

ANALISIS PERKUATAN LENTUR BALOK KAYU SENGON DENGAN SISTEM KOMPOSIT BALOK SANDWICH (LAMINA DAN PLATE)

Teguh Mulyo Wicaksono¹, Ali Awaludin², Suprpto Siswosukarto³

^{1,2,3} Departemen Teknik sipil dan Lingkungan Universitas Gadjah Mada
Email: teguh.mulyo.w@mail.ugm.ac.id

ABSTRACT

The using of wood beam for structural purposes are still wood-oriented of good type and quality. Along with the increasing use of wood in the field of construction, the availability of large size wood and good quality becomes more limited. Moving from previous research on weak wood composite, an idea was made to analyze the strength of bending of logs from weak wood through composite engineering. Sengon wood is weak wood with compression strength 16,91 MPa, tensile strength 46,33 MPa, shear strength 3.51 MPa, flexural strength 23,52 MPa, MOE 4210,99 MPa and classification of E6. Component press lamina keruing with compression strength 47,58 MPa. Component tesile plate steel with tensile strength 267,28 MPa. The maximum load of intact sengon beam (BSU) 8.04 kN while the composite laminated beam (BLK) of maximum load of 16.82 kN increased 109%. The flexural elasticity module of BSU 7.002,62 Mpa while the BLK of 10,419 MPa increased 49%. Flexural strength BSU 20.65 MPa while at 39.72 MPa BLK increased 92%. BSU rigidity at 6.4 kN proportional load is 153,02 while at BLK 325,06 it increases 112,43%. The curvature of BSU -77.42 at maximum load of 8.04 kN whereas in BLK is -24.03 increased 69%. The efficiency structure of the BSU is 1.07 and in the BLK 1.24 is increased by 15.89%. The pattern of BSU failure is brittle on linear loading with disconnected fibers. While BLK sengon damage does not cause the beam collapsed because it is still held steel plate and lamina keruing. The analysis for live load is 350 Kg / m², then the maximum load is 10.5 kN. At BLK able to withstand the maximum load of 16.82 kN, the concept of this laminated composite beam can be used as a structural beam.

Keywords: sengon, beams, composites, structural beams.

ABSTRAK

Penggunaan balok kayu untuk keperluan struktur masih berorientasi pada kayu dari jenis dan mutu yang bagus. Seiring dengan makin banyaknya penggunaan kayu dalam bidang konstruksi maka ketersediaan kayu ukuran besar dan bermutu baik menjadi semakin terbatas. Beranjak dari riset-riset terdahulu tentang perkuatan kayu lemah, dibuatlah gagasan untuk menganalisis kekuatan lentur balok dari kayu lemah melalui rekayasa komposit. Kayu sengon merupakan kayu lemah dengan kuat tekan 16,91 MPa, kuat tarik 46,33 MPa, kuat geser 3,51 MPa, kuat lentur 23,52 MPa, MOE 4210,99 MPa dan termasuk klasifikasi E6. Komponen tekan lamina keruing dengan kuat tekan 47,58 Mpa. Komponen tarik steel plate dengan kuat tarik 267,28 Mpa. Beban maksimum balok sengon utuh (BSU) 8,04 kN sedangkan balok laminasi komposit (BLK) beban maksimum 16,82 kN meningkat 109%. Modulus elastisitas lentur BSU 7.002,62 MPa sedangkan BLK sebesar 10.419 Mpa meningkat 49%. Kuat lentur BSU 20,65 MPa sedangkan pada BLK 39,72 Mpa meningkat 92%. Kekakuan BSU pada beban proporsional 6,4 kN adalah 153,02 sedangkan pada BLK 325,06 meningkat 112,43%. Kelengkungan BSU -77,42 pada beban maksimum 8,04 kN sedangkan pada BLK adalah -24,03 meningkat 69%. Efisiensi struktur BSU sebesar 1,07 dan pada BLK didapatkan 1,24 meningkat 15,89%. Pola kegagalan BSU bersifat getas pada pembebanan linear dengan serat terputus. Sedangkan BLK kerusakan sengon tidak menyebabkan balok runtuh karena masih ditahan steel plate dan lamina keruing. Analisis untuk beban hidup 350 Kg/m², maka beban maksimum adalah 10,5 kN. Pada BLK mampu menahan beban maksimum 16,82 kN, maka konsep balok laminasi komposit ini dapat digunakan sebagai balok struktural.

Kata kunci: sengon, balok, komposit, balok struktural.

PENDAHULUAN

Dalam dunia konstruksi kayu di Indonesia, balok kayu dipasang sebagai konstruksi lantai kayu, gording ataupun balok kuda-kuda. Penggunaan balok kayu untuk keperluan struktur masih berorientasi pada kayu dari jenis dan mutu yang bagus. Seiring dengan makin banyaknya

penggunaan kayu dalam bidang konstruksi, maka ketersediaan kayu ukuran besar dengan mutu baik menjadi semakin terbatas. Untuk memenuhi kebutuhan kayu yang semakin terbatas tersebut, maka bahan struktur kayu dapat dibuat dari partikel atau potongan kayu berukuran kecil yang direkatkan atau

dikompositkan dengan bahan lain untuk mendapatkan dimensi dan homogenitas yang lebih baik.

Produk teknologi kayu yang berkembang banyak mengarah pada teknologi industri global dengan *quality control* yang memadai sehingga dirasa sulit untuk diterapkan sendiri oleh masyarakat bilamana ingin membuat dengan memakai konsep tersebut. Beberapa riset telah dilakukan untuk menganalisis peningkatan kapasitas struktur yang dapat dikembangkan dimasyarakat, sehingga masyarakat dapat dengan mudah menerapkan sebagai alternatif komponen struktur yang konservatif. Pada balok glulam balok disusun dengan melakukan perkuatan balok dengan memanfaatkan karakteristik dan perilaku balok terlentur. Yaitu daerah yang mengalami tekan dan tarik maksimum sehingga dapat mengurangi bidang distribusi tegangan pada kondisi beban yang sama.

