

# TEKNOLOGI PEMBUATAN BALOK SUSUN KAYU KOMPOSIT BERUKURAN BESAR DARI BALOK-BALOK KAYU BERUKURAN PENDEK DAN KECIL

## *Technology of Large Compound Multiple Wooden-Beam Production using Small Logs*

Abdul Rochman<sup>1)</sup>, Aliem Sudjatmiko<sup>2)</sup>

<sup>1), 2)</sup> Staf pengajar jurusan Teknik Sipil - Universitas Muhammadiyah Surakarta, Surakarta.

Jl. A. Yani No. 1 Tromol Pos 1, Pabelan Kartasura, Surakarta 57102. e-mail: ab\_rochman@yahoo.com

### ABSTRACT

*The availability of large wood log as construction material is extremely decreasing right now. On the other hand, the availability of small and short wood log is abundant. The aim of this research is to create a technology to produce large wooden-beam using small wood logs which is combined with concrete slab. Sixteen (16) specimen beams sized 50 mm x 80 mm x 2000 mm were used in this research. The specimens consisted of : (i) 3 non-compound whole wooden-beams, (ii) 3 compound whole wooden-beams (BUC), (iii) 3 non-compound multiple wooden-beams (BS), (iv) 3 multiple wooden-beams reinforced with 8 mm diameter of steel (BSP), and (v) 4 compound multiple wooden-beams reinforced with 8 mm diameter of steel (BSCP). The dimension of concrete slab was 25 mm x 250 mm. The bolt with 6 mm diameter was used as connector with 20 mm left as shear connector. The refraction test was conducted using load controlled method by placing concentrated load on the middle of the beam. The result shows that the multiple beam capacity is increasing significantly after combined with concrete slab and reinforced with 8 mm diameter of steel, i.e. 293% (from 2788 N become 10966 N). Even the beam stiffness is extremely raising about 695% (from 45,15 N/mm become 358,2 N/mm). In addition, the life cycle of beam is more influenced by the deflection limit than the elastic load limit. This result gives evidence that technically, large structured wooden-beam produced from small logs has similar capacity and performance compared with whole beam.*

Keywords: *multiple wooden-beam, composite, reinforcement, 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 berat, seperti jembatan, 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 keefisiensi, 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. Akhirnya, permasalahannya berkembang menjadi, bagaimana cara meningkatkan daya dukung balok susun..

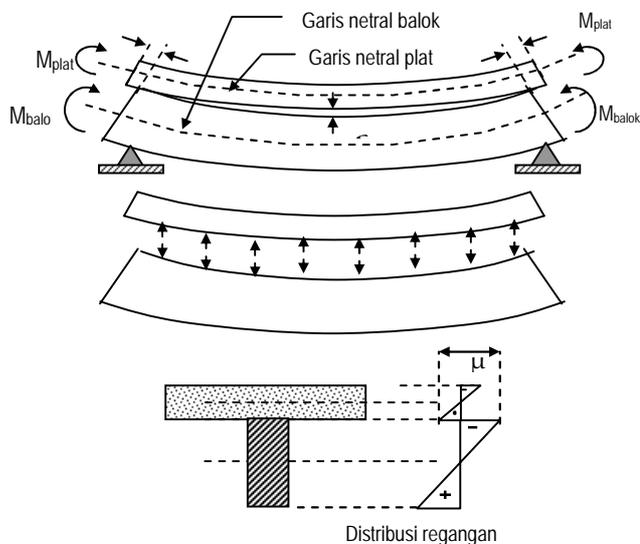
Penelitian tentang teknik perkuatan lentur balok kayu telah dilakukan oleh Rochman (2003) yang menggunakan penguat dari bambu apus. Hasil penelitian membuktikan, bahwa pemasangan perkuatan bambu apus mampu meningkatkan daya

dukung balok kayu sampai 55 %. Rochman (2006) meneliti hal serupa, namun terhadap balok susun, dan perkuatannya dari baja tulangan. Balok susun yang dipakai adalah balok susun tiga dengan ukuran 4x9x190 cm. Perkuatan dipasang dengan lintasan seperti tendon baja prategang dari balok beton pratekan, yang dipasang pada sisi kiri dan kanan dari balok kayu. Perlu diketahui, bahwa balok kayu susun yang digunakan dalam penelitian tersebut dibuat dengan memanfaatkan balok-balok kayu berukuran pendek dan kecil (rata-rata berukuran 3x4x60 cm).

Hasil penelitian menunjukkan, daya dukung balok susun meningkat 87 % setelah dipasang perkuatan baja. Nilai tersebut menjadikan daya dukung balok susun dapat hampir menyamai daya dukung balok utuh, meski tetap masih lebih rendah dari daya dukung balok utuh yaitu masih sekitar 85 % daya dukung balok utuh. Penelitian ini dimaksudkan untuk melanjutkan penelitian sebelumnya, yaitu dengan mengkompositkan balok susun dengan plat beton. Hal ini dilakukan mengingat dalam pemakaiannya, struktur balok umumnya dikombinasikan dengan plat lantai dari beton, baik itu untuk konstruksi balok lantai, ataupun gelagar jembatan.

