (I_{netto}) dari balok susun harus dikenakan faktor reduksi. Sebagai contoh, balok susun persegi yang tersusun dari 2 bagian dengan alat sambung geser pasak kayu ataupun kokot, harus dikenakan reduksi 0,4 (Wiryomartono, 1976). Besarnya faktor reduksi tersebut mengindikasikan bahwa, teknologi balok susun yang dikenal selama ini terbukti kurang efektif dalam mendukung beban yang ada. Sampai pada uraian ini, permasalahannya akhirnya berkembang menjadi, bagaimana cara meningkatkan daya dukung balok susun.

Penelitian tentang cara-cara perkuatan lentur pada balok kayu telah dilakukan oleh Rochman (2003) yang menggunakan bambu apus. Hasil penelitian membuktikan, bahwa pemasangan perkuatan dari bambu apus pada balok kayu utuh mampu meningkatkan daya dukung balok kayu sampai 55 %. Pada penelitian ini, balok kayu yang dikaji adalah balok kayu susun dua dan balok susun tiga. Penyusunannya dibuat sedemikian rupa sehingga dapat memanfaatkan batang-batang kayu kecil dan pendek. Perkuatan diberikan oleh baja tulangan yang dipasang dengan lintasan seperti tendon pada beton pratekan. Baja tulangan tersebut dipasang pada kedua sisi balok. Perbandingan modulus elastis antara baja tulangan dan kayu yang cukup besar dapat menjamin bahwa perkuatan dari baja tulangan dapat bekerja cukup efektif.

Jika teknik perkuatan ini terbukti efektif, maka permasalahan keterbatasan ukuran batang kayu yang dikeluhkan selama ini akan dapat teratasi. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat membuktikan, bahwa secara teknis sangat memungkinkan dibuat suatu balok kayu berukuran besar dengan memanfaatkan balok-balok pendek dengan ukuran yang lebih kecil.

Balok adalah elemen struktur yang memikul beban arah tegak lurus terhadap sumbu longitudinalnya. Balok susun adalah suatu balok yang tersusun dari dua atau lebih balok yang lebih kecil dengan cara penyusunan sedemikian rupa sehingga dapat bekerja secara bersama dalam memikul beban. Supaya antar balok penyusun dapat bekerja secara bersama, maka diperlukan alat penghubung geser, untuk balok kayu biasa digunakan alat sambung pasak kayu maupun cincin belah.

Salah satu cara meningkatkan kekuatan balok susun adalah dengan memberikan suatu tegangan awal sedemikian rupa sehingga sisi atas balok mengalami tegangan tarik dan sisi bawah balok mengalami tegangan tekan sebelum beban diberikan. Fungsi ini diharapkan dapat dipikul oleh baja tulangan. Dengan tegangan awal tertentu dan dengan lintasan sebagaimana pada balok beton prategang, maka sisi atas balok mengalami tegangan tarik dan serat di sisi bawah balok mengalami tegangan tekan, sebelum beban diberikan. Dengan demikian daya dukung balok susun dapat ditingkatkan dari daya dukung awalnya.

Gaya tarik baja tulangan yang memiliki eksentrisitas sebesar e terhadap garis netral elastis balok menyebabkan terjadinya momen negatif pada balok sebesar $P_{awal} \cdot e$. Pada saat pemberian tegangan awal, tegangan lentur pada balok dihitung sebagai berikut:

$$\sigma_{lt} = -\frac{P_{awal} \cdot \cos \alpha}{b \cdot h} \pm \frac{6P_{awal} \cdot \cos \alpha \cdot e}{0,7 \cdot b \cdot h^2} \mp \frac{0,75 \cdot q_{bs} \cdot l^2}{0,7 \cdot b \cdot h^2} \quad (1)$$

Sedang tegangan pada tendon baja:

$$\sigma_s = +\frac{P_{awal}}{A_{tend}} - \frac{12 P_{awal} \cdot \cos \alpha \cdot e \cdot e}{0,3 \cdot b \cdot h^3} + \frac{1,5 \cdot q \cdot l^2 \cdot e}{0,3 \cdot b \cdot h^3} \quad (2)$$

Pada kondisi layan yaitu setelah beban luar F bekerja, tegangan lentur pada serat bagian atas balok dapat dihitung dengan persamaan:

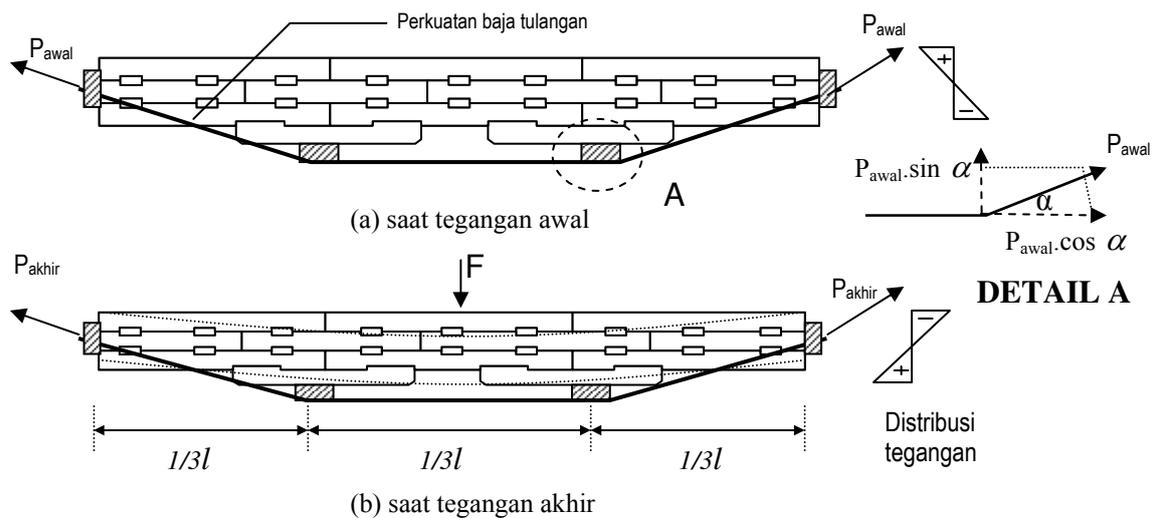
$$\sigma_{lt} = -\frac{(P_{awal} - LOP) \cdot \cos \alpha}{b \cdot h} \pm \frac{6(P_{awal} - LOP) \cdot \cos \alpha \cdot e}{0,7 \cdot b \cdot h^2} \mp \frac{0,75 \cdot q_{bs} \cdot l^2}{0,7 \cdot b \cdot h^2} \mp \frac{0,25 \cdot F \cdot l}{0,7 \cdot b \cdot h^2} \quad (3)$$

sedang tegangan pada tendon baja:

$$\sigma_s = +\frac{(P_{awal} - LOP)}{A_{tend}} - \frac{12(P_{awal} - LOP) \cdot \cos \alpha \cdot e}{0,3 \cdot b \cdot h^3} + \frac{1,5 \cdot q \cdot l^2 \cdot e}{0,3 \cdot b \cdot h^3} \mp \frac{3 \cdot F \cdot l \cdot e}{0,3 \cdot b \cdot h^3} \quad (4)$$

dengan,

- A_{tend} : penampang tendon baja (mm²)
- b : lebar balok (mm)
- h : tinggi balok (mm)
- e : eksentrisitas baja tulangan dan garis elastik balok (mm)
- q_{bs} : berat sendiri balok (N/mm)
- l : bentang balok (mm)
- LOP : *loss of prestress* (N) \approx diambil sebesar 50 %
- P_{awal} : gaya tarik awal perkuatan baja tulangan(N)
- F : beban luar (N)



Gambar 1. Balok susun kayu dan perkuatan baja tulangan.

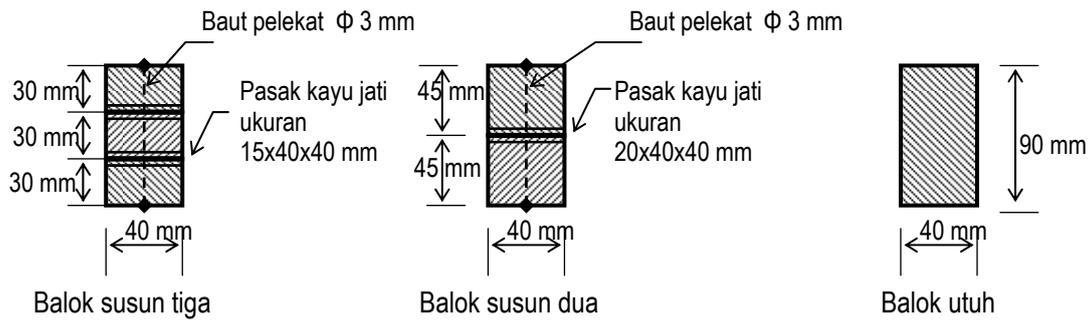
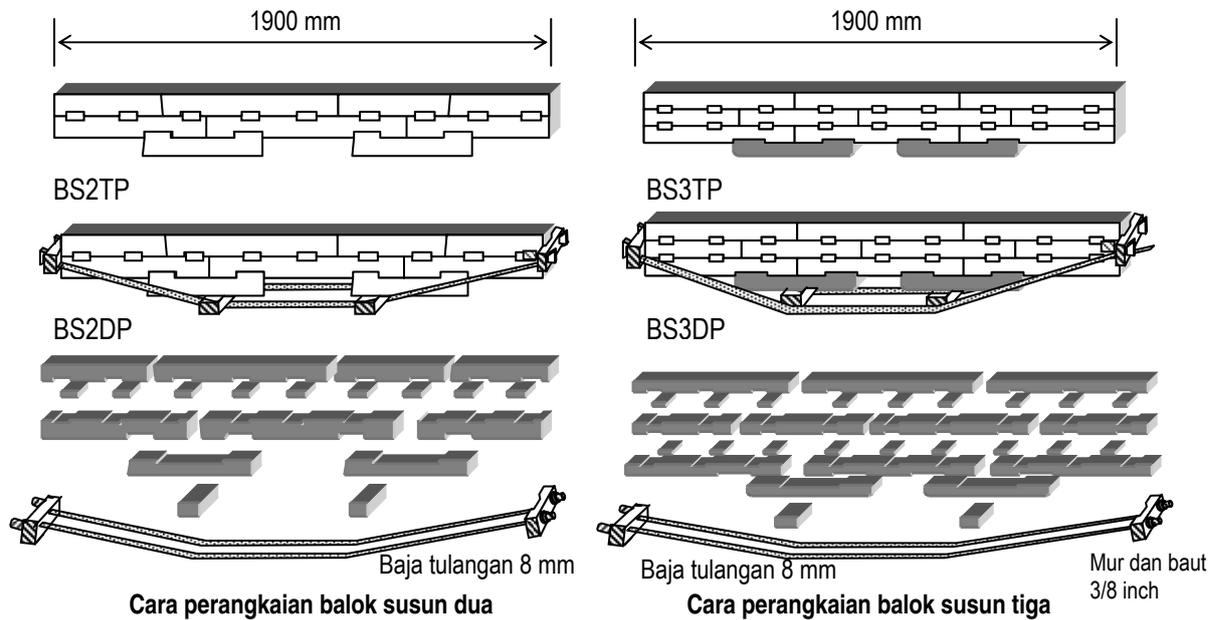
METODE PENELITIAN