Jasien'ko (2014) melakukan riset studi eksperimental perkuatan balok kayu dengan *steelplate* tebal 6mm. Untuk mendapatkan posisi ideal maka dilakukan variasi posisi *steelplate* di dalam, di atas, di samping dan di bawah. Hasil menunjukkan bahwa penambahan *steelplate* relatif dapat meningkatkan kekuatan sebanding dengan FRP pada penelitian sebelumnya, secara sifat fisik untuk pemasangan pada permukaan *steel plate* memiliki kemampuan lebih baik terhadap termal walaupun kekakuan lebih banyak disumbang dengan pemakaian FRP. Apabila balok dengan beban tegak lurus sumbu memanjangnya dan balok di tumpu (disangga) pada kedua ujungnya, maka balok tersebut akan mengalami tegangan dan akan mengalami deformasi. Tegangan yang muncul berupa lentur yaitu merupakan tegangan normal yang berupa tegangan tarik dan tekan sejajar serat serta tegangan geser berada pada sekitaran garis netral balok.

Beranjak dari riset-riset terdahulu tentang perkuatan kayu lemah, penulis membuat gagasan untuk menganalisis kekuatan lentur balok dari kayu lemah (non-struktural) melalui rekayasa kayu komposit dengan perkuatan balok. Balok kayu laminasi direkatkan dengan lem, maka cara perekatan ini sering disebut

glue laminated (glulam) timber beam. Menurut Indah (2008) prinsip desain laminasi adalah memaksimalkan dimensi dengan meminimalkan material.

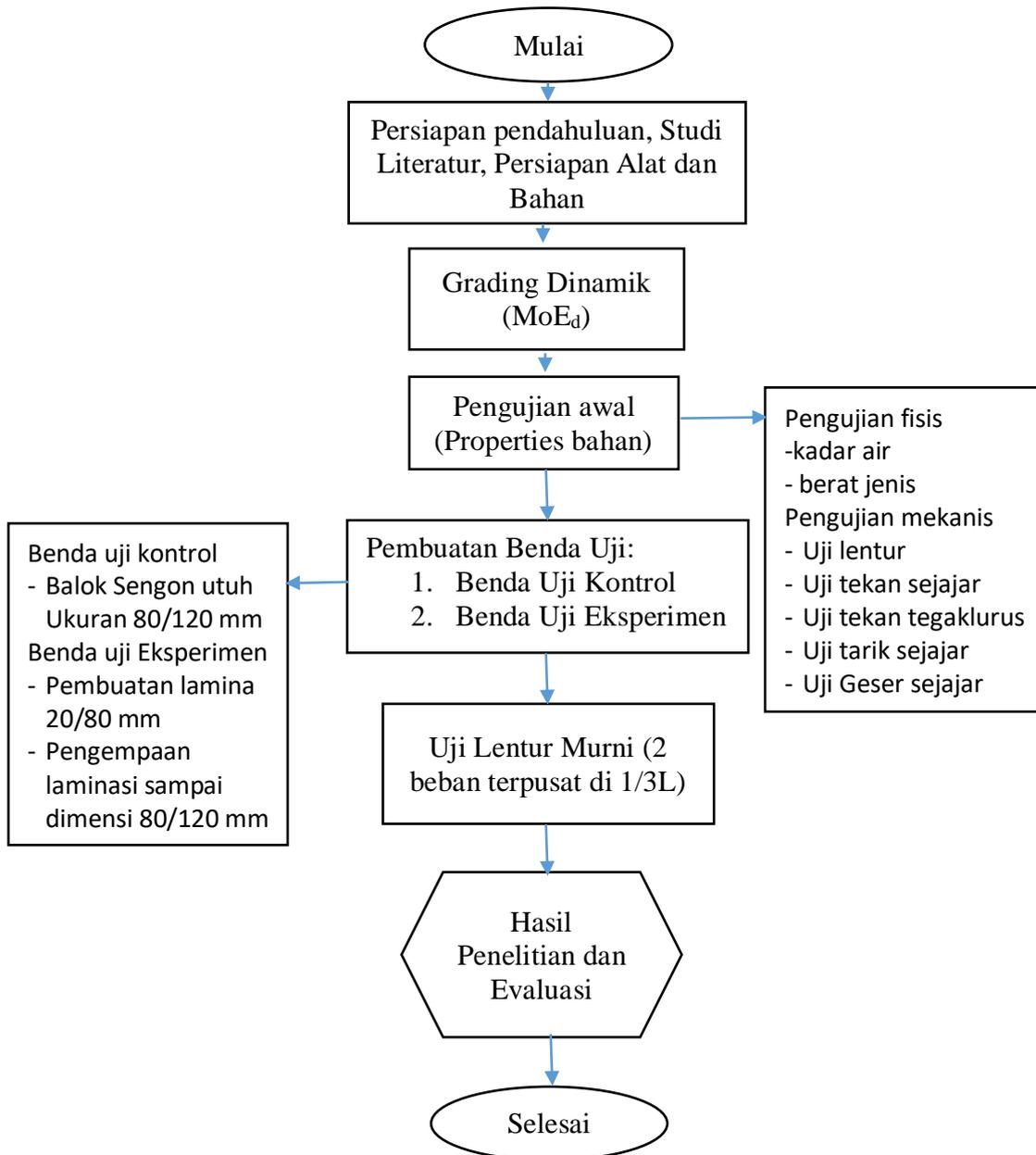
Balok laminasi dibuat dengan cara merekatkan papan lamina kayu dalam SNI 7973-2013 ketebalan bersih masing-masing lamina tidak melampaui 50 mm dan serat seluruh laminasi kira-kira sejajar dalam arah longitudinal dengan bahan perekat tertentu. Sebelum proses perekatan, papan kayu terlebih dahulu dikeringkan sampai nilai kandungan air <16%. Karena rendahnya kandungan air pada papan kayu, maka dengan demikian struktur kayu laminasi memiliki kestabilan ukuran yang lebih baik jika dibandingkan dengan kayu masif non-laminasi (Awaludin dan Irawati, 2005). Menurut Rocki (2013) kayu sengon (*Albizia falcataria*) tergolong kayu cepat tumbuh, kayu ringan dengan berat jenis rata-rata 0,33 (0,24-0,49) kerapatan sebesar 0,30-0,50 gr/cm³ dan keteguhan lentur (bending strength) <500 Kg/cm² sehingga tidak digunakan sebagai elemen struktur. Perkuatan balok pada sisi tekan menggunakan papan lamina kayu keruing. Kayu keruing (*Dipterocarpus spp.*) merupakan salah satu kayu yang tersebar di wilayah hutan Kalimantan bersifat kuat, keras, mempunyai keawetan alami yang tinggi kode mutu E14, dengan nilai Modulus Elastis Lentur (E_w) = 13.000) sehingga sering digunakan dalam konstruksi bangunan (SNI-5, 2002). Papan lamina keruing direkatkan/dilaminasi dengan Lem Polyuretan. Kemudian perkuatan pada sisi tarik menggunakan steel plate merupakan lembaran baja gulung atau Baja Lapis Aluminium dan Seng (BjLAS) sesuai SNI 4092-2007 dengan ketebalan 1 mm direkatkan menggunakan lem epoxy dengan campuran bahan pengeras (Hardener).