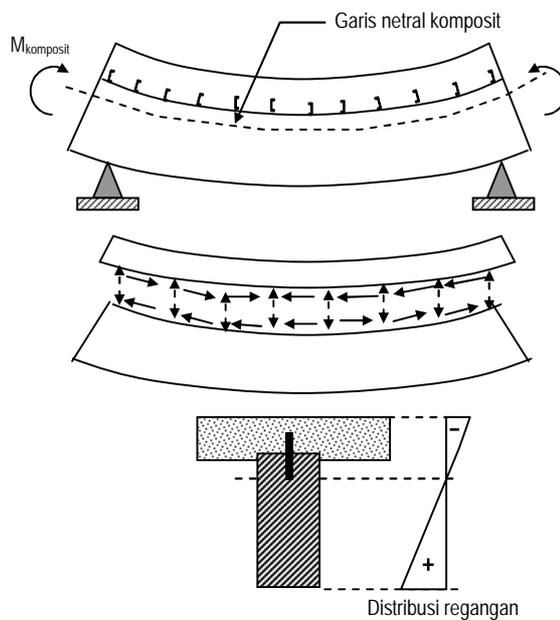
Balok komposit adalah suatu balok yang terbuat dari dua jenis bahan (atau lebih) yang digabung dengan cara sedemikian rupa sehingga dapat bekerja sebagai satu kesatuan dalam memikul beban. Pada penelitian ini, bahan-bahan yang dimaksud adalah balok kayu dan plat beton. Yang menjadikan balok kayu dan plat beton dapat dianggap menjadi satu kesatuan adalah akibat dipasangnya alat penyambung geser (*shear connector*) pada permukaan sentuh kedua bahan tersebut. Alat penyambung geser yang dipakai dalam penelitian ini adalah dengan memanfaatkan sisa panjang ke arah atas dari baut pelek balok susun. Tujuan pembuatan balok komposit adalah untuk meningkatkan daya dukung balok dengan cara memaksimalkan kekuatan yang ada pada masing-masing bahan penyusunnya. Perbandingan perilaku dan daya dukung balok komposit dan yang non komposit ditunjukkan pada Gambar 1.

Pada penelitian ini, tinjauan dilakukan secara teoritis dan secara pengujian eksperimental. Hasil dari keduanya dibandingkan untuk melihat seberapa akurasi dari metode analisis yang digunakan. Jika teknologi ini terbukti efektif, maka permasalahan keterbatasan ukuran batang kayu yang dikeluhkan selama ini akan dapat teratasi. Dari hasil penelitian ini, diharapkan dapat membuktikan bahwa secara teknis sangat memungkinkan dibuat suatu balok kayu susun berukuran besar untuk struktur berat dengan memanfaatkan balok-balok kayu dengan ukuran pendek dan yang lebih kecil.



$$M_{\text{non-comp}} = M_{\text{plat}} + M_{\text{balok}}$$

(a). Balok kayu non-komposit



$$M_{\text{comp}} \gg M_{\text{non-comp}}$$

(b). Balok komposit

Gambar 1. Balok kayu non komposit dan balok kayu komposit

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 pada sisi atas plat beton dihitung sebagai berikut:

$$\sigma_c = -\frac{P_{awal} \cdot \cos \alpha}{A_{comp}} + \frac{P_{awal} \cdot \sin \alpha \cdot d \cdot y_c}{\phi \cdot I_{comp}} - \frac{1/8 \cdot q_{bs} \cdot L^2 \cdot y_c}{\phi \cdot I_{comp}} \quad (1)$$

dan tegangan pada sisi bawah kayu:

$$\sigma_k = -\frac{P_{awal} \cdot \cos \alpha}{A_{comp}} - \frac{P_{awal} \cdot \sin \alpha \cdot d \cdot y_k}{\phi \cdot I_{comp}} + \frac{1/8 \cdot q_{bs} \cdot L^2 \cdot y_k}{\phi \cdot I_{comp}} \quad (2)$$

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

$$\sigma_c = -\frac{(P_{awal} - LOP) \cdot \cos \alpha}{A_{comp}} + \frac{(P_{awal} - LOP) \cdot \sin \alpha \cdot d \cdot y_c}{\phi \cdot I_{comp}} - \frac{1/4 \cdot F \cdot L \cdot y_c}{\phi \cdot I_{comp}} - \frac{1/8 \cdot q_{bs} \cdot L^2}{\phi \cdot I_{comp}} \quad (3)$$

tegangan pada sisi bawah kayu :

$$\sigma_w = -\frac{(P_{awal} - LOP) \cdot \cos \alpha}{A_{comp}} - \frac{(P_{awal} - LOP) \cdot \sin \alpha \cdot d \cdot y_w}{\phi \cdot I_{comp}} + \frac{1/4 \cdot F \cdot L \cdot y_w}{\phi \cdot I_{comp}} + \frac{1/8 \cdot q_{bs} \cdot L^2 \cdot y_w}{\phi \cdot I_{comp}} \quad (4)$$

