

Desain Kekuatan Sambungan Geser Tunggal Menggunakan Paku pada Lima Jenis Kayu Indonesia

Riezky Rakamuliawan Sutanto

Program Studi Magister, Departemen Hasil Hutan, Fakultas Kehutanan - IPB, Lab. Rekayasa dan Desain Bangunan Kayu, Fakultas Kehutanan - IPB, Jl. Lingkar Akademik, Kampus IPB Darmaga, Bogor 16680
E-mail: riezkyraka@gmail.com

Sucahyo

Departemen Hasil Hutan, Fakultas Kehutanan - IPB, Jl. Lingkar Akademik, Kampus IPB Darmaga, Bogor 16680
E-mail: sucahyoss@gmail.com

Naresworo Nugroho

Departemen Hasil Hutan, Fakultas Kehutanan - IPB, Jl. Lingkar Akademik, Kampus IPB Darmaga, Bogor 16680
E-mail: naresworo@yahoo.com

Abstrak

*Standar Nasional Indonesia (SNI) 7973 (2013) adalah standar yang umum digunakan dalam penentuan konstruksi kayu di Indonesia. Dalam SNI-7973 terdapat cara penentuan nilai desain sambungan kayu secara teoritis yang saat ini masih mengadopsi nilai-nilai yang diperoleh dari National Design Specification (NDS) (2012). NDS sendiri disusun berdasarkan sifat-sifat kayu berdaun jarum yang umum digunakan di Amerika. Nilai-nilai yang diadopsi tersebut tentunya meningkatkan resiko ketidaksesuaian jika digunakan langsung di Indonesia, hal ini karena Indonesia sebagai negara tropis memiliki kayu dengan rentang berat jenis yang lebih besar dan didominasi oleh kayu berdaun lebar dengan struktur anatomi yang berbeda. Penelitian ini membandingkan nilai desain sambungan kayu yang diperoleh dari pengujian secara empiris dengan nilai desain sambungan yang dihasilkan secara teoritis berdasarkan SNI-7973 dan Eurocode 5 (EC-5) (2004). Hasil penelitian menunjukkan nilai desain sambungan kayu terendah diperoleh pada sambungan kayu *Paraserienthes falcataria* menggunakan paku 10 cm sebesar 53.66 kgf dan nilai tertinggi diperoleh pada sambungan kayu *Shorea laevifolia* menggunakan paku 15 cm sebesar 149.89 kgf. Penentuan nilai desain teoritis SNI-7973 menghasilkan nilai lebih rendah sebesar 13.65% sedangkan EC-5 menghasilkan nilai lebih tinggi 8.87% dibandingkan nilai yang diperoleh pada pengujian empiris.*

Kata-kata Kunci: Nilai desain, eurocode 5, SNI-7973, sambungan kayu geser tunggal.

Abstract

*Standar Nasional Indonesia (SNI) 7973 (2013) is a standard that commonly used in the determination of wood construction in Indonesia. In SNI-7973 there is a theoretical method to determining the design value of wood connection that currently still adopt the values derived from National Design Specification (NDS) (2012). NDS itself is structured based on the properties of softwood that commonly used in America. The values adopted are certainly increase the risk of incompatibility if used directly in Indonesia, this is because Indonesia as a tropical country has wood with wider range of specific gravity and dominated by hardwood with different anatomical structures. This study compares the value of single shear wooden connection obtained from empirical testing with theoretically generated connection values based on SNI-7973 and Eurocode 5 (EC-5) (2004). The results showed the lowest design value of wood connections obtained on *Paraserienthes falcataria* wood connection using 10 cm nail by 53.66 kgf and the highest value obtained on *Shorea laevifolia* wood connection using 15 cm nail by 149.89 kgf. The determination of the theoretical design value based on SNI-7973 yielded a lower value of 13.65% while EC-5 yielded a higher value of 8.87% than the value obtained from empirical testing.*

Keywords: Design value, eurocode 5, SNI-7973, single shear wood connection.

1. Pendahuluan

Saat ini kayu masih menjadi bahan baku konstruksi yang diminati oleh masyarakat di Indonesia. Beberapa nilai positif yang membuat kayu disukai adalah mudah dikerjakan, memiliki kekuatan yang cukup dan memiliki nilai estetika tinggi. Sebagai bahan konstruksi, kayu dapat digunakan untuk membuat berbagai macam struktur dari struktur dengan skala kecil sampai dengan besar. Agussalim (2010) menyatakan saat ini kayu yang

ada di pasaran memiliki keterbatasan dalam ukuran, baik lebar maupun bentangnya. Hal tersebut dipengaruhi oleh kayu sebagai bahan alami yang pertumbuhannya terbatas dan efisiensi dalam hal pengangkutan. Salah satu cara mengatasi keterbatasan kayu dalam hal ukuran adalah sambungan kayu. Tular dan Idris (1981) menyatakan sambungan merupakan titik terlemah dari suatu konstruksi sehingga membutuhkan metode yang tepat dalam menyambung agar dapat menerima dan menyalurkan gaya yang bekerja kepadanya. Surjokusumo, *et al.* (1980) menyatakan kekuatan sambungan kayu sangat

dipengaruhi oleh komponen pembentuk sambungan, yaitu balok kayu yang akan disambung, alat sambung dan bentuk sambungan.