Dengan pengujian komposit ini diharapkan mendapatkan perilaku balok komposit terhadap beban yang meliputi kekakuan, displasmen, kelengkungan, kapasitas lentur, perilaku kegagalan dan efisiensi strukturserta dapat meningkatkan mutu kayu sengon, melakukan validasi dengan beban struktural untuk mendapatkan seberapa besar peningkatannya dan apakah balok sengon dapat digunakan sebagai pengganti balok struktural setelah

dilakukan perkuatanehingga dapat menjadi alternatif struktur balok, yaitu dengan kayu lemah serta merupakan kayu cepat tumbuh

dapat direkayasa menjadi komponen struktur dengan dimensi dan mutu sesuai yang dibutuhkan.

METODE



Gambar 1. Skema Alur Pengujian

Pada kajian ini kayu sengon (*Albizia falcataria*) dipakai dari toko/hutan rakyat melalui proses grading. Ukuran dipakai 8x12x320 cm dipakai untuk pengujian awal balok kontrol dan dipotong untuk membuat lamina dengan ukuran 2x8x320 cm sehingga dimensinya lebih stabil. Setelah pemotongan kayu sengon memiliki kandungan air yang sangat besar. Berat kandungan air dalam sengon basah sampai melebihi berat kayu itu sendiri saat kayu kering sehingga perlu dilakukan pengeringan terlebih dahulu.

Ciri – ciri kayu keruing antara lain berwarna coklat kemerahan, tekstur relatif kasar, dan serat tampak besar, relatif lurus walaupun ada yang berpadu. Kayu ini biasa digunakan untuk keperluan struktural mengingat mutunya yang cukup bagus. Kayu keruing yang dipakai berasal dari toko/distributor kayu keruing yang telah dipilih melalui proses grading. Ukuran kayu keruing adalah papan lamina berukuran 2x20x320 untuk pembuatan spesimen dan kayu keruing untuk bahan pengujian pendahuluan.

Steel plate dipakai merupakan lembaran baja gulung lapis galvalum dengan tebal 1 mm sesuai SNI 4096:2007. Yang disebut baja lembaran dan gulungan lapis panduan aluminium – seng adalah baja lembaran dan gulungan yang dilapisi dengan cara celup panas dengan panduan aluminium (50 – 60 %) dan sisanya unsur lain dengan ketebalan 0,20 – 1,20 mm. Baja gulung berupa lembaran ini biasanya digunakan untuk bahan talang, ataupun bahan untuk *cold formed steel* untuk atap *galvalume*, atap gelombang, ataupun konstruksi rangka baja ringan.

Perekat yang dipakai adalah lem *polyuretan* untuk kayu dan lem epoksi untuk *steel plate*. Lem *polyuretan* (PU) adalah perekat foam yang mengembang dengan pengisi busa dengan kandungan polimer. Perekat membutuhkan waktu perekatan 40 menit. Lem Epoksi merupakan produk sintetik termoset dari resin poliepoksi dengan pengeras (*hardener*). Resin dicampur dengan *hardener* sampai mengental berwarna keputihan. Perekatan dengan epoksi pada suhu ruangan akan optimal pada 24 jam.

Pengujian pendahuluan digunakan untuk mendefinisikan karakter bahan dan digunakan

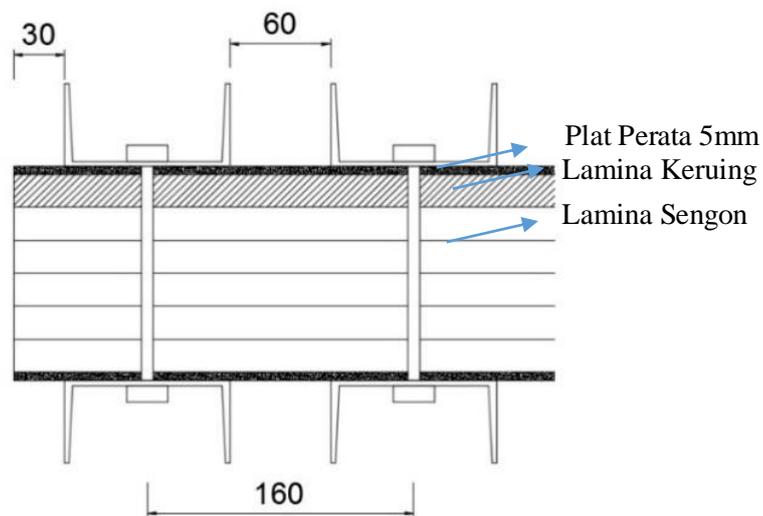
untuk merancang balok laminasi komposit. Pengujian pendahuluan antara lain grading Modulus Elastisitas Dinamik (MoEd), kuat tekan, kuat lentur, kuat geser, kuat tarik.

Peralatan yang digunakan dalam pembuatan benda uji antara lain ketam, gergaji, timbangan, amplas, jangka sorong, scrap, klem, load cell, *Linear Variable Differential Transformers* (LVDT), data logger. Pengujian menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM) dengan kapasitas beban maksimum 10 Ton. Dilaksanakan di laboratorium struktur departemen teknik sipil dan lingkungan Universitas Gadjah Mada.