Tegangan akhir pada baja:

$$\sigma_s = +\frac{(P_{awal} - LOP)}{A_s} + \frac{1/8 \cdot q_{bs} \cdot L^2 \cdot e}{\phi \cdot I_{comp}} + \frac{1/4 \cdot F \cdot L \cdot e}{\phi \cdot I_{comp}} \quad (5)$$

Lendutan dihitung sebagai berikut:

$$\delta = \frac{F \cdot L^3}{48 E_w \cdot \phi I_{comp}} + \frac{5 q_{bs} L^4}{384 E_w \cdot \phi I_{comp}} - \frac{6 \cdot (P_{awal} - LOP) \cdot \sin \alpha \cdot (3L^2 - 4d^2)}{24 E_w \cdot \phi I_{comp}} \quad (6)$$

dengan,

$A_{comp}$  : luas tampang komposit ( $\text{mm}^2$ )

$I_{comp}$  : momen inersia komposit ( $\text{mm}^4$ )

$\phi$  : faktor reduksi (0,80 – 0,90) (SNI 2002)

$e$  : eksentrisitas baja tulangan terhadap dan garis netral elastis balok (mm)

$q_{bs}$  : berat sendiri balok (N/mm)

$L$  : bentang balok (mm)

LOP : *loss of prestress* (N) diambil sebesar 40 %

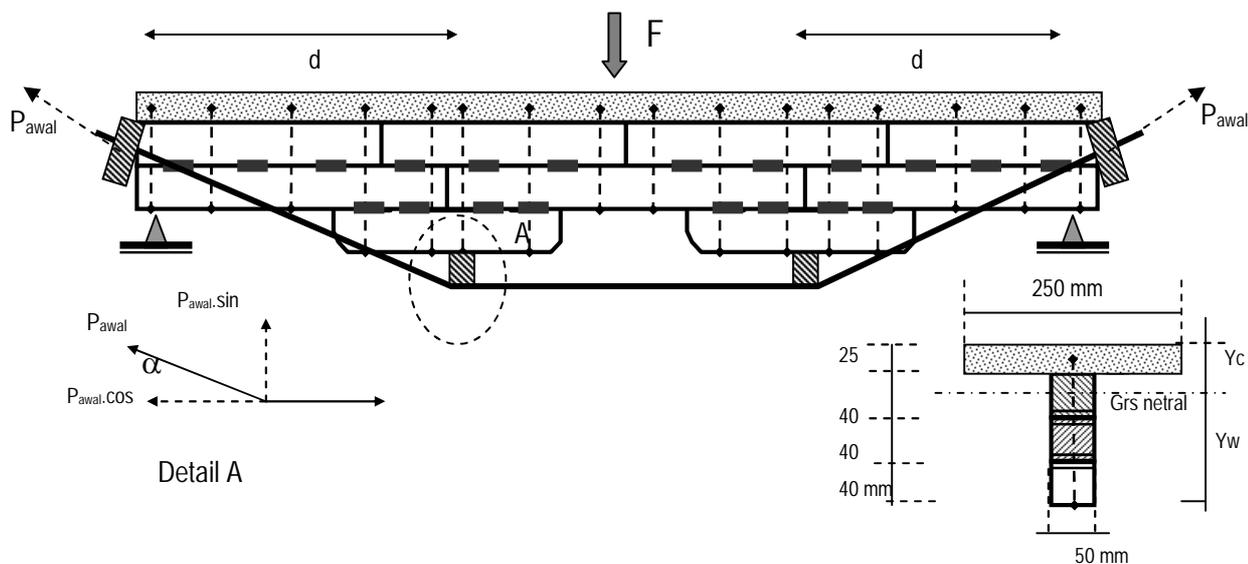
$P_{awal}$  : gaya tarik awal tendon (N).

## METODE PENELITIAN

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah kayu Mahoni, kayu Jati, dan baja tulangan diameter 8 mm. Untuk pengelem tendon baja tulangan digunakan skrup dan baut diameter 8 mm juga. 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 pasak penghubung geser, 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 standard ASTM (Tjokrodiluljo, 1988). Balok susun dibuat berukuran 50mmx80mmx2000 mm, pelat beton berukuran 25mmx250mm. Benda uji dibuat dengan jumlah 14 buah dengan rincian: (i) 3 balok uji kayu utuh (BU), (ii) 3 balok uji kayu utuh komposit plat beton (BUC), (iii) 4 balok uji kayu susun (BS), dan (iv) 4 balok uji kayu susun komposit plat beton dengan perkuatan baja tulangan 8 mm (BSCP) (lihat Gambar 2(a)).

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 Machine*), merk *United*, mesin uji dilengkapi dengan komputer yang dapat mencetak hasil berupa diagram



Gambar 2. Balok susun komposit plat beton dan perkuatan baja tulangan

tegangan-regangan ataupun kurva hubungan beban-lendutan lewat *ploter/printer*.