Salah satu tipe alat sambung yang umum digunakan untuk menyambung kayu di Indonesia adalah alat sambung tipe *dowel*. *Dowel* adalah alat sambung mekanik dengan bentuk *pen* berpenampang bulat. Beberapa contoh alat sambung *dowel* antara lain adalah paku, baut, dan pasak. Di Indonesia paku menjadi alat sambung yang populer digunakan karena memiliki berbagai kelebihan antara lain harganya murah, pemasangan mudah, sambungan bersifat kaku dan memiliki kekuatan cukup. Sudah banyak penelitian yang dilakukan tentang sambungan kayu seperti yang dilakukan oleh Awaludin, *et al.* (2007), Sandhaas, *et al.* (2013), dan Hassan, *et al.* (2013) yang menyatakan bahwa sambungan kayu dipengaruhi oleh berat jenis kayu, kadar air kayu, diameter *dowel*, dan arah pembebanan. Sadiyo (2011) menyatakan nilai desain lateral sambungan kayu ganda dengan plat besi mengalami peningkatan seiring dengan meningkatnya berat jenis, kerapatan, dan diameter alat sambung.

Sejauh ini penentuan nilai desain sambungan kayu tidak hanya dapat dilakukan dengan melakukan pengujian empiris, tetapi juga dapat diperoleh secara teoritis. SNI-7973 (2013) sebagai standar yang umum digunakan oleh peneliti dan desainer konstruksi kayu di Indonesia menyediakan formula matematis dan nilai-nilai yang dapat digunakan untuk menghitung nilai desain suatu sambungan secara teoritis. Formula dan nilai-nilai tersebut bila dilihat lebih lanjut merupakan adopsi dari *National Design Specification (NDS)* (2012) dalam AWC (2012). NDS adalah standar penentuan konstruksi kayu yang digunakan di Amerika. Pada standar tersebut nilai-nilai dan formula matematis didalamnya disusun berdasarkan nilai alat sambung dan jenis kayu yang umum digunakan di Amerika. Hal ini tentunya meningkatkan potensi ketidaksesuaian terhadap nilai-nilai yang tertera pada SNI-7973 (2013), karena Indonesia sebagai negara beriklim tropis didominasi oleh kayu berdaun lebar, memiliki variasi jenis yang lebih banyak, dan rentang berat jenis yang lebih lebar.

Tujuan penelitian ini adalah untuk mempelajari perilaku dan mengevaluasi pengaruh berat jenis kayu, diameter paku dan kombinasi berat jenis kayu terhadap nilai desain sambungan kayu tunggal berbagai jenis kayu tropis di Indonesia. Penelitian ini juga diharapkan dapat mengevaluasi perhitungan nilai desain sambungan kayu yang ditetapkan berdasarkan SNI-7973 (2013) dengan kondisi empiris sambungan kayu menggunakan kayu yang umum digunakan di Indonesia.

2. Bahan dan Metode

2.1 Bahan dan alat penelitian

Bahan penelitian yang digunakan adalah lima jenis kayu Indonesia dengan berat jenis rendah hingga tinggi yaitu : kayu sengon (*Paraserienthes falcataria*) mewakili rentang berat jenis 0.3 - 0.4, kayu jabon (*Anthocephalus cadamba*) mewakili rentang berat jenis 0.4 - 0.5,

kayu meranti merah (*Shorea spp*) mewakili rentang berat jenis 0.5 - 0.6, kayu mersawa (*Anisoptera marginata*) mewakili rentang berat jenis 0.6 - 0.7 dan kayu bangkirai (*Shorea laevifolia*) mewakili rentang berat jenis 0.7 - 0.8. Ukuran kayu yang digunakan pada penelitian ini adalah 6 x 12 x 400 cm, yang diperoleh dari tempat penjualan kayu yang berada di sekitar kampus IPB Dramaga, Bogor.

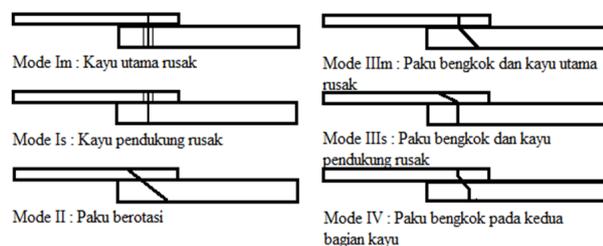
Jenis paku yang digunakan yaitu : paku diameter 0.42 cm dengan panjang 10 cm, paku diameter 0.47 cm dengan panjang 12 cm dan paku diameter 0.52 cm dengan panjang 15 cm

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini antara lain : gergaji mesin, gergaji besi, mesin serut, kaliper, timbangan elektrik, oven, mesin bor, dan UTM (*Universal Testing Machine*) merek Instron 3379.

2.2 Metode pengujian

Pengujian sifat fisis meliputi pengujian kadar air, kerapatan dan berat jenis kayu berdasarkan *British Standart (BS) 373* (1957). Pengujian sampel sifat fisis dilakukan dengan pengulangan sebanyak 10 kali pada masing-masing jenis kayu. Penentuan nilai desain sambungan kayu tunggal menggunakan dua metode yaitu metode teoritis berdasarkan SNI-7973 (2013) dan *Eurocode 5 (EC-5)* (2004) dan metode empiris dengan melakukan pengujian langsung pada sampel sambungan kayu.

Untuk menghitung nilai desain sambungan kayu tunggal secara teoritis SNI-7973 (2013) telah menyediakan enam jenis formula yang dapat digunakan. Enam jenis formula tersebut merepresentasikan kemungkinan yang terjadi pada sebuah sambungan kayu tunggal seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 1. Tabel 1** menyajikan enam formula perhitungan nilai desain sambungan kayu berdasarkan SNI-7973 (2013). Penentuan nilai kuat lentur paku (F_{yb}) dan nilai kuat tumpu paku (F_c) yang dibutuhkan dalam menghitung nilai desain teoritis menggunakan nilai dan persamaan yang tertera pada SNI-7973 (2013). Nilai F_{yb} paku dengan diameter 0.45 cm sebesar 6328 kg/cm² dan paku dengan diameter 0.46-0.55 cm sebesar 5624 kg/cm². Nilai F_c diperoleh dengan menggunakan persamaan $F_c = 114.5G^{1.84}$, dimana G adalah berat jenis kayu yang diukur pada kondisi kadar air dibawah 20%. Penentuan nilai desain sambungan kayu tunggal secara teoritis menggunakan dimensi balok yang sama dengan penentuan nilai desain empiris sebesar 40x4.5x5 cm pada masing-masing sisi.