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah kayu Mahoni, kayu Jati, dan baja tulangan diameter 8 mm. Untuk pengelem/pengencang perkuatan baja tulangan digunakan skrup dan baut diameter 3/8 inch. Kayu mahoni dan kayu jati yang digunakan dibeli di pasaran daerah Klaten, sebelum digunakan kayu diletakkan di ruangan tertutup selama beberapa waktu (kurang lebih 5 minggu) supaya diperoleh kondisi kering udara. Setelah itu baru dibuat benda uji dengan jumlah dan ukuran sesuai kebutuhan pengujian. Kayu jati digunakan sebagai bahan pembuat pasak kayu, karena kayu jati memiliki kekuatan lebih tinggi dibandingkan kayu mahoni. Untuk mengetahui kekuatan bahan, dilakukan berbagai pengujian karakteristik bahan, yaitu meliputi: uji tarik, uji desak, uji geser dan uji lentur. Ukuran benda uji dibuat mengikuti standar *ASTM* (Tjokrodimuljo, 1988). Benda uji balok balok susun dibuat berukuran 40 mm x 90 mm x 1900 mm dengan jumlah 17 buah dengan rincian: (i) 5 balok uji kayu mahoni utuh (BU), (ii) 6 balok uji kayu susun 2 sisi bawah sambungan (BS2BS), dan (iii) 6 balok uji kayu susun 3 sisi bawah sambungan (BS3BS). Dari keseluruhan balok susun yang dibuat, 3 diantaranya dibuat tanpa perkuatan, dan 3 sisanya diberi perkuatan baja tulangan dengan diameter 8 mm.

Peralatan utama yang digunakan antara lain: (1) *Dial gauge* merk *Peacock*, dengan ketelitian dapat sampai 0,01 mm. Alat ini digunakan untuk mengukur lendutan. (2) Mesin UTS (*Universal Test Mechine*), merk *United*, mesin uji dilengkapi dengan komputer yang dapat mencetak hasil berupa diagram tegangan-regangan ataupun kurva hubungan beban-lendutan lewat *ploter/printer*.

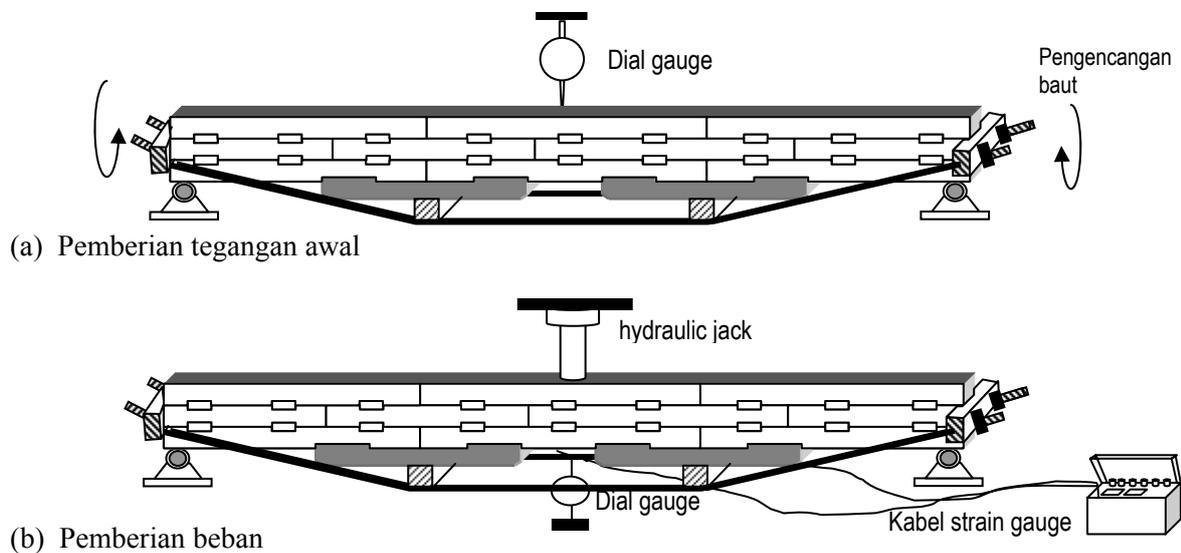
Pemberian tegangan awal dilakukan dengan mengencangkan baut dari klem baja sampai lendutan pada bagian tengah balok uji kayu (yang diketahui dari pembacaan *Dial Gauge*) sampai