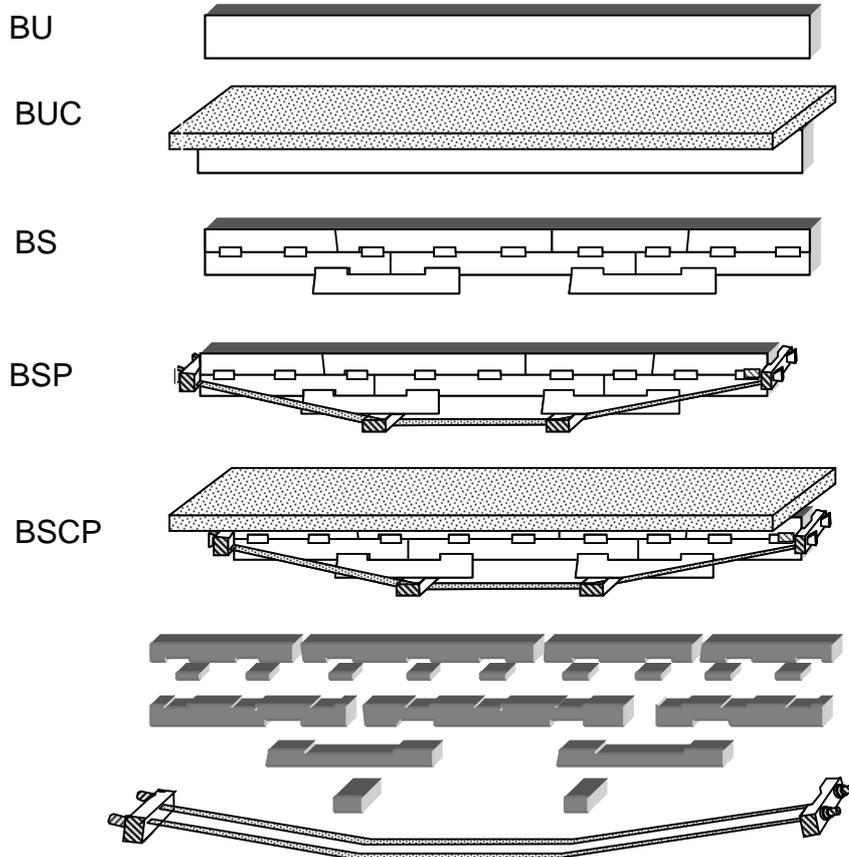
Pemberian tegangan awal dilakukan dengan mengencangkan baut dari klem baja sampai lendutan pada bagian tengah balok uji kayu (yang diketahui dari pembacaan *Dial Gauge*) sampai pada nilai yang sudah dihitung sebelumnya. Untuk lebih jelasnya, cara pemberian tegangan awal dapat dilihat pada Gambar 3(b).

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*. *Set-up* pengujian selengkapnya dapat dilihat pada Gambar 2(c). 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 (6) untuk mengetahui momen elastis balok, maupun tegangan pada serat-balok dan tendon baja tulangan.

## HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

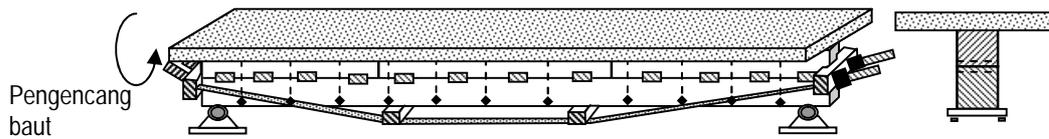
### 1. Pola retak dan keruntuhan benda uji

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. Pada balok kayu utuh maupun pada balok kayu susun, 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, muncul retak halus pada plat beton di posisi tengah bentang yang memanjang dengan arah melintang balok (lihat Gambar 3). 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.

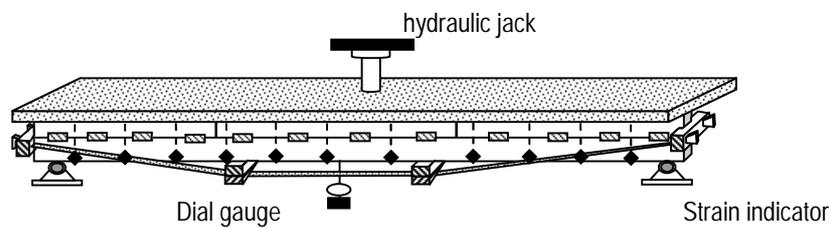


Metode perangkaian balok susun

(a). Bentuk, dan macam balok uji kayu



(b). Pemberian tegangan awal



(c). *Set-up* pengujian

Gambar 3. Macam balok uji, pemberian tegangan awal, dan *set-up* pengujian .