Papan–papan lamina yang sudah melalui proses pengeringan diukur kembali dengan *moisture meter* untuk memastikan kadar air optimum (kurang dari 16%). Permukaan lamina dibersihkan dengan kuas untuk menghilangkan debu sisa serutan dan kotoran lainnya. Perkuatan balok untuk uji eksperimen dibuat dengan susunan lamina keruing untuk sisi tekan, lamina sengon untuk pengisi dan *steel plate* untuk sisi tarik. Benda uji eksperimen dibuat dari susunan lamina keruing dan sengon dengan dimensi 8x2 cm sampai mendapat dimensi 8x12 cm, kemudian *steel plate* dengan dimensi 8x0.1cm.

Lamina direkatkan dengan lem *Polyuretan* dan *steel plate* dengan epoksi, berdasarkan penelitian yang telah dilakukan I Putu Eddy perekatan paling *optimum* dan dapat dikatakan tercapai secara sempurna adalah saat kayu rusak 100% yaitu pada perekat terlabur 40MDGL. Perekatan dilakukan untuk menyusun lamina kayu terlebih dahulu dengan perekat *polyuretan*. Jumlah perekat terlabur untuk 40MDGL dipakai sebanyak 120 gr untuk satu lapis permukaan.

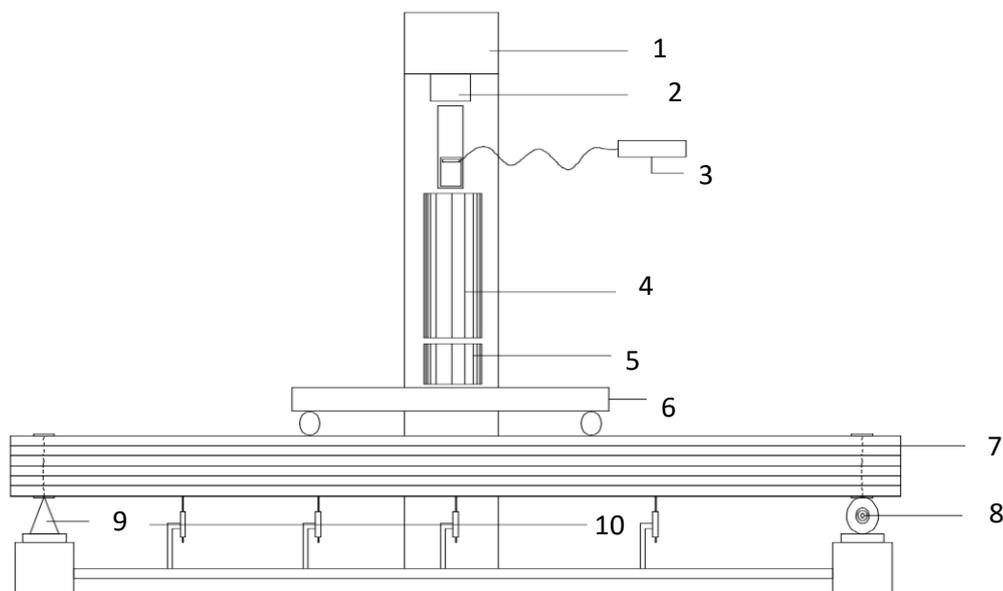
Pengempaan dilakukan menggunakan kunci torsi yang telah di kalibrasi dengan *loadcell* untuk mempercepat proses pengempaan. Tekanan kempa yang diberikan adalah sebesar 1,5 Kgm pada kunci torsi berdasarkan kalibrasi *loadcell* setara dengan 0,7 Mpa. Sepanjang bentang 320 cm dibutuhkan klem sebanyak 20 pasang. Bentuk pengeklaman adalah sebagai berikut:



Gambar 2.(a) Pengeklaman benda uji, (b) Penampang komposit benda uji

Dikarenakan perekat *polyuretan* memiliki waktu perekatan yg cukup singkat maka perekatan dilakukan setiap satu lapis dan dikempa sampai dengan total 6 lapisan yang terdiri dari 1 lapisan keruing dan 5 lapisan sengon. Pengerasan dapat terjadi setelah waktu 40 menit, maka klem dapat dilepas dan dilanjutkan untuk pengeklaman lapisan lainnya. Sesudah perekatan kayu dilakukan semua maka dilakukan penyerutan untuk membersihkan sisa perekat yang meluber akibat kempaan klem dan penyeragaman dimensi akhir 8x12 cm. Langkah selanjutnya adalah pengekleman steel plate ukuran 8x320x0,1cm dengan menggunakan perekat epoxy.

Pengujian benda uji eksperimen adalah pengujian lentur berdasarkan *American Standard Testing and Material (ASTM) D-198, Standard Test Methods of Static Test of Lumber in Structural Size*. Dipasang LVDT sejumlah 4 buah pada *setting-up* pengujian digunakan untuk mendapatkan rekaman data kelengkungan (*curvatur*). Perletakan titik tumpuan dan titik beban diberi plat dengan ukuran yang dianalisis terhadap kuat tekan tegak lurus serat sengon sebagai acuan, tujuannya adalah agar tidak ada pengaruh deformasi balok akibat mengempisnya akibat tekanan lokal. Setting up pengujian sebagai berikut:



Gambar 3. *Setting up* pengujian

Tabel. 1 Keterangan *Setting Up* Pengujian

Kode	Keterangan	Kode	Keterangan
1	Loading frame	6	Plat tumpuan pembebanan
2	Load cell	7	Benda uji
3	Data Loger	8	Tumpuan rol
4	Hidrolic jack	9	Tumpuan sendi
5	Pembebanan titik	10	LVDT

Kecepatan pembebanan menurut ASTM D 198 pada pengujian lentur untuk benda uji berukuran struktural maka kecepatan pembebanan adalah sebesar:

$$N = Za(3L - 4a)/3h \text{ (ASTMD 198)}$$

Dimana N = Kecepatan pembebanan/menit, Z = Kecepatan perubahan bentuk (regangan) serat per inci pada arah memanjang/menit untuk lentur pada balok besar dipakai 0,001, L = panjang balok, a = jarak beban ke tumpuan terdekat, h = tinggi balok.