pada nilai yang sudah dihitung sebelumnya. Untuk lebih jelasnya, cara pemberian tegangan awal dapat dilihat pada Gambar 3.



Penampang balok uji

Gambar 2. Bentuk, ukuran, dan macam balok uji kayu.



Gambar 3. Set-up pengujian.

Pengujian dilakukan dengan satu titik pembebanan di tengah bentang. Pada sisi bawah tengah benda uji ditempatkan *Dial Gauge* untuk mengukur lendutan. Setelah semua instrumen yang dipasang sudah dipastikan bekerja dengan baik, maka *hydraulic jack* dipompa secara pelan-pelan sambil mengamati hasil bacaan beban pada *load cell*, regangan di *Strain Indicator*, dan lendutan di *Dial Gauge*. *Set-up* pengujian selengkapnya dapat dilihat pada Gambar 3. Dari pengujian karakteristik bahan, diperoleh berturut-turut: kuat-tarik elastis, kuat-tarik ultimit, kuat-desak elastis, kuat-desak ultimit, kuat-lentur elastis, kuat-lentur ultimit, baik untuk kayu mahoni maupun baja tulangan. Data-data tersebut digunakan dalam analisis berikutnya yaitu dengan menggunakan Persamaan (1) sampai (4) untuk mengetahui momen elastis balok, maupun tegangan pada serat-balok dan perkuatan baja tulangan.

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

1. Karakteristik bahan

Dari pengujian kuat desak kayu mahoni, diperoleh kuat desak elastis dan kuat desak maksimum (rata-rata) sebesar 41 MPa dan 47,330 MPa. Dari pengujian kuat tarik kayu mahoni, diperoleh kuat tarik elastis dan kuat tarik maksimum (rata-rata) sebesar 84,683 MPa dan 115,924 MPa. Dari pengujian kuat lentur, diperoleh kuat lentur elastis dan kuat lentur maksimum (rata-rata) sebesar 40,536 MPa dan 60,237 MPa. Untuk baja tulangan diperoleh tegangan leleh dan tegangan maksimum (rata-rata) sebesar 285,913 MPa dan 414,717 MPa.

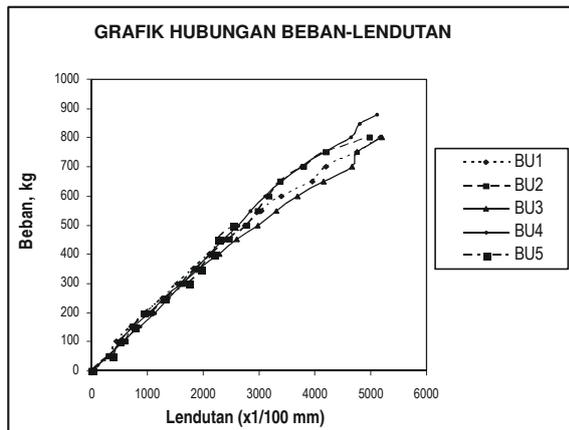
2. Hubungan beban dan lendutan

Kurva hubungan beban dan lendutan pengujian balok kayu ditunjukkan pada Gambar 4. Terlihat bahwa setelah diberi perkuatan dari baja tulangan, balok kayu susun kaku seperti ditunjukkan pada Gambar 4(b) dan Gambar 4(c). Disamping itu besarnya beban maksimum yang mampu didukung balok kayu susun juga menjadi lebih besar dibanding dengan yang balok kayu susun tanpa perkuatan. Dari Tabel 1. terlihat bahwa setelah diberi perkuatan baja tulangan 8 mm, daya dukung balok kayu mahoni susun dua meningkat rata-rata sebesar 87%, dan pada balok kayu mahoni susun tiga sebesar 96%. Peningkatan nilai ini adalah cukup signifikan. Jika dibandingkan dengan daya dukung balok kayu mahoni utuh, maka daya dukung balok kayu mahoni susun dua yang diberi perkuatan baja tulangan rata-rata sekitar 84,3% daya dukung balok utuh, sedang yang susun tiga sekitar 78,4% daya dukung balok kayu mahoni utuh. Hasil ini sesuai dengan yang diharapkan seperti yang diuraikan sebelumnya.