Retak pada balok utuh



Retak pada balok susun



Retak pada balok komposit



Retak pada plat beton

Gambar 4. Retak pada balok uji

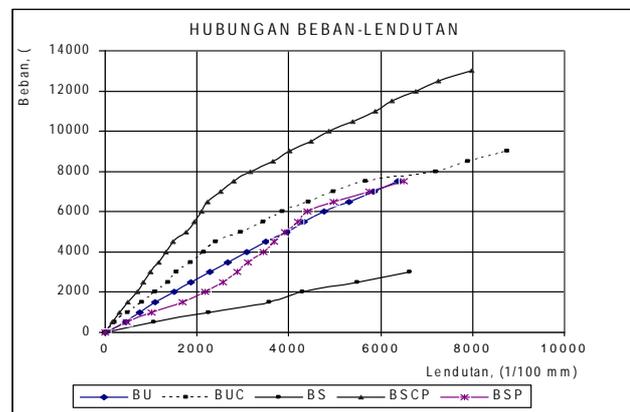
Dari pengamatan juga diperoleh, bahwa ukuran pasak kayu jati yang dipakai cukup memadai dan mampu menahan gaya geser yang ada. Hal ini terlihat dengan tidak-adanya satupun pasak yang rusak, baik karena geseran, desakan, maupun tarikan. Jumlah dan kekuatan baut pelekat yang terpasang juga mencukupi. Hal 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.

## 2. Hubungan beban dan lendutan

Kurva hubungan beban dan lendutan dari pengujian masing-masing balok kayu uji ditunjukkan pada Gambar 4. Dari Gambar 4 dapat diketahui seberapa besar kinerja balok kayu uji. Untuk mempermudah analisis, Gambar 4 disajikan dalam bentuk Tabel 1. Dari Tabel 1 terlihat, bahwa daya dukung balok susun hanya sekitar 37 % dari daya dukung balok utuh. Daya dukung tersebut meningkat 160 % setelah diberi perkuatan baja tulangan diameter 8 mm. Nilai ini sudah hampir menyamai daya dukung balok utuh, yakni sudah sekitar 96,3 %-

nya. Setelah dikompositkan dengan pelat beton, daya dukung balok susun meningkat sebesar 27 % sehingga menjadi 145 % daya dukung balok utuh, dan 119 % daya dukung balok utuh komposit.

Dari Tabel 1 juga diperoleh, bahwa perkuatan baja tulangan memberikan kontribusi lebih besar bagi peningkatan daya dukung balok susun, (yaitu 160 %) dibanding yang diberikan oleh aksi komposit plat beton (yaitu 133 %). Hasil ini membuktikan, bahwa perkuatan baja tulangan dan aksi komposit plat beton berfungsi dengan baik dalam meningkatkan daya dukung balok susun.



Gambar 5. Kurva hubungan beban-lendutan balok uji kayu

### 3. Analisis beban maksimum dan kekakuan

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 *inelastis*. 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:

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

dengan

- k* : kekakuan, N/mm
- P<sub>e</sub>* : beban batas elastis, N
- Δ<sub>e</sub>* : lendutan batas elastis, mm

Nilai beban maksimum dan kekakuan dari masing-masing balok kayu uji ditunjukkan pada Tabel 1. Dari Tabel 1 terlihat bahwa, kekakuan balok susun dua hanya sekitar 27,8 %, dari kekakuan balok utuh. Kekakuan ini meningkat 198 % setelah diberi

perkuatan baja tulangan diameter 8 mm, meski nilai ini masih tetap lebih rendah dibanding kekakuan balok utuh, yakni masih sekitar 82,8 %-nya. Namun kekakuan. Setelah dikompositkan dengan pelat beton, kekakuan balok susun meningkat fantastis, yaitu sampai 166 % sehingga menjadi 220,3 % kekakuan balok utuh, dan 177 % kekakuan balok utuh komposit.

Dari Tabel 1 juga diperoleh, bahwa aksi komposit plat beton memberikan kontribusi lebih besar bagi peningkatan daya dukung balok susun, (yaitu 494 %) dibanding yang diberikan oleh perkuatan baja tulangan (yaitu 198 %). Hasil ini membuktikan, bahwa aksi komposit plat beton berfungsi sangat baik dalam meningkatkan kekakuan balok susun, dan menjadikan balok susun kayu menjadi lebih kompak.

Dari Tabel 1 juga terlihat bahwa, lendutan maksimum balok uji meningkat setelah diberi perkuatan baja tulangan 8 mm. Hal yang sama juga terjadi setelah balok uji dikompositkan dengan plat beton. Ini dapat dilihat baik pada balok kayu utuh maupun balok kayu susun. Namun peningkatan lendutan maksimum ini tidaklah sebesar peningkatan daya dukung maupun kekakuan. Dengan demikian dapat dikatakan, bahwa perkuatan baja tulangan dan aksi komposit plat beton tetaplah memberikan peningkatan daktilitas pada balok uji, meski tidak cukup signifikan.

Tabel 1. Perbandingan beban maksimum, kekakuan dan lendutan maksimum balok uji kayu.