Gambar 1. Mode kerusakan sambungan geser tunggal

Tabel 1. Formula perhitungan sambungan kayu tunggal SNI-7973 (2013)

Mode Kerusakan	Formula SNI-7973
I_m	$Z = \frac{D L_m F_{Em}}{R_d}$ (1)
I_s	$Z = \frac{D L_s F_{Es}}{R_d}$ (2)
II	$Z = \frac{k_1 D L_s F_{Em}}{R_d}$ (3)
III_m	$Z = \frac{k_2 D L_s F_{Em}}{(1 + 2R_e) R_d}$ (4)
III_s	$Z = \frac{k_2 D L_s F_{Em}}{(2 + 2R_e) R_d}$ (5)
IV	$Z = \frac{D^2}{R_d} \sqrt{\frac{2 F_{Em} F_{yb}}{3(1 + R_e)}}$ (6)

Catatan :

$$k_1 = \frac{\sqrt{Re + 2Re^2(1 + Rt + Rt^2) + Rt^2Re^2 - Re(1 + Rt)}}{(1 + Re)} \quad (7)$$

$$k_2 = -1 + \sqrt{2(1 + Re) + \frac{2F_{yb}(1 + 2Re)D^2}{3F_{Em}Lm^2}} \quad (8)$$

$$k_3 = -1 + \sqrt{\frac{2(1 + Re)}{Re} + \frac{2F_{yb}(2 + Re)D^2}{3F_{Em}Ls^2}} \quad (9)$$

$$R_d = K_D^{-1} \quad (10)$$

Selain perhitungan nilai desain teoritis menggunakan standar SNI-7973 (2013) yang merupakan standar yang diadopsi dari NDS yang digunakan di Amerika, pada penelitian ini juga dilakukan perhitungan nilai desain teoritis dengan menggunakan standar penentuan konstruksi kayu yang digunakan pada di Eropa yaitu EC-5 (2004). Penentuan nilai desain menggunakan EC-5 (2004) sama seperti yang digunakan pada SNI-7973 (2013) yaitu menggunakan enam formula perhitungan yang telah disediakan. Formula tersebut menggambarkan mode kerusakan yang diperkirakan terjadi pada sambungan tunggal seperti yang tertera pada **Gambar 1**. Nilai yang digunakan sebagai nilai desain adalah nilai terendah dari ke-enam formula tersebut. **Tabel 2** menyajikan enam formula perhitungan menurut EC-5 (2004).

Tabel 2. Formula perhitungan sambungan kayu tunggal EC-5 (2004)

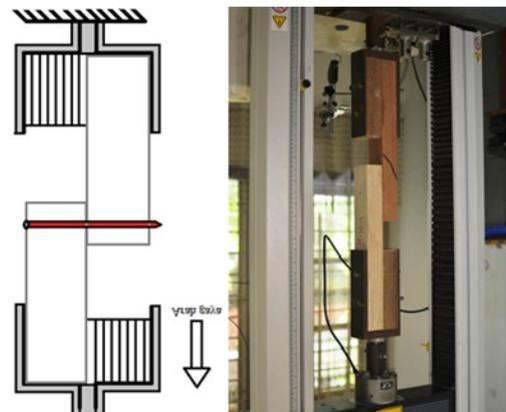
Mode Kerusakan	Formula EC-5
A	$F_{v,Rk} = F_{h,1,k} t_1 d$ (11)
B	$F_{v,Rk} = F_{h,1,k} t_2 d$ (12)
C	$F_{v,Rk} = \frac{F_{h,1,k} t_1 d}{1 + \beta} \left[\beta + 2\beta^2 \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^2 \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] - \beta \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$ (13)
D	$F_{v,Rk} = 1.05 \frac{F_{h,1,k} t_1 d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2\beta^2(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$ (14)
E	$F_{v,Rk} = 1.05 \frac{F_{h,1,k} t_2 d}{1 + 2\beta} \left[\sqrt{2\beta^2(1 + \beta) + \frac{4\beta(1 + 2\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_2^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$ (15)
F	$F_{v,Rk} = 1.15 \sqrt{2M_{y,Rk} f_{h,1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$ (16)

Pada EC-5 penentuan nilai leleh lentur paku karakteristik, nilai kuat tumpu karakteristik dan kapasitas cabut paku karakteristik menggunakan persamaan empiris yang telah disediakan oleh EC-5. Nilai momen leleh karakteristik paku dihitung dengan rumus $M_{y,Rk} = 0.3 f_u d^{2.6}$ dimana $f_u=144.42$ N/mm, sedangkan kekuatan benam paku karakteristik ke dalam kayu dihitung dengan rumus $F_{h,1,k} = 50(1 - 0.01d)G$ dimana d =diameter paku, dan G =berat jenis kayu. Nilai kapasitas cabut paku karakteristik dihitung menggunakan rumus $F_{ax,Rk} = 7850 G^{5/2} dl$ dimana l = penetrasi paku.