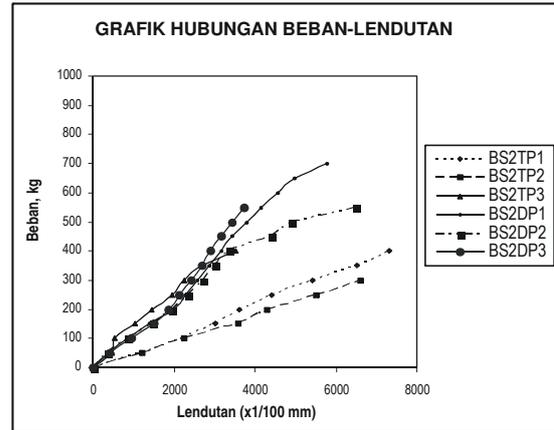
Tabel 1. Perbandingan beban maksimum balok kayu utuh dan balok kayu susun

Jenis balok	Kode benda uji	Beban maksimum, N	Beban maksimum rata-rata, N	Perbandingan
Balok mahoni utuh (BU)	BU1	8000	8225	1,000
	BU2	7900		
	BU3	8200		
	BU4	8800		
	BU5	4600*		
Balok susun 2 tanpa perkuatan	BS2TP1	3600	3700	0,450 (1,000)
	BS2TP2	3600		
	BS2TP3	3900		
Balok susun 2 dengan perkuatan baja tulangan 8 mm	BS2DP1	6900	6930	0,843 (1,873)
	BS2DP2	7400		
	BS2DP3	6500		
Balok susun 3 tanpa perkuatan	BS3TP1	3540	3346	0,407 (1,000)
	BS3TP2	3000		
	BS3TP3	3500		
Balok susun 3 dengan perkuatan baja tulangan 8 mm	BS3DP1	3500*	6450	0,784 (1,927)
	BS3DP2	5800		
	BS3DP3	7100		

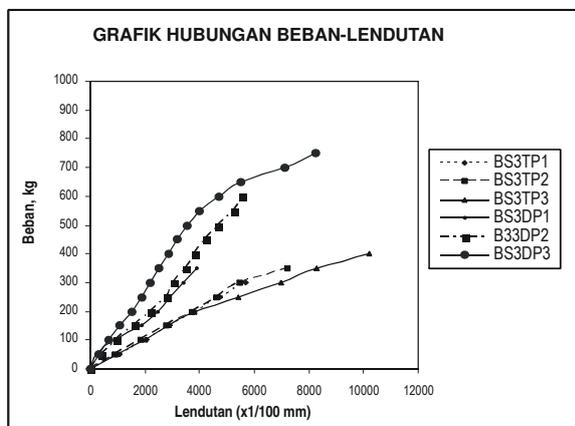
* data tak ikut diperhitungkan dalam analisis



(a) Balok kayu utuh



(b) Balok kayu susun dua



(c) Balok kayu susun tiga

Keterangan notasi:

- BU = Balok Utuh
- BS2TP = Balok Susun 2 Tanpa Perkuatan
- BS2DP = Balok Susun 2 Dengan Perkuatan baja tulangan 8 mm
- BS3TP = Balok Susun 3 Tanpa Perkuatan
- BS3DP = Balok Susun 3 Dengan Perkuatan baja tulangan 8 mm

Gambar 4. Kurva hubungan beban-lendutan balok uji kayu.

3. Analisis tegangan

Analisis tegangan disini juga dilakukan dalam kondisi elatis. Setelah data karakteristik mekanik kayu mahoni serta bambu apus diketahui, maka dengan menggunakan Persamaan (1) sampai dengan Persamaan (4) dapat ditentukan tegangan-tegangan yang bekerja pada serat di sepanjang penampang balok. Pada pembahasan ini, ditinjau dua kondisi yaitu pada saat keadaan pemberian tegangan awal, dan pada saat setelah beban bekerja.

5a). *Keadaan awal.* Dengan menggunakan Persamaan (1) sampai dengan Persamaan (2) dapat ditentukan tegangan-tegangan yang bekerja pada serat di sepanjang penampang balok. Hasil perhitungan tegangan awal selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 2. ($P_{awal} = 10000$ N).

5b). *Keadaan batas elastis.* Yang dimaksud adalah ketika pembebanan sudah dianggap mencapai batas elastis dari perilaku balok. Digunakan kata “dianggap”, karena seperti lazimnya pengujian kayu, batas elastis pembebanan sangat sulit ditentukan (lihat Gambar 4). Beban batas elastis digunakan dalam analisis ini, karena Persamaan (3) dan Persamaan (4) diformulasikan dengan menganggapnya bersifat elastis-linier. Dengan persamaan-persamaan tersebut, dapat ditentukan tegangan-tegangan yang bekerja pada serat di sepanjang penampang balok. Hasil perhitungan tegangan akhir selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 3. Untuk perhitungan keadaan akhir, nilai kehilangan tegangan (*LOP*) dianggap sebesar 50%.