Jenis balok	Kode benda uji	P <sub>maks</sub> , N	P <sub>elastis</sub> N	Δ <sub>elastis</sub> mm	Δ <sub>ultimit</sub> mm	Kekakuan N/mm
Balok utuh	BU1	7520	1000	5,97	73,84	167,5
	BU2	7430	1000	6,19	70,99	161,5
	BU3	7700	1000	6,29	74,06	158,9
	Rata-rata	7550 (1,000)	1000	6,15	72,96 (1,000)	162,6 (1,000)
Balok Utuh Komposit	BUC1	5950*	1000	4,86	47,86*	205,8
	BUC2	9050	1000	4,45	82,50	224,7
	BUC3	9280	1000	5,74	87,60	174,2
	Rata-rata	9165 (1,214)	1000	5,02	85,05 (1,165)	201,5 (1,238)
Balok susun	BS1	2710	750	20,55	66,20	36,5
	BS2	2925	750	9,09*	35,40*	82,5*
	BS3	2700	750	13,93	73,20	53,8
	Rata-rata	2788 (0,370)	750	17,24	69,7 (0,956)	45,15 (0,278)
Balok susun perkuatan	BSP1	7230	1000	8,06	80,00	124,1
	BSP2	7160	1000	7,65	71,00	130,7
	BSP3	7430	1000	6,70	90,00	149,3
	Rata-rata	7273 (0,963)	1000	7,47	80,3 (1,102)	134,7 (0,828)
Balok susun Komposit perkuatan	BSCP1	10760	1000	2,15	77,30	465,1
	BSCP2	10800	1000	4,25	77,30	235,3
	BSCP3	11340	1000	2,52	70,40	396,8
	BSCP4	7500*	1000	2,98	90,00	335,6
	Rata-rata	10966 (1,452)	1000	2,98	78,80 (1,081)	358,20 (2,203)

#### 4. Momen inersia relatif penampang

Untuk mendapatkan besarnya momen inersia relatif pada masing-masing balok uji terhadap balok utuh, dilakukan hitungan dengan urutan sebagai berikut: (i) dari pengujian balok uji kayu 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

$$E = \frac{PL^3}{48.\Delta_{elastis}.I} \quad (8)$$

(ii) kemudian nilai modulus elastis rerata yang diperoleh dari hitungan persamaan (8) digunakan untuk menghitung momen inersia masing-masing penampang balok uji dengan persamaan berikut:

$$I_{netto} = \frac{PL^3}{48.\Delta_{elastis}.E} \quad (9)$$

(iii) rasio momen inersia relatif penampang diperoleh dari perbandingan antara momen inersia netto dengan momen inersia penampang utuh. Hitungan selengkapnya, disajikan dalam Tabel 2 di bawah.

Dari Tabel 2 terlihat, bahwa momen inersia penampang balok kayu susun yang disusub dengan pola seperti pada penelitian ini hanya 0,302 dibanding balok utuh. Nilai ini cukup jauh dengan angka yang diberikan dari PKKI 1961 untuk balok susun dua, yaitu sekitar 0,6. Hal ini dikarenakan angka pada PKKI 1961 diambil atas asumsi, bahwa batang di sisi atas dari batang susun merupakan batang menerus, sedang pada penelitian ini batangnya adalah terputus-putus dan batang di sisi bawahpun juga merupakan sambungan.

Sedang pada balok utuh komposit, diperoleh nilai sebesar 0,283. Hasil ini sangat jauh dari ketentuan SNI 2002 yang mengambil faktor reduksi sebesar 0,80. Namun apapun hasilnya, jelas terlihat teknologi balok susun yang dikenal selama ini memang terbukti tidak cukup efektif dalam mentransverkan gaya-gaya yang ada.

#### 5. Analisis kondisi layan

Dalam praktek keseharian, jarang sekali suatu struktur kayu digunakan diman tahap kekuatannya sampai mencapai tahap inelastis, atau bahkan kekuatan ultimitnya. Umumnya, dalam kegunaan keseharian, kekuatan struktur (terlebih kayu) dibatasi hanya sampai pada kekuatan elastisnya, atau sampai pada batas defleksi izinnya. Untuk itu, pembahasan pada penelitian ini juga hanya dilakukan pada kedua

kondisi tersebut, yaitu kondisi elastis dan kondisi beban izin. Analisis dilakukan secara teoritis dan eksperimental.

Beban batas elastis hasil pengujian diperoleh dari nilai beban maksimum hasil pengujian dibagi dengan faktor aman 3. Angka tersebut diambil lebih konservatif dari PKKI NI-5-2002, yaitu sebesar 2,74. Analisis teoritis diperoleh dengan menggunakan Persamaan (3) dan Persamaan (4) dengan tegangan desak beton dibatasi  $\leq f'_c/3$ , dan  $\leq f_w/2,74$ .

Beban batas defleksi izin hasil pengujian didapatkan dari kurva hubungan beban-lendutan hasil pengujian, yaitu pada ordinat yang menunjukkan lendutan sebesar  $L/300$ . Sedang analisis teoritis diperoleh dengan menggunakan Persamaan (6) dengan tegangan desak beton dibatasi  $\leq f'_c/2$ , dan  $\leq 0,60.f_w$ , Perbandingan analisis teoritis dan hasil pengujian pada batas elastis dan batas defleksi izin disajikan pada Tabel 3.