Data yang dikumpulkan dari pengujian adalah data beban dan displasmen dari beberapa titik untuk kemudian di olah. Pengolahan data meliputi diagram tegangan regangan, analisis kekakuan lentur (*bending stiffnes*), diagram kelengkungan (*curvatur*), MOE komposit, efisiensi struktur (λ) dan analisis kelayakan balok komposit sengan sebagai pengganti balok struktur.

Rumus yang digunakan pada pengujian lentur dua titik pembebanan adalah sebagai berikut:

$$MOE = \frac{Pa}{48 \delta l} x(3L^2 - 4a^2)$$

P = selisih beban dibawah batas proporsional, a = jarak beban ke tumpuan terdekat, L = Bentang antar tumpuan, δ = Perubahan defleksi terbesar pada sumbu netral balok ditengah bentang, I = Inersia penampang

$$MOR = \frac{3 Pmax. a}{bh^2}$$

Kekakuan balok dapat dapat dianalisis dengan memanfaatkan kurva hubungan antara beban dan lendutan yang terjadi pada balok. Kekakuan didefinisikan sebagai gaya yang dibutuhkan untuk memberikan satu unit displasmen. Besarnya kekakuan pada balok dihitung dengan persamaan

$$k = \frac{P}{\delta}$$

Dengan k = kekakuan, P = Besarnya beban dan δ = lendutan.

Penentuan besarnya faktor kekakuan (EI) balok dapat diketahui menggunakan hubungan momen dan kelengkungan dari data hasil pengujian sebagai berikut.

$$EI = \frac{M}{\varphi}$$

Dengan φ = Kelengkungan balok, M = Momen, EI = Faktor kekakuan.

Kelengkungan (*curvatur*) balok glulam didekati dengan metode beda hingga (*Finite difference*) yakni central difference, dimana kelengkungan diperoleh berdasarkan besaran lendutan yang terjadi pada titik tinjauan serta titik – titik yang bersebelahan pada jarak yang sama, yaitu:

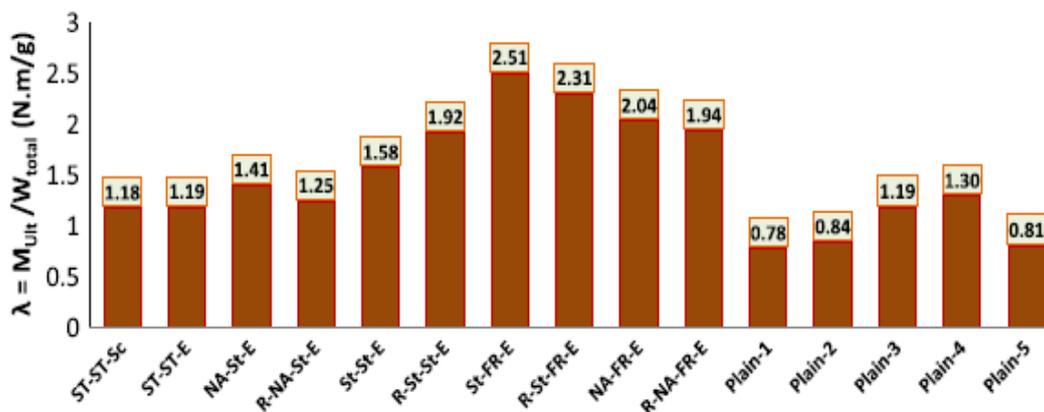
$$\varphi = \frac{l}{r} = \frac{(y_{i-1} - 2y_i + y_{i+1}))}{(\Delta_x)^2}$$

Dengan y_{i-1} dan y_{i+1} adalah lendutan pada posisi sebelum (i-1) dan sesudah (i+1) dari posisi titik tinjau (i), Δ_x = jarak antara titik tinjauan terhadap sumbu x.

Menurut T. Ghanbari, dkk. 2016 Efisiensi struktur (λ) didefinisikan sebagai rasio perbandingan kapasitas maksimum dengan berat struktur dimana pada kajian tersebut perkuatan dengan steel plate dan FRP mampu memberikan nilai efisiensi struktur yang paling baik. Efisiensi struktur ini menjadi faktor penting untuk daerah rawan gempa dimana dibutuhkan struktur yang ringan tapi memiliki kapasitas yang baik karena nilai eksentrisitas akibat gaya lateral terhadap berat sendiri bisa dikurangi.

$$\lambda = \frac{M_{max}}{w}$$

λ = Efisiensi struktur, M_{max} = Momen maksimum, w = Berat sendiri struktur.



Gambar 4. Rasio efisiensi struktur pada riset T. Ghanbari, dkk. 2016

HASIL DAN PEMBAHASAN

Komposisi pada perkuatan balok kayu untuk meningkatkan kapasitas struktur dapat menggunakan beberapa jenis komponen yang dianalisis sesuai sifatnya pada perilaku balok terlentur, sehingga kayu lemahpun dapat ditingkatkan elastisitas dan kekakuannya. Kayu sengon merupakan kayu lemah berdasarkan hasil pengujian pendahuluan memiliki kuat tekan 16,91 Mpa, kuat tarik 46,33 Mpa, kuat geser 3,51 Mpa, kuat lentur 23,52 Mpa, MOE 4210,99 Mpa dan termasuk klasifikasi E6 (SNI Kayu, 2013,29).Jenis kayu ini biasanya digunakan untuk kayu lapis, panel dan tidak dipakai dalam kebutuhan kayu struktural.

Komponen tekan didukung lamina keruing dengan tebal 2 cm, dari hasil pengujian pendahuluan didapatkan kemampuan kuat tekan sejajar seratnya sebesar 47,58 Mpa. Komponen tarik didukung oleh steel plate dengan hasil pengujian tarik sebesar 267,28 Mpa. Kuat tekan keruing dan kuat tarik balok yang cukup tinggi diharapkan mampu memberikan dukungan terhadap perkuatan balok kayu sengon sebagai balok struktural.