Tabel 2. Tegangan awal teoritis balok uji kayu susun dengan perkuatan baja tulangan

Balok uji	Bagian	Tegangan lentur akibat (MPa)			Tegangan lentur total (MPa)
		$P_{awal} \cdot \cos \alpha$	$P_{awal} \cdot \sin \alpha$	Berat sendiri balok	
BS2DP	Serat balok kayu atas	-2,759	16,095	-0,263	13,073
	Serat balok kayu bawah	-2,759	-16,095	0,263	-18,591
	Baja tulangan	99,522	-24,525	0,144	75,141
BS3DP	Serat balok kayu atas	-2,759	18,394	-0,300	15,335
	Serat balok kayu bawah	-2,759	-18,394	0,300	-20,853
	Baja tulangan	99,522	-49,050	0,288	50,760

Tabel 3. Tegangan batas elastis teoritis balok uji kayu susun dengan perkuatan baja tulangan

Balok uji	Bagian	Tegangan lentur akibat (MPa)				Tegangan lentur total (MPa)
		$P_{akhir} \cdot \cos \alpha$	$P_{akhir} \cdot \cos \alpha \cdot e$	Berat sendiri balok	Beban luar (F)	
BS2DP	Serat balok kayu atas	-1,380	8,047	-0,263	-41,667	-35,261
	Serat balok kayu bawah	-1,380	-8,047	0,263	41,667	32,502
	Baja tulangan	49,761	-12,263	0,144	86,420	124,062
BS3DP	Serat balok kayu atas	-1,380	9,197	-0,300	-47,619	-40,102
	Serat balok kayu bawah	-1,380	-9,197	0,300	47,619	37,343
	Baja tulangan	49,761	-24,525	0,288	172,840	198,364

Dari Tabel 2 dan Tabel 3 terlihat, bahwa gaya prategang awal ternyata dapat bekerja sesuai yang diinginkan, yaitu tegangan sisi atas balok berupa tarik, dan sebaliknya di sisi bawah berupa desak.

4. Pola retak dan keruntuhan benda uji

Secara umum, pelaksanaan pengujian lentur benda uji balok kayu tak menemui masalah dan berjalan sesuai yang direncanakan. Dengan pembebanan secara manual, respon yang diberikan benda uji balok kayu dapat teramati dengan baik. Keruntuhan dimulai dengan timbulnya retak-retak pada balok di tepi bawah, retak tersebut secara perlahan merambat ke tengah dengan kemiringan tertentu sesuai dengan arah serat pada bagian tersebut. Bersamaan dengan perambatan retak tersebut, lendutan pada balok kayu juga akan membesar. Setelah lendutan yang terjadi cukup besar, daya dukung balok akan turun secara drastis. Proses keruntuhannya disertai dengan suara semacam ledakan kecil. Begitu runtuh, daya dukung balok uji langsung hilang.

Dari pengamatan juga diperoleh, bahwa ukuran pasak kayu jati yang dipakai cukup memadai dan mampu menahan gaya geser yang ada. Hal ini terlihat dengan tidak-adanya satupun pasak yang rusak, baik karena geseran, desakan, maupun tarikan. Jumlah dan kekuatan baut pelekat yang terpasang juga mencukupi. Hal ini terlihat dengan tetap melekatnya antara komponen-komponen penyusun balok pelekat dalam arah vertikal. Meski pembebanan sampai balok uji runtuh, maka tidak dijumpai sesar secara arah vertikal. Dengan demikian dapat disimpulkan, bahwa desain balok uji telah memenuhi persyaratan teknis untuk pengujian.

5. Analisis reduksi momen inersia penampang

Untuk mendapatkan berapa besarnya faktor reduksi momen inersia pada penampang balok susun (yang tanpa perkuatan baja tulangan), dilakukan hitungan dengan urutan sebagai berikut: (i) dari pengujian balok uji kayu mahoni utuh, maka dapat dihitung nilai modulus elastis lentur (E) balok kayu dengan menggunakan bentuk lain dari persamaan lendutan akibat pembebanan satu titik ditengah bentang, yaitu

$$E = \frac{PL^3}{48 \cdot \Delta_{elastis} \cdot I} \quad (5)$$

(ii) kemudian nilai modulus elastis rerata yang diperoleh dari hitungan digunakan untuk menghitung momen inersia netto (I_{netto}) penampang balok susun, yaitu

$$I_{netto} = \frac{PL^3}{48 \cdot \Delta_{elastis} \cdot E} \quad (6)$$

(iii) faktor reduksi momen inersia penampang diperoleh dari perbandingan antara momen inersia netto dengan momen inersia brutto. Hitungan selengkapnya, disajikan dalam Tabel 4 di bawah.