Dari Tabel 3 terlihat, bahwa perbandingan analisis teoritis dan hasil pengujian nilainya cukup bervariasi. Ada yang selisih jauh, namun juga ada yang cukup dekat. Hal ini dapat dipahami mengingat begitu kompleksnya permasalahan yang dijumpai dalam pengujian kayu, seperti sulitnya diperoleh homogenitas kekuatan dalam suatu tampang akibat kemiringan serat, perbedaan usia kayu, dan lain sebagainya. Meski demikian, secara umum dapat dikatakan, bahwa metode analisis yang digunakan sudah cukup akurat menggambarkan permasalahan yang ada.

Dari Tabel 3 juga terlihat, bahwa pada semua jenis balok uji, kondisi batas defleksi izin balok tercapai lebih dahulu sebelum kondisi batas elastis. Dari hasil ini dapat disimpulkan, bahwa desain layan struktur ditentukan oleh defleksi izin. Beban izin rencana ( $q_{rencana}$ ) ditentukan dengan Persamaan (6) dengan mengambil batas lendutan  $L/300$  sampai  $L/400$ .

#### 6. Penentuan beban izin rencana ( $q_{izin}$ )

Dari Tabel 3 terlihat, bahwa beban pada kondisi lendutan izin lebih kecil dibanding beban pada kondisi batas elastis. Dengan demikian dapat disimpulkan, bahwa beban izin rencana ( $q_{izin}$ ) pada semua jenis balok uji ditentukan oleh kondisi lendutan izin. Kondisi lendutan izin merupakan faktor penentu bagi *performa* layan pada semua balok uji.

Berdasar hasil di atas, maka diusulkan suatu rumus analitis sebagai pedoman penentuan beban izin. Rumus usulan ini didasarkan atas rumus yang sudah ada pada, hanya ada tambahan dengan faktor koefisien pada  $I_{eff}$ .

Tabel 2. Faktor reduksi momen inersia penampang balok uji kayu susun

Jenis balok	Kode benda uji	P <sub>elastis</sub> N	Δ <sub>elastis</sub> mm	Mom inersia Pen. utuh, mm <sup>4</sup> $I_{utuh} = \frac{1}{12}bh^3$	Mod. Elastis, Mpa $E = \frac{\Delta PL^3}{48 \cdot \Delta_{elastis} \cdot I}$	Mom inersia netto $I_{netto} = \frac{\Delta PL^3}{48 \cdot \Delta_{elastis} \cdot E}$	Rasio momen inersia, I <sub>netto</sub> /I <sub>utuh</sub>
BU	BU1	750	5,97	2133333	11933		
	BU2	750	6,19	2133333	11521		
	BU3	750	6,29	2133333	11338		
	Rata-rata				11231		
BUC	BUC1	1000	4,86	I <sub>comp</sub> = 9060833		2617971	0,289
	BUC2	1000	4,45	I <sub>comp</sub> = 9060833		2859178	0,316
	BUC3	1000	5,74	I <sub>comp</sub> = 9060833		2216610	0,245
	Rata-rata						0,283
BS	BS1	750	20,55	2133333		521257	0,244
	BS2	750	9,09*	2133333		1178419*	
	BS3	750	13,93	2133333		768976	0,360
	Rata-rata						0,302
BSP	BSP1	1000	12,10	2133333		1051516	0,493*
	BSP2	1000	8,06	2133333		1578578	0,740
	BSP3	1000	7,65	2133333		1663182	0,780
	BSP4	1000	6,70	2133333		1899006	0,890
	Rata-rata						0,803
BSCP	BSCP1	1000	2,15	I <sub>comp</sub> = 9060833		5917833	0,653
	BSCP2	1000	4,25	I <sub>comp</sub> = 9060833		2993727	0,330
	BSCP3	1000	2,52	I <sub>comp</sub> = 9060833		5048945	0,557
	BSCP4	1000	2,98	I <sub>comp</sub> = 9060833		4269577	0,471
	Rata-rata						0,503

Tabel 3. Perbandingan beban batas elastis dan beban batas defleksi izin balok uji kayu.