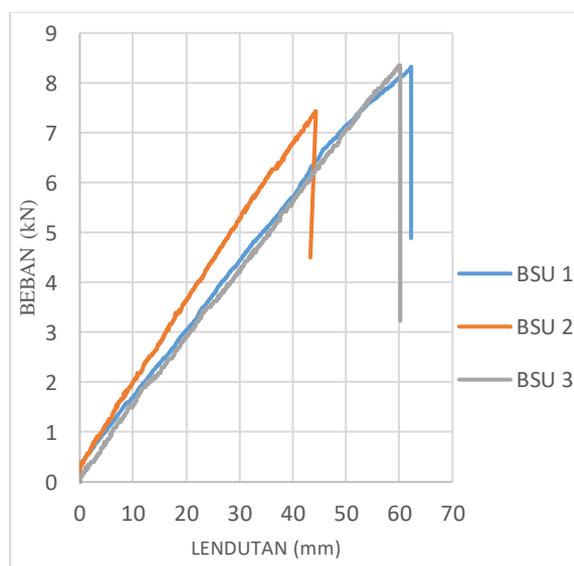
Hasil pengujian balok utuh dan balok laminasi komposit dengan pengujian dua titik pembebanan dibuat grafik hubungan beban dan lendutan maksimum ditengah bentang. Kemudian dianalisis untuk mengetahui nilai

MOE, MOR, kekakuan, momen maksimum, kelengkungan, faktor kekakuan (EI), dan efisiensi struktur (λ). Pengujian lentur balok sengon utuh sebagai variabel kontrol

peningkatan kapasitas balok laminasi komposit. Benda uji yang dipakai berukuran 8x12x320 cm. Hasil pengujian balok sengon utuh adalah sebagai berikut:

Tabel 2. Pengujian Balok Sengon Utuh

Kode	Proporsional		Max		MOE	MOR	Kekakuan	Mmax	Kelengkungan	Faktor Kekakuan	Efisiensi
	P kN	\square mm	P kN	\square mm	Mpa	Mpa	k	Nmm	φ	EI	λ
BSU 1	6,62	45,52	8,33	63,78	6059,9	21,00	145,43	8326,00	-79,50	-148,86	1,14
BSU 2	6,27	36,45	7,43	44,35	7629,7	20,17	171,96	7432,50	-44,10	-177,26	1,01
BSU 3	5,23	36,94	8,35	60,18	7318,1	20,79	141,66	8352,50	-108,67	-106,81	1,06
Rata2	6,04	39,63	8,04	56,10	7002,6	20,65	153,02	8037,00	-77,42	-144,31	1,07



Gambar 5. Grafik pengujian balok sengon utuh

Dari tabel dan gambar diatas menunjukkan perilaku mekanis BSU 1, 2, dan 3. Ditinjau dari perilaku mekanisnya bahwa BSU 1 memiliki P maks dan MOR paling tinggi namun nilai MOENya paling rendah sebesar 6059 Mpa. Lorentius (2007,42) menguji sifat mekanis sengon dan mendapatkan nilai MOE rata-rata sebesar 5530 Mpa atau 26,7% lebih rendah dibandingkan bahan sengon yang dipakai. Dengan kata lain sengon yang digunakan dalam kajian ini memiliki karakter mekanis yang lebih bagus.

Beban maksimum rata-rata yang mampu ditahan adalah sebesar 8,04 kN, modulus elastisitas rata-rata sebesar 7002, 62 Mpa, MOR rata-rata sebesar 20,65 Mpa, kekakuan rata-rata sebesar 153,02, kelengkungan sebesar -77,42 , efisiensi struktur rata-rata sebesar 1,07. Melihat karakter hasil pengujian lentur kayu sengon ini memiliki kemampuan rata-rata yang cukup baik, mengingat sengon ini berasal dari pohon yang cukup besar dan usia yang cukup.



Gambar 6. Pola kerusakan balok sengon utuh

Tumpuan perletakan pembebanan dan tumpuan beban diberi plate tebal 5 mm dihitung berdasarkan area tekanan dengan kuat tekan tegak lurus serat. Hasil pengujian pendahuluan sifat mekanis komponen penyusun balok komposit digunakan untuk menghitung beban maksimum berdasarkan prinsip analisis tampang transformasi. Nilai prediksi Pmaks

Analisis Perkuatan Lentur ... (Teguh/hal. 129-140)

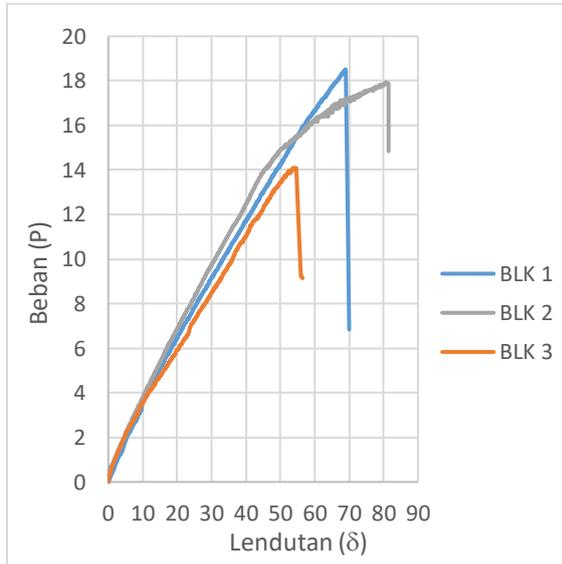
didapatkan sebesar 16,33 kN. Pengujian lentur balok laminasi komposit dilakukan dengan benda uji balok laminasi komposit untuk mendapatkan perilaku mekanik lenturnya. Dari hasil gambar dibawah didapatkan nilai beban

rata-rata sebesar 16,82 kN selisih 2,99% dari hasil perhitungan analitis. Hal ini dipengaruhi oleh ketelitian dimensi dari pembuatan benda uji. Didapatkan hasil pengujian balok laminasi komposit sebagai berikut:

Tabel 3. Hasil Pengujian Balok Laminasi Komposit

Kode	Beban Proporsional		Beban Max		MOE	MOR	Kekakuan	Mmax	Curvatur	Faktor Kekakuan	Efisiensi
	P kN	δ mm	P kN	δ mm	Mpa	Mpa	k	Nmm	φ	EI	λ
BLK 1	13,9	48,6	18,5	69,0	10695	44,9	327,2	18515,5	-22,7	-308,0	1,41
BLK 2	14,0	45,0	17,8	81,4	11273	42,4	354,8	17940,0	-21,4	-335,7	1,24
BLK 3	11,7	42,3	14,0	54,6	9290,5	31,7	293,0	14087,5	-28,0	-273,4	1,07
rata2	13,2	45,3	16,8	68,3	10419	39,7	325,0	16847,7	-24,0	-305,7	1,24

Beban maksimum yang mampu ditahan paling kecil adalah BLK 3 yaitu 14,08 Mpa pada displasmen 54,62 mm sedangkan rata – rata sebesar 16,82 kN pada displasmen rata-rata 68,35 mm.



Gambar 7. Grafik pengujian balok laminasi komposit

Balok laminasi komposit dianalisis untuk dapat meningkatkan kapasitas struktur. Perkuatan-perkuatan yang dilakukan berdasarkan perilaku tegangan yang timbul pada balok. Balok yang terlentur mengalami gaya tekan pada sisi atas dan gaya tarik pada sisi bawah. Seberapa besar kemampuan ini setelah dibebani baik itu beban maksimum, lendutan dan pola kegagalan. Beban maksimum yang mampu ditahan struktur balok sagon utuh adalah 8,04 kN sedangkan setelah melalui rekayasa balok laminasi komposit mampu menahan beban maksimum 16,82 kN atau meningkat sebesar 109%.

Modulus elastisitas balok kayu sagon utuh rata-rata adalah sebesar 7.002,62 Mpa. Sedangkan modulus elastisitas balok laminasi komposit sebesar 10.419 Mpa atau meningkat 49%. Kemampuan modulus elastisitas balok laminasi komposit ini setara dengan kayu mutu E11 pada SNI-2013,29.

Kuat lentur balok kayu sagon utuh sebesar 20,65 Mpa, sedangkan pada balok laminasi komposit yang telah mengalami penambahan perkuatan kuat lenturnya menjadi 39,72 Mpa atau meningkat sebesar 92%.

Analisis Perkuatan Lentur ... (Teguh/hal. 129-140)

Kekakuan merupakan representasi dari kemampuan struktur untuk mempertahankan bentuk asli akibat gaya yang diterima. Semakin sulit struktur berubah bentuk akibat gaya maka dapat dikatakan struktur tersebut semakin kaku. Kekakuan balok dianalisis dengan memanfaatkan beban dan lendutan yang terjadi. Kekakuan balok sagon utuh dilihat pada beban proporsional 6,4 kN adalah sebesar 153,02. Dimana kekakuan paling tinggi adalah BSU 2 sebesar 171,96 dan paling rendah BSU 3 sebesar 141,66. Pada pengujian balok laminasi komposit dengan beban yang sama didapatkan kekakuan rata-rata 325,06 atau meningkat 112,43%.

Pemasangan sejumlah 3 LVDT di setengah bentang digunakan untuk mengetahui kelengkungan (Curvature) balok. Pada pengujian balok sagon utuh kelengkungan maksimum terjadi pada BSU 3 dengan nilai -108,67 dan rata-rata sebesar -77,42 pada beban maksimum rata-rata 8,04 kN. Kemudian kelengkungan rata-rata yang terjadi pada balok laminasi komposit pada beban yang sama 8,04 kN adalah -24,03. Sehingga terdapat peningkatan sebesar 69%.

Efisiensi struktur didefinisikan sebagai perbandingan antara kemampuan momen maksimum terhadap berat sendiri struktur tersebut Ghanbari tahun 2016 telah melakukan penelitian tentang efisiensi struktur dengan hasil koefisien efisiensi struktur paling baik pada kayu dengan penambahan FRP yaitu sebesar 2,51. Sedangkan pada pengujian kontrol balok sagon utuh didapatkan nilai efisiensi struktur rata-rata sebesar 1,07, dan pada pengujian balok laminasi komposit didapatkan nilai efisiensi struktur sebesar 1,24 atau meningkat sebesar 15,89%.



(a)



(b)

Gambar 8. (a) Pola lendutan balok komposit, (b) Pola kerusakan balok komposit

Pola kegagalan yang terjadi pada balok sengon utuh merupakan kegagalan lentur bersifat getas pada pembebanan linear dengan serat terputus pada lendutan maksimum rata-rata 56,1 mm. Penambahan laminasi komposit menyebabkan perubahan pola kegagalan. Dimana balok lebih elastis melentur sampai dengan lendutan maksimum rata-rata 68,35 mm dan kerusakan komponen sengon yang tiba-tiba tidak menyebabkan balok runtuh karena masih ditahan oleh *steel plate* dan lamina keruing. Kerusakan dimulai dari *steel plate* yang leleh memanjang pada titik tertentu dan kemudian dilanjutkan dengan mengerutnya lamina keruing akibat tekan sampai akhirnya elemen sengon rusak lentur ditandai geser pada sekitaran garis netral balok.

Balok laminasi komposit diharapkan mampu sebagai balok struktural. Analisis perhitungan

pembebanan direncanakan untuk beban lantai dengan bentang 3m, jarak antar balok 1 m, dan beban hidup rencana adalah 350 Kg/m² maka beban maksimum yang terjadi adalah 1050 Kg atau 10,5 kN. Pada balok sengon utuh berdasarkan pengujian beban maksimum rata-ratanya adalah 8,04 kN maka jelas balok sengon utuh ini tidak mampu digunakan sebagai balok struktural. Pada perkuatan laminasi komposit balok mampu menahan beban maksimum rata-rata sebesar 16,82 kN, lebih tinggi dari pembebanan rencana yang dibutuhkan untuk balok lantai maka konsep balok laminasi komposit ini dapat digunakan sebagai balok struktural.