Untuk mengetahui kehandalan formula yang digunakan pada SNI-7973 (2013) dan EC-5 (2004) dalam memprediksi nilai desain sambungan kayu di Indonesia, dilakukan perbandingan nilai desain sambungan kayu yang diperoleh secara teoritis dengan nilai desain sambungan kayu secara empiris. Nilai desain sambungan kayu tunggal secara empiris diperoleh dengan melakukan pengujian langsung terhadap sambungan yang telah di buat (**Gambar 2**). Sambungan dibuat menggunakan balok kayu berukuran 40x4.5x5 cm pada masing-masing sisi. Pembebanan tarik dilakukan dengan target pergeseran 1 cm menggunakan kecepatan 0.1 mm/detik.

Selanjutnya ditentukan besaran nilai desain empiris sambungan kayu tunggal yang disusun berdasarkan format ASD (*Allowable Stress Design*) menggunakan metode statistik sesuai standar ASTM D 2915-10 (2010). Nilai hasil pengujian sambungan kayu dihitung dengan melakukan perpotongan grafik beban-defleksi dengan garis linier offset 5% diameter alat sambung. Kemudian nilai tersebut disusun distribusinya sebagai distribusi normal dan dicari nilai kekuatan karakteristiknya (*5% Exclusion Limit*). Untuk dapat dibandingkan dengan nilai desain teoritis dilakukan penyesuaian berupa faktor durasi beban dan kadar air. Besarnya nilai kekuatan nilai desain empiris dapat dihitung dengan rumus:

$$Z = \frac{5\%EL}{Cd} X Cm \quad (17)$$



Gambar 2. Skema dan bagan pengujian empiris

2.3 Rancangan percobaan dan analisis data

Untuk melihat pengaruh berat jenis kayu, diameter paku dan kombinasi berat jenis kayu terhadap nilai desain sambungan kayu, maka data hasil pengamatan diolah

dan dianalisis menggunakan metode statistik rancangan acak lengkap faktorial. Sebagai perlakuan yaitu faktor A (kombinasi jenis kayu) terdiri dari 15 variasi yang tertera pada **Tabel 3**, B (diameter paku) terdiri dari 3 variasi $B_1 =$ paku 0.42 cm, $B_2 =$ paku 0.47 cm dan $B_3 =$ paku 0.52 cm. Dalam setiap satuan percobaan dilakukan tiga kali ulangan sehingga jumlah keseluruhan sampel yang diuji adalah 135 buah sambungan kayu. Model matematika yang digunakan untuk rancangan ini adalah :

$$Y_{ijk} = \mu + A_i + B_j + AB_{ij} + E_{ijk} \quad (18)$$

Tabel 3. Kombinasi jenis kayu

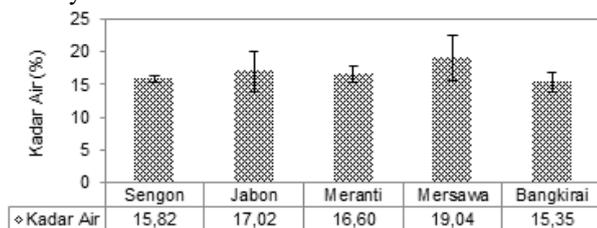
Kombinasi Jenis Kayu		
A ₁ (sengon-sengon)	A ₆ (jabon-jabon)	A ₁₁ (meranti-mersawa)
A ₂ (sengon-jabon)	A ₇ (jabon-meranti)	A ₁₂ (meranti-bangkirai)
A ₃ (sengon-meranti)	A ₈ (jabon-mersawa)	A ₁₃ (mersawa-mersawa)
A ₄ (sengon-mersawa)	A ₉ (jabon-bangkirai)	A ₁₄ (mersawa-bangkirai)
A ₅ (sengon-bangkirai)	A ₁₀ (meranti-meranti)	A ₁₅ (bangkirai-bangkirai)

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Sifat fisis

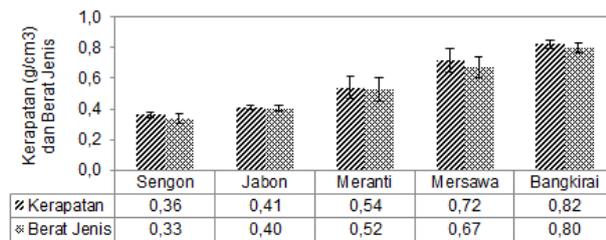
Salah satu karakteristik kayu sebagai bahan alami adalah bersifat higroskopis, menyesuaikan dengan kondisi sekitarnya kayu dapat menyerap dan melepaskan air di dalamnya. Berbagai studi telah dilakukan tentang hubungan kadar air dengan kekuatan kayu, Haygreen dan Bowyer, *et al.* (1996) menyatakan tingginya nilai kadar air didalam kayu berbanding terbalik dengan kekuatan kayu, karenanya nilai kadar air menjadi salah satu parameter yang penting untuk diperhatikan dalam hubungan kayu untuk menerima beban. Pada penelitian ini seluruh contoh uji yang digunakan dikondisikan di bawah nilai kadar air kering udara daerah penelitian yang bertempat di Bogor - Indonesia yaitu sebesar 19%. **Gambar 3** menunjukkan nilai kadar air kayu yang digunakan dalam penelitian.

Nilai kadar air tertinggi diperoleh kayu mersawa dengan rata-rata sebesar 19.04% dan terendah pada kayu bangkirai dengan rata-rata sebesar 15.35%. Meskipun sudah dilakukan tindakan pengeringan yang sama masih terdapat perbedaan nilai kadar air diantara kelima kayu yang digunakan, hal ini terkait dengan kemampuan dari masing-masing kayu untuk melepas air. Suhardianto (2013) menyatakan keluarnya air dari dalam kayu dipengaruhi oleh karakteristik anatomi penyusun kayu, kandungan zat ekstraktif, dan tilosis yang ada dalam kayu selain ukuran ketebalan dinding sel kayu itu sendiri.