Tabel 4. Faktor reduksi momen inersia penampang balok uji kayu susun

Jenis balok	Kode benda uji	$\Delta P_{elastis}$ N	$\Delta_{elastis}$ Mm	Mom inersia brutto, mm ⁴ $I_{br} = \frac{1}{12}bh^3$	Mod. Elastis, MPa $E = \frac{\Delta PL^3}{48 \cdot \Delta_{elastis} \cdot I}$	Mom inersia netto $I_{netto} = \frac{\Delta PL^3}{48 \cdot \Delta_{elastis} \cdot E}$	Faktor reduksi momen inersia, I_{netto}/I_{brutto}
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8) = (7)/(5)
Balok utuh	BU1	1000	4,19	2430000	11933		
	BU2	1000	4,34	2430000	11521		
	BU3	1000	4,41	2430000	11338		
	BU4	1000	5,64	2430000	8865		
	BU5	1000	4,00	2430000	12500		
	Rata-rata				2430000	11231	
Balok susun 2 tanpa perkuatan	BS2TP1	500	10,45	2430000	11231	517601	0,213
	BS2TP2	500	5,04	2430000	11231	1073202	0,442
	BS2TP3	500	10,55	2430000	11231	512695	0,211
	Rata-rata						
Balok susun 3 tanpa perkuatan	BS3TP1	500	10,10	2430000	11231	535538	0,220
	BS3TP2	500	9,32	2430000	11231	580358	0,239
	BS3TP3	500	10,14	2430000	11231	533425	0,220
	Rata-rata						

Dari Tabel 4 terlihat, bahwa momen inersia penampang balok uji kayu susun mengalami reduksi cukup besar, yaitu sebesar 0,289 untuk balok susun dua (BS2BS) dan sebesar 0,226 untuk balok susun tiga sisi (BS3BS). Nilai ini cukup jauh dengan angka yang diberikan dari PKKI 1961 untuk balok susun dua, yaitu sekitar 0,3. Hal ini dikarenakan angka pada PKKI 1961 diambil atas asumsi, bahwa balok-balok penyusun dari balok susun adalah menerus, sedang pada penelitian ini batangnya adalah terputus-putus dan batang di sisi bawahpun juga merupakan sambungan. Namun apapun hasilnya, jelas terlihat teknologi balok susun yang dikenal selama ini memang belum cukup efektif dalam mentransverkan gaya gaya yang ada.

6. Kekakuan dan lendutan maksimum.

Dari kurva hubungan beban-lendutan pada Gambar 4 terlihat, bahwa pada awal-awal pembebanan kurva berbentuk linier dan material kayu masih berperilaku elastik. Setelah mencapai nilai beban tertentu, bentuk kurva sudah nonlinier yang mana berarti kayu sudah memasuki fase *in-elastis*. Keadaan ultimit dicapai pada saat pembebanan mencapai beban maksimum yang ditandai dengan terjadinya lendutan cukup besar pada balok kayu. Besarnya

kemiringan pada bagian yang linier pada keseluruhan kurva tersebut tidak lain adalah menggambarkan kekakuan balok uji. Kekakuan didefinisikan sebagai besarnya gaya yang diperlukan untuk memperoleh satu unit lendutan (*displacement*), semakin kaku balok uji maka semakin besar kemiringannya. Dalam bentuk persamaan, kekakuan (*k*) dihitung sebagai berikut:

$$k = \frac{P_e}{\Delta_e} \quad (7)$$

dengan

k : kekakuan, N/mm

P_e : beban batas elastis, N

Δ_e : lendutan batas elastis, mm

Setelah balok kayu memasuki fase in-elastis, kekuatan balok kayu dapat dibandingkan melalui daktilitasnya. Daktilitas (μ) dapat diperoleh dengan membandingkan lendutan pada saat balok uji runtuh ($\Delta_{ultimit}$) dengan lendutan pada batas elastis (Δ_e). Tapi karena kesulitan menentukan lendutan pada batas elastis (Δ_e), maka parameter yang digunakan bukan daktilitas, melainkan lendutan pada saat balok uji runtuh ($\Delta_{ultimit}$). Nilai kekakuan dan lendutan pada saat balok uji runtuh ($\Delta_{ultimit}$) dari balok uji kayu ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Perbandingan kekakuan dan lendutan maksimum balok uji.

Jenis balok	Kode benda uji	$\Delta P_{elastis}$ N	$\Delta_{elastis}$ mm	$\Delta_{ultimit}$ mm	Kekakuan N/mm	Kekakuan rata-rata N/mm	Lendutan maks, mm
Balok utuh	BU1	1000	4,19	51,80	238,663	224,668 (1,000)	55,55 (1,000)
	BU2	1000	4,34	49,80	230,415		
	BU3	1000	4,41	51,20	226,757		
	BU4	1000	5,64	51,95	177,305		
	BU4	1000	4,00		250,000		
Balok susun 2 TP	BS2TP1	500	10,45	73,20	47,847	64,815 (0,288)	69,70 (1,255)
	BS2TP2	500	5,04	66,20	99,206		
	BS2TP3	500	10,55		47,393		
Balok susun 2 DP	BS2DP1	500	4,81	57,80	103,950	116,362 (0,518)	53,61 (0,965)
	BS2DP2	500	4,85	65,78	103,093		
	BS2DP3	500	3,52	37,27	142,045		
Balok susun 3 TP	BS3TP1	500	10,10	72,20	49,505	50,820 (0,226)	87,10 (1,567)
	BS3TP2	500	9,32	56,96	53,648		
	BS3TP3	500	10,14	102,00	49,310		
Balok susun 3 DP	BS3DP1	500	6,61	41,49	75,643	90,369 (0,402)	44,98 (0,809)
	BS3DP2	500	6,38	51,35	78,370		
	BS3DP3	500	4,27	42,12	117,096		