SIMPULAN

Peningkatan yang dapat dicapai adalah beban maks 109%, modulus elastisitas 49%, kuat lentur 92%, kekakuan 112,43%, kelengkungan 69%, efisiensi struktur 15,89%. Balok kayu sengon tergolong dalam kelas E6 setelah dilakukan perkuatan laminasi komposit dapat ditingkatkan kapasitas strukturnya setara dengan kelas E11 (SNI Kayu, 2013,29). Beban rencana pada balok lantai sederhana adalah 10,5 kN dan beban yang mampu ditahan balok laminasi komposit sebesar 16,82 kN maka balok laminasi komposit mampu meningkatkan kapasitas balok sengon untuk digunakan sebagai balok struktural. Pola kegagalan balok laminasi mengalami rusak lenturan tidak menyebabkan balok runtuh secara tiba-tiba karena serat sengon yang putus masih terikat dengan *steel plate* dan lamina keruing.

DAFTAR RUJUKAN

- [1] Alhayek dan Svecova (2012). "Flexural Stiffness and Strength of GFRP-Reinforced Timber Beams". ASCE. J. Compos. Constr. 2012.16:245-252. Univ. of Manitoba, Winnipeg MB, Canada.
- [2] A Paulito M. D, Dantje A.T.S, R. Cornelis (2013). "Tinjauan Kuat Lentur Balok Komposit Kayu Beton Dengan Penghubung Geser Paku Polos dan Paku Uliir" Jurnal Teknik Sipil, Vol.II, No. 2, September 2013, Lab. JTS Univ. Nusa Cendana, NTT, Indonesia.

- [3] Anshari, B (2006). "Pengaruh Variasi Tekanan Kempa Terhadap Kuat Lentur Kayu Laminasi Dari Kayu Meranti Dan Keruing". Civil Engineering Dimension, Vol. 8, No. 1, 25–33. Universitas Mataram, NTB, Indonesia.
- [4] ASTM Standard D-198-1999, *Standard Test Methods of Static Test of Lumber in Structural Size*, ASTM, West Conshohocken, PA.
- [5] Awaludin, A., Irawati, IS. 2005. *Konstruksi Kayu*. Yogyakarta: Biro Penerbit KMTS UGM.
- [6] Bodig, J., Jayne Benjamin A. ©1982. *Mechanics of Wood and Wood Composites*. United States of America: Van Nostrand Reinhold Company.
- [7] Bowes, W.H, Russell L.T., Suter G.T. (1984). *Mechanics of Engineering Materials*. United States of America: John Wiley & Sons, Inc.
- [8] Design AID No.6. (2007). "Beam Formulas With Shear And Moment Diagrams". American Wood Council (AWC). American Forest and Paper Association. America.
- [9] Eddy, I P. 2003. *Perilaku Mekanika Balok Laminasi Kayu Keruing-Bambu Petung Terhadap Pembebanan Lentur*. [Tesis]. Yogyakarta. Teknik Sipil FT UGM.
- [10] Evander L.T., Rocky. 2013. *Karakteristik sifat fisis dan mekanis kayu jabon (anthocephalus cadamba miq) dan sengon (falcataria Moluccana miq) dari empulur ke kulit*. [Skripsi]. Bogor. Fakultas Kehutanan IPB.
- [11] Feliana, Fatma. 2014. *Studi empiris nilai modulus elastisitas kayu menggunakan metode stress wave velocity*. [TA]. Yogyakarta. Teknik Sipil UGM.
- [12] Fossetti M., Giovanni M., Maurizio P. (2015). "Flexural behaviour of glulam timber beams reinforced with FRP cords". ELSEVIER. Construction and Building Materials 95 (2015) 54–64. Cittadella Universitaria. Italy.
- [13] Ghanbari G.T, Jiao H., Holloway D. (2016). "Composite Timber Beams Strengthened by Steel and CFRP". ASCE Analisis Perkuatan Lentur ... (Teguh/hal. 129-140) J. Compos. Constr., 04016059. Univ. of Tasmania. Australia.
- [14] Gentile C., Svecova D., Rizkalla S.H. (2002) "Timber Beams Strengthened with GFRP Bars; Development and Applications" ASCE J. Compos. Constr. 2002.6:11-20, Univ. of Manitoba, Winnipeg MB, Canada R3T 5V6.
- [15] Gere, J.M., Timoshenko, S. 2000. *Mekanika Bahan Jilid 1 Edisi Keempat*. Jakarta. Erlangga.
- [16] Handayani, S. 2009. *Metode Perekatan Dengan Lem Pada Sambungan Pelebaran Kayu*. [Jurnal]. Semarang. Teknik Sipil FT UNNES.
- [17] H Kimeng T., Olusegun E.O., Okoli O.G., Ango A.J. (2015) "Temperature Effects on Glue Performance and Compressive Strength of Glue Laminated Funtumia Africana" *International Journal of Advanced Research in Engineering Vol 1(1) Apr – Jun 2015*. Ahmadu Bello University, Zaria.
- [18] Jasien´ko, Nowak P. (2014) "Solid timber beams strengthened with steel plates – Experimental studies". ELSEVIER. Construction and Building Materials 63 (2014) 81–88. University of Technology. Poland.
- [19] Mardikanto TR., Karlinasari L., Bahtiar, ET. 2011. *Sifat Mekanis Kayu*. Bandung: IPB Press.
- [20] Monica A. Snow. "Engineered Wood Products". Wentworth Institute of Technology. America.
- [21] SNI 4096:2007. *Baja Lembaran dan Gulungan Lapis Panduan Aluminium – Seng (BjlAS)*. PUSLITBANG-Badan Standarisasi Nasional.
- [22] SNI 7973-2013. *Spesifikasi desain untuk konstruksi kayu*. PUSLITBANG-Badan Standarisasi Nasional.
- [23] Sulistyawati I., Nugroho N., Suryokusumo S., Hadi YS. (2008). "Kekakuan dan Kekuatan Lentur Maksimum Balok Glulam dan Utuh Kayu Akasia" *Jurnal Teknik Sipil*, Vol.15 No.3 Desember 2008, Lab Keteknikan Kayu IPB, Bogor, Jawa Barat.