Gambar 3. Kadar air lima jenis kayu

Sama seperti kadar air, kerapatan dan berat jenis kayu memiliki peranan yang penting dalam hubungannya dengan kekuatan. Kerapatan dan berat jenis kayu berbanding lurus dengan kekuatannya. Pada penelitian ini pemilihan jenis kayu di desain dengan menggunakan lima rentang berat jenis kayu tropis dari kayu dengan berat jenis rendah sampai kayu dengan berat jenis tinggi sebagaimana tertera pada **Gambar 4**. Dari **Gambar 4** juga dapat diketahui bahwa kerapatan lima jenis kayu yang digunakan lebih tinggi daripada berat jenisnya, hal ini dikarenakan adanya perbedaan kadar air pada saat dilakukan pengukuran. Nilai berat jenis kayu terendah terdapat pada kayu sengon dengan nilai rata-rata sebesar 0.33 dan terbesar pada kayu bangkirai sebesar 0.80.



Gambar 4. Kerapatan dan berat jenis lima jenis kayu

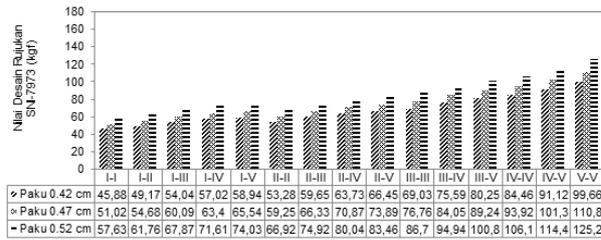
3.2 Nilai desain

3.2.1 Nilai desain rujukan teoritis SNI-7973 (2013)

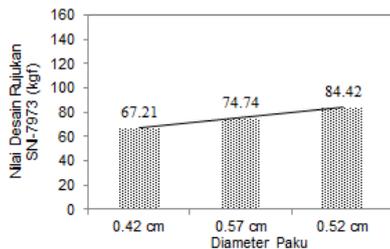
Penentuan nilai desain rujukan teoritis (Z) berdasarkan SNI-7973 (2013) menggunakan formula dan variabel kunci yang telah disediakan. Variabel pendukung yang digunakan pada formula menyesuaikan dengan dimensi kayu, berat jenis kayu dan diameter paku yang sama dengan penentuan nilai desain empiris. **Gambar 5** menyajikan hasil penentuan nilai Z teoritis berdasarkan SNI-7973 (2013). Nilai Z terendah diperoleh pada sambungan yang menggunakan kayu sengon pada kedua sisi dengan paku 0.42 cm sebesar 45.88 kgf sedangkan nilai Z tertinggi diperoleh pada sambungan dengan kayu bangkirai di kedua sisinya dengan paku 0.52 cm sebesar 125.16 kgf. Dari **Gambar 5** dan **Gambar 6** dapat diketahui bahwa nilai desain rujukan teoritis SNI-7973 (2013) berbanding lurus dengan berat jenis kayu, dan diameter paku. Semakin tinggi berat jenis kayu dan semakin besar diameter paku yang digunakan akan menghasilkan nilai desain rujukan yang semakin tinggi berdasarkan SNI-7973 (2013). Fenomena ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Ziannita (2009) yang melaporkan kecenderungan yang sama.

Pada sambungan kayu tunggal, SNI-7973 (2013) menyediakan enam formula perhitungan nilai desain berdasarkan mode kerusakan yang akan terjadi ketika diberikan pembebanan. Dari enam formula perhitungan yang digunakan nilai terendah diperoleh pada mode ke IV pada seluruh sambungan, dimana pada mode ini terjadi kerusakan pada paku dan pada kedua bagian kayu (**Gambar 7**). Penentuan nilai Z berdasarkan SNI-7973 (2013) menggunakan nilai terendah yang diperoleh pada seluruh mode sebagai nilai yang digunakan dalam perencanaan sebagai faktor keamanan.

Mode dengan nilai Z terendah digunakan karena pada mode tersebut diprediksi akan terjadi kerusakan pada sambungan kayu terlebih dahulu dibandingkan dengan mode lainnya.



Gambar 5. Nilai desain rujukan teoritis SNI-7973 (2013)



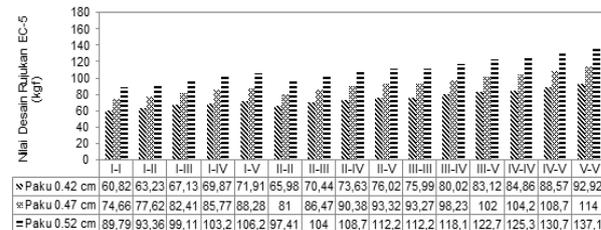
Gambar 6. Nilai desain rujukan teoritis SNI-7973 (2013) berdasarkan diameter paku



Gambar 7. Kerusakan sambungan kayu mode IV

3.2.2 Nilai desain rujukan teoritis berdasarkan Eurocode 5 (EC-5) (2004)

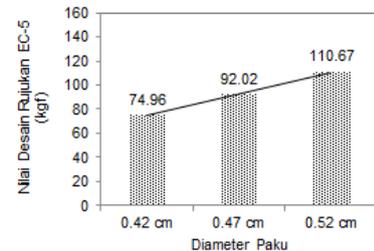
Hasil perhitungan nilai desain teoritis (Z) berdasarkan EC-5 (2004) per masing-masing ukuran paku disajikan pada Gambar 8. Sama seperti nilai Z menurut SNI-7973 (2013), nilai Z EC-5 (2004) terendah diperoleh pada sambungan kayu sengon dengan kayu sengon menggunakan paku 0.42 cm sebesar 60.80 kgf dan nilai tertinggi pada sambungan kayu bangkirai dengan kayu bangkirai menggunakan paku 0.52 cm sebesar 137 kgf.