Dari Tabel 5 terlihat bahwa, kekakuan balok susun dua hanya sekitar 28,8%, dari kekakuan balok utuh.. Namun kekakuan itu akan meningkat sebesar 79,4% jika dipasang perkuatan baja tulangan diameter 8 mm, meskipun kekakuan ini masih tetap lebih rendah

dibanding kekakuan balok utuh, yaitu sekitar 52%. Hal yang sama juga terdapat pada balok susun tiga, kekakuan balok susun tiga hanya sekitar 50% dari kekakuan balok utuh. Namun kekakuan itu akan meningkat sebesar 90,5% jika dipasang penguat tendon dari baja tulangan diameter 8 mm, meskipun kekakuan ini masih tetap lebih rendah dibanding kekakuan balok utuh, yaitu sekitar 69,1%. Dari hasil tersebut di atas terlihat, pemasangan perkuatan dari baja tulangan memberikan tambahan kekakuan yang cukup signifikan, yaitu sebesar 90,5%. Hal ini dikarenakan adanya selisih modulus elastis yang cukup besar antara kayu dan baja tulangan.

Dari Tabel 5 juga terlihat bahwa, lendutan maksimum balok susun dua lebih besar sekitar 25,5% dari lendutan maksimum balok utuh. Namun lendutan maksimum itu akan menurun sebesar 24% setelah dipasang penguat tendon dari baja tulangan diameter 8 mm. Hal yang sama juga terdapat pada balok susun tiga. Lendutan maksimum balok susun tiga lebih besar sekitar 56,7% dari lendutan maksimum balok utuh. Namun lendutan maksimum itu akan menurun sebesar 48% setelah dipasang penguat tendon dari baja tulangan diameter 8 mm, yaitu dapat mencapai 48%. Hal ini dapat juga berarti, pemasangan perkuatan baja tulangan mengurangi daktilitas balok uji kayu susun.

KESIMPULAN

Dari analisis dan pembahasan hasil pengujian yang telah diuraikan sebelumnya dapat diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. dari analisis lendutan diperoleh, momen inersia netto penampang model balok uji kayu susun dua rata-rata hanya sekitar 0,289 dan untuk model balok uji kayu susun tiga hanya sekitar 0,226,
2. daya dukung itu balok kayu susun dua meningkat sebesar 86% setelah dipasang perkuatan baja tulangan diameter 8 mm, sedang untuk balok kayu susun tiga meningkat sebesar 96%. Daya dukung ini masih lebih rendah dibanding daya dukung balok utuh, yaitu sekitar 84,3%,
3. kekakuan balok susun juga meningkat setelah diberi perkuatan baja tulangan 8 mm. Peningkatan tersebut sebesar 79,4% untuk balok kayu susun dua dan 90,5% untuk balok kayu susun tiga. setelah dipasang perkuatan baja tulangan diameter 8 mm. Kekakuan ini masih lebih rendah dibanding kekakuan balok utuh, yaitu hanya sekitar 69,1%,
4. sebaliknya, lendutan maksimum balok kayu susun justru semakin menurun setelah diberi perkuatan baja tulangan, hal ini terlihat dari lendutan maksimumnya yang menurun sebesar 24% pada balok susun dua dan 48% pada balok susun tiga,

5. dari keseluruhan hasil yang diperoleh dapat disimpulkan bahwa, secara teoritis maupun teknis dapat dibuktikan bahwa sangat mungkin dibuat balok kayu berukuran besar yang disusun dari balok-balok kayu berukuran pendek dan lebih kecil yang memiliki daya dukung dan *performa* mendekati balok penampang utuh.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada Direktur Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (DP2M) Dirjen Dikti Depdiknas yang telah mendanai penelitian ini, juga kepada segenap staf Lembaga Penelitian UMS atas bantuannya, serta kepada segenap staf dan laboran Laboratorium Mekanika Bahan PAU-Ilmu Teknik UGM atas bantuan peralatannya sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- DPMB, 1961, *Peraturan Konstruksi Kayu Indonesia*, Direktorat Penyelidikan Masalah Bangunan, Departemen Pekerjaan Umum dan Tenaga Listrik, Bandung.
- Rochman, A., 2003, *Analisis Kekuatan Balok Pratekan Kayu dan Bambu (tinjauan teoritis dan eksperimental)*, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Surakarta.
- Tjokrodimuljo, K., 1988, *Pengujian Bahan Teknik*, Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Wiryomartono, S., 1976, *Konstruksi Kayu*, Laboratorium Konstruksi Kayu, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.