Jenis balok	Kode benda uji	Beban batas elastis (N)				Beban batas defleksi izin (N)			
		Eksperimental		Teoritis		Eksperimental		Teoritis	
Balok utuh	BU1	2507	1,000	1660	0,662	1770	1,000	1560	0,881
	BU2	2477	1,000	1660	0,670	1310	1,000	1560	1,191
	BU3	2567	1,000	1660	0,647	1380	1,000	1560	1,130
	Rata-rata	2514	1,000	1660	0,660	1487	1,000	1560	1,049
Balok Utuh Komposit	BUC1	2985	1,000	3174	1,063	1570	1,000	5380	3,427
	BUC2	3017	1,000	3174	1,052	1710	1,000	5380	3,146
	BUC3	3093	1,000	3174	1,026	1380	1,000	5380	3,899
	Rata-rata	3032	1,000	3174	1,047	1553	1,000	5380	3,464
Jenis balok	Kode benda uji	Beban batas elastis (N)				Beban batas defleksi izin (N)			
		Eksperimental		Teoritis		Eksperimental		Teoritis	
Balok susun	BS1	903	1,000	996	1,103	470	1,000	546	1,162
	BS2	975	1,000	996	1,022	470	1,000	546	1,162
	BS3	900	1,000	996	1,107	600	1,000	546	0,910
	Rata-rata	926	1,000	996	1,076	513	1,000	546	1,064
Balok susun perkuatan	BSP1	2410	1,000	1287	0,534	830	1,000	680	0,819
	BSP2	2387	1,000	1287	0,539	670	1,000	680	1,015
	BSP3	2477	1,000	1287	0,520	1070	1,000	680	0,636
	Rata-rata	2425	1,000	1287	0,531	857	1,000	680	0,793
Balok susun Komposit perkuatan	BSCP1	3587	1,000	2929	0,817	2630	1,000	2740	1,042
	BSCP2	3600	1,000	2929	0,814	1740	1,000	2740	1,575
	BSCP3	3780	1,000	2929	0,775	2660	1,000	2740	1,030
	BSCP4	3654	1,000	2929	0,802	2250	1,000	2740	1,218
	Rata-rata	3655	1,000	2929	0,801	2320	1,000	2740	1,181

Koefisien tersebut diberikan untuk memperhitungkan pengaruh pemasangan baja perkuatan terhadap kekakuan balok, dalam hal ini diasumsikan sebagai penambahan momen inersia efektif penampang balok. Rumus usulan tersebut adalah sebagai berikut:

$$q_{izin} = \frac{E_k \cdot I_{eff} \cdot 384 \cdot \bar{\delta}}{5 \cdot L^4} \quad (10)$$

dengan  $I_{eff} = k \cdot I_{bruto}$

Untuk balok utuh,	k = 1,00
Untuk balok susun,	k = 0,30
Untuk balok utuh komposit,	k = 0,30
Untuk balok utuh komposit, (dengan perkuatan),	k = 0,40
Untuk balok susun komposit, (dengan perkuatan),	k = 0,40

## 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 rata-rata hanya sekitar 0,302 dan untuk model balok uji kayu utuh komposit hanya sekitar 0,283.
- 2). Daya dukung balok susun meningkat 293 % setelah dikompositkan dengan plat beton dan setelah diberi perkuatan baja tulangan diameter 8 mm. Perkuatan baja tulangan memberikan kontribusi peningkatan sebesar 160 %, sementara aksi komposit plat beton sebesar 133 %.
- 3). Kekakuan balok susun meningkat 695 % setelah dikompositkan dengan plat beton dan setelah diberi perkuatan baja tulangan diameter 8 mm. Aksi komposit plat beton memberikan kontribusi sebesar 494 %, sementara yang diberikan perkuatan baja tulangan sebesar 198 %.
- 4). Lendutan maksimum balok susun meningkat setelah dikompositkan dengan plat beton, dan diberi perkuatan baja tulangan 8 mm. Dengan demikian, perkuatan baja tulangan dan aksi komposit plat beton tetap memberikan peningkatan daktilitas pada balok susun, meski tidak cukup signifikan.
- 5). Pada semua jenis balok uji, kondisi batas defleksi izin balok tercapai lebih dahulu sebelum kondisi batas elastis. Dari hasil ini dapat disimpulkan,

bahwa desain layan struktur ditentukan oleh defleksi izin.

- (6). 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 TERIMAKASIH

Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada Direktur Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (DP2M) Dikti Depdiknas yang telah mendanai penelitian ini, serta segenap staf Lembaga Penelitian UMS atas segala bantuannya, juga kepada segenap staf dan laboran Laboratorium Mekanika Bahan PAU-IT UGM atas bantuannya selama penelitian.

## DAFTAR PUSTAKA

- Anonim, 1961, *Peraturan Konstruksi Kayu Indonesia*, Direktorat Penyelidikan Masalah Bangunan, Departemen Pekerjaan Umum dan Tenaga Listrik, Bandung.
- SNI NI-05, 2002, *Tata cara perencanaan konstruksi kayu Indonesia*, Panitia Teknik Kontruksi dan Bangunan, Departemen Pekerjaan Umum, Bandung.
- Rochman, A., 2003, *Analisis Kekuatan Balok Pratekan Kayu dan Bambu (tinjauan teoritis dan eksperimental)*, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Surakarta.
- Rochman, A., 2006, *Rekayasa Pembuatan Balok Kayu Struktural Berukuran Besar Dari Balok-balok Kayu Berukuran Kecil Dengan Perkuatan Tendon Bambu dan Baja Tulangan*, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Surakarta.
- Tjokrodimuljo, K., 1988, *Pengujian Bahan Teknik*, Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Wirjomartono, S., 1976, *Konstruksi Kayu*, Laboratorium Konstruksi Kayu, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.