Gambar 8. Nilai desain rujukan teoritis EC-5 (2004)

Secara umum penentuan nilai Z berdasarkan SNI-7973 (2013) dan EC-5 (2004) menunjukkan kecenderungan

yang sama. Semakin tinggi kombinasi berat jenis sambungan kayu maka semakin besar nilai Z yang dihasilkan. Selain berat jenis kayu, diameter paku juga turut menentukan nilai Z. Gambar 9 menunjukkan nilai Z EC-5 (2004) berdasarkan ukuran paku pada seluruh sambungan. Semakin besar diameter paku nilai Z yang dihasilkan akan semakin tinggi dengan koefisien determinasi mencapai 0.99. Pada penentuan nilai Z berdasarkan EC-5 (2004) nilai terendah diperoleh pada mode F, dengan kerusakan terjadi pada paku dan pada kedua bagian kayu.

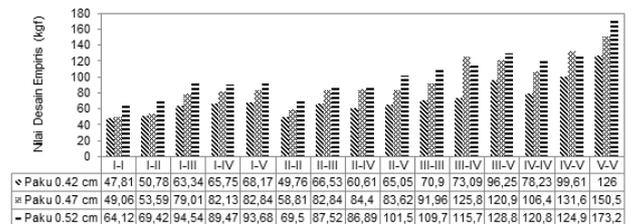


Gambar 9. Nilai desain rujukan teoritis EC-5 (2004) berdasarkan diameter paku

3.2.3 Nilai desain empiris

Nilai desain (Z) empiris sambungan kayu diperoleh dengan cara melakukan pengujian langsung terhadap sambungan kayu yang telah dibuat. Nilai Z empiris diperoleh dengan cara menentukan titik perpotongan dari kurva beban - defleksi terhadap garis garis offset 5% diameter paku (Gambar 10). Dalam Tjondro (2007), metode ini diadopsi dari teori batas leleh yang diperkenalkan Johansen yang dapat diaplikasikan pada berbagai material.

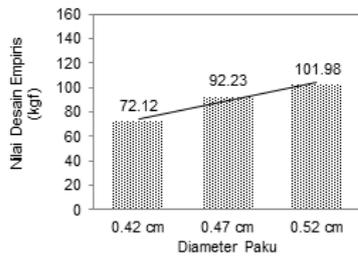
Hasil pengujian nilai desain empiris dapat dilihat pada Gambar 11. Hasil pengujian nilai Z empiris menunjukkan kecenderungan yang sama dengan pengujian nilai desain teoritis berdasarkan SNI-7973 dan EC-5 (2004), semakin tinggi berat jenis kayu yang digunakan semakin tinggi nilai pula yang dihasilkan. Besarnya diameter paku yang digunakan juga mempengaruhi nilai Z empiris yang dihasilkan. Hubungan diameter paku dengan nilai Z empiris disajikan pada Gambar 12.



Gambar 11. Nilai desain empiris

Serupa dengan nilai desain teoritis SNI-7973 (2013) dan EC-5 (2004), metode penentuan nilai desain empiris menunjukkan kecenderungan yang sama dengan koefisien determinasi sebesar 0.97. Semakin besar ukuran diameter paku maka nilai Z empiris yang dihasilkan semakin besar. Pengujian statistik dilakukan untuk melihat pengaruh dari berat jenis dan ukuran alat sambung. Hasil pengujian statistik menunjukkan bahwa interaksi antara kombinasi jenis kayu dan ukuran paku tidak

berpengaruh nyata terhadap hasil nilai desain empiris. Sedangkan untuk faktor kombinasi jenis kayu dan ukuran paku yang menunjukkan pengaruh signifikan terhadap nilai kuat tumpu.



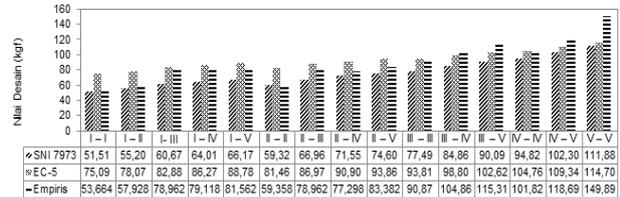
Gambar 12. Nilai desain empiris berdasarkan diameter paku

3.3 Perbandingan nilai desain teoritis dan empiris

Penentuan nilai desain secara teoritis dibuat untuk memudahkan perencana konstruksi kayu dalam mendesain bangunan kayu. Dengan penentuan nilai desain teoritis, peneliti tidak perlu melakukan pengujian destruktif untuk dapat mengetahui kapasitas struktur sambungan kayu. Pada penelitian ini dilakukan perbandingan nilai desain teoritis berdasarkan SNI-7973 (2013) dan EC-5 (2004) dengan nilai desain empiris untuk dapat mengetahui kehandalan formula dan variabel yang digunakan dalam penentuan nilai desain. Perbandingan antara nilai desain teoritis dan empiris disajikan pada Gambar 13.

Seluruh model sambungan kayu yang dihitung berdasarkan SNI-7973 (2013) menghasilkan nilai yang lebih rendah

dibandingkan penentuan nilai desain berdasarkan EC-5 (2004) maupun empiris (Gambar 13). Perbedaan nilai desain yang diperoleh secara teoritis pada SNI-7973 (2013) dan EC-5 mungkin terjadi karena perbedaan faktor keamanan yang ditetapkan pada kedua formula tersebut, hal ini terkait kebijakan masing-masing negara dalam menentukan besaran faktor keamanan.



Gambar 13. Perbandingan nilai desain teoritis dan empiris

Hal lain yang menyebabkan perbedaan nilai desain teoritis antara SNI-7973 (2013) dengan EC-5 (2004) adalah dasar penentuan variabel yang digunakan. Hal ini diungkapkan oleh Almeida dan Dias (2016) yang menyatakan penentuan nilai F_c menurut NDS (2012) yang diacu oleh SNI-7973 (2013) menggunakan batas leleh 5% offset diameter sedangkan EC-5 (2004) menggunakan nilai maksimum, perbedaan ini juga menjelaskan kenapa nilai Z berdasarkan EC-5 (2004) lebih besar pada semua sambungan dibandingkan SNI-7973. Pada dasarnya nilai desain secara teoritis harus selalu lebih rendah daripada nilai desain aktual, hal ini dikarenakan ekspektasi berlebih dalam penentuan kekuatan bahan berbahaya bagi struktur. Ketika struktur diharapkan mampu menopang beban yang lebih besar dari yang sebenarnya dapat ditopang bukan

Tabel 4. Perbandingan nilai desain teoritis dan empiris

No	Sambungan	Nilai Desain Rata - Rata (kgf)			Perbedaan nilai desain (%)	
		SNI-7973	EC-5	Empiris	SNI-7973	EC-5
1	I – I	51.51	75.09	53.66	4.01	-39.92
2	I – II	55.20	78.07	57.92	4.71	-34.78
3	I- III	60.67	82.88	78.96	23.17	-4.96
4	I – IV	64.01	86.27	79.11	19.09	-9.03
5	I – V	66.17	88.78	81.56	18.87	-8.86
6	II – II	59.32	81.46	59.35	0.07	-37.24
7	II – III	66.96	86.97	78.96	15.19	-10.14
8	II – IV	71.55	90.90	77.29	7.44	-17.60
9	II – V	74.60	93.86	83.38	10.53	-12.57
10	III – III	77.49	93.81	90.87	14.72	-3.24
11	III – IV	84.86	98.80	104.85	19.07	5.78
12	III – V	90.09	102.62	115.31	21.87	11.00
13	IV – IV	94.82	104.76	101.81	6.87	-2.89
14	IV – V	102.30	109.34	118.69	13.81	7.87
15	V – V	111.88	114.70	149.89	25.36	23.48
Rata – Rata					13.65	-8.87

Keterangan : nilai (-) menyatakan perbedaan dengan nilai yang lebih besar dari nilai desain empiris.

tidak mungkin struktur akan rusak akibat beban. **Tabel 4** menyajikan selisih nilai desain secara teoritis dan empiris.

Selisih nilai desain pada **Tabel 4** menunjukkan perbedaan nilai desain secara teoritis dengan nilai desain empiris yang dianggap sebagai kapasitas sambungan yang sebenarnya. Perhitungan mengikuti SNI-7973 (2013) menunjukkan terjadinya depresiasi nilai sebesar 13.65%, sedangkan menggunakan EC-5 (2004) terjadi *over-estimate* nilai desain sebesar -8.87%. Walaupun memiliki selisih pendugaan yang lebih besar, SNI-7973 (2013) dapat menjadi prediktor yang lebih baik dalam menentukan nilai desain sambungan dibandingkan EC-5 karena nilai yang diperoleh menggunakan EC-5 (2004) lebih besar daripada nilai desain sebenarnya.

4. Kesimpulan

1. Ukuran alat sambung dan berat jenis kayu yang digunakan berpengaruh nyata terhadap nilai desain sambungan kayu. Semakin besar paku yang digunakan dan semakin tinggi berat jenis kayu yang digunakan menghasilkan nilai desain sambungan yang lebih besar baik secara teoritis ataupun empiris. Nilai desain empiris terendah diperoleh dari sambungan kayu sengon dengan kayu sengon menggunakan paku 0.42 cm dengan nilai 53.66 kg dan nilai desain tertinggi dari sambungan kayu bangkirai dengan kayu bangkirai menggunakan paku 0.52 cm dengan nilai 149.89 kg.
2. Terdapat perbedaan nilai desain sambungan kayu yang diperoleh secara empiris dengan nilai desain sambungan kayu yang diperoleh secara teoritis. Terhadap SNI-7973 (2013) terdapat perbedaan nilai desain sambungan kayu sebesar 13.65% dan EC-5 (2004) sebesar -8.87%.
3. Walaupun penentuan nilai desain sambungan berdasarkan EC-5 (2004) menunjukkan hasil yang lebih mendekati hasil pengujian empiris, penentuan nilai desain berdasarkan EC-5 (2004) dinilai kurang baik dalam menggambarkan kondisi sambungan kayu pada penelitian ini karena cenderung menghasilkan nilai melebihi kapasitas sambungan kayu yang sebenarnya (*over-estimate*).

Daftar Pustaka

- Agussalim, 2010, Desain kekuatan sambungan kayu geser ganda berpelat baja dengan baut pada lima jenis kayu indonesia, *Tesis*, Bogor (ID): Institut Pertanian Bogor.
- Almeida, D.H., and Dias, A.A., 2016, Comparison Between Test Methods To Determine Wood Embedment Strength Parallel To The Grain, *Revista Arvore, Vicosa MG*, 40(4):741-748.
- American Society for Testing and Material [ASTM], 2010, Annual Book of ASTM Standards. Section Four: Construction, Volume 0410, Wood, D-2915-10, *Standard Practise for Evaluating*

Allowable Properties for Grades of Structural Lumber, Philadelphia (PA): ASTM.

- American Wood Council [AWC], 2012, *National Design of Specification for Wood Construction ASD/LRFD 2012*, Washington (US): American Wood Council.
- Awaludin, A., Smittakorn, W., Hirai, T., Hayashikawa, T., 2007, Bearing properties of shorea obtusa beneath a laterally loaded bolt, *J Wood Sci*, 53: 204-210.
- British Standardization International [BS], 1957, *British Standard 373-1957: Methods of Testing Small Clear Specimens of Timber*, Europe : BS.
- European Committee for Standardization [CEN], 2004, *Eurocode 5 (EC-5) : Design of timber Structures : General Common Rules and Rules for Buildings*, Brussels (BE) : CEN.
- Haygreen, J.R., dan Bowyer, J.L., 1996, *Hasil Hutan dan Ilmu Kayu: Suatu Pengantar*, Hadikusumo, S.A., penerjemah, Yogyakarta (ID): Gadjah Mada University Press, Terjemahan dari: *Forest Products and Wood Science: An Introduction*.
- Hassan, R., Ibrahim, A., Ahmad, Z., Yusoff, M., 2013, Dowel-bearing strength properties of two tropical hardwoods, *Proceeding INCIEC 2013*: 27-36.
- Sadiyo, S., 2011, Analisis sesaran batas proporsional dan maksimum sambungan geser ganda batang kayu dengan paku majemuk berpelat sisi baja akibat beban uni-aksial tekan, *Jurnal Teknik Sipil*: Vol. 18 No. 2.
- Sandhaas, C., Ravenshorst, G.J.P., Blass, H.J., Kuilen, J.W.G.V.D., 2013, Embedment tests parallel-to-grain and ductility aspects using various wood species, *Eur. J. Wood Prod.* 71: 599-608. DOI: 10.1007/s00107-013-0718-z.
- Standar Nasional Indonesia [SNI], 2013, *Tata Cara Perencanaan Konstruksi Kayu Indonesia SNI-7973-2013*, Indonesia (ID): Badan Standarisasi Nasional.
- Suhardianto, A., 2013, Sifat fisis dan pengeringan kayu rambutan, nangka dan kecapi serta penggunaan larutan urea dalam pengendalian cacat pengeringannya, *skripsi*, Bogor (ID): Institut Pertanian Bogor.
- Surjokusumo, S., Sadiyo, S., Marzuffli, A., Bismo, A., Setyo, A.Ch., 1980, *Sistim Keteknikan Kayu. Studi Sambungan Gang Nail dan Sambungan Paku*, Bogor (ID): Fakultas Kehutanan, Institut Pertanian Bogor.
- The landersson, S., and Larsen, H.J., 2003, *Timber Engineering*, England (UK): John Wiley & Sons Ltd.

- Tjondro, J.A., 2007, *Perilaku sambungan kayu dengan baut tunggal berpelat sisi baja akibat beban uni-aksial tarik* Disertasi, Bandung (ID): Universitas Katolik Parahyangan.
- Tular, dan Idris., 1981, Sekilas Mengenai Struktur Bangunan Kayu di Indonesia, *Proceeding Lokakarya Standardisasi Kayu Bangunan*, Bogor, Indonesia.
- Ziannita, V., 2009, Nilai desain acuan sambungan *double shear* balok kayu pelat baja empat jenis kayu pada tiga diameter paku menurut berbagai analisis pendekatan, *Skripsi*, Bogor (ID): Institut Pertanian Bogor.
- μ = Rataan umum
- A_i = Pengaruh kombinasi jenis kayu ke-i
- B_j = Pengaruh diameter paku ke-j
- AB_{ij} = Interaksi kombinasi jenis kayu ke-i dan diameter paku ke-j
- E_{ijk} = Pengaruh acak dari kobinasi jenis kayu ke-i, diameter paku ke-j, serta ulangan ke-k

Notasi :

- Z = Nilai desain lateral rujukan per alat sambung per bidang geser (kgf)
- F_{yb} = Kekuatan lentur paku (kgf/cm^2)
- F_{em} = Kekuatan tumpu paku terhadap balok kayu utama (kgf/cm^2)
- F_{es} = Kekuatan tumpu paku terhadap balok kayu sisi (kgf/cm^2)
- D = Diameter alat sambung paku (cm)
- R_e = F_{em}/F_{es}
- R_d = Faktor Pereduksi
- L_m = Penetrasi (panjang) paku dalam balok utama (cm)
- L_s = Penetrasi (panjang) paku dalam balok sisi (cm)
- K_D = 2.2 untuk diameter paku < 0.43 cm dan $10.D+0.5$ untuk diameter paku $0.43-0.63$ cm
- $F_{v,Rk}$ = Kapasitas dukung beban karakteristik per paku per bidang geser (N)
- $M_{y,Rk}$ = Momen leleh paku karakteristik (N/mm)
- t = Tebal batang kayu (mm)
- $F_{h,i,k}$ = Kekuatan benam karakteristik paku kedalam batang kayu, ke i (MPa)
- d = Diameter paku (mm)
- $F_{ax,Rk}$ = Kapasitas cabut paku karakteristik (N)
- L = Penetrasi paku ke dalam kayu (mm)
- β = $\frac{F_{h,2k}}{F_{h,1k}}$
- EL = *Exclusion limit*
- Z = Nilai desain empiris (kgf)
- C_d = Faktor durasi beban normal 10 tahun (1.9)
- C_m = Faktor kadar air (1.2)
- Y_{ijk} = Beban ijin per paku pada diameter pak (faktor A) ke-i, kombinasi jenis kayu (faktor B) ke-j pada ulangan ke-k