

PENGGUNAAN TEORI PUSAT ROTASI SESAAT DALAM MENGHITUNG KAPASITAS SAMBUNGAN MOMEN PADA KONSTRUKSI KAYU

Putu Deskarta¹⁾, I Ketut Sudarsana²⁾

^{1,2}*Program Studi Teknik Sipil Universitas Udayana, Jimbaran, Bali, Indonesia*
Email: pdeskarta@unud.ac.id

ABSTRAK

Telah dilakukan penelitian untuk membandingkan hasil prediksi kekuatan sambungan momen pada konstruksi kayu memakai baut, menggunakan teori pusat sesaat, dengan hasil eksperimen. Untuk itu dilakukan dua jenis pengujian yaitu; pengujian kuat tumpu baut, untuk mencari hubungan antara gaya tumpu terhadap deformasi dari baut, pada berbagai arah gaya, dan pengujian sambungan momen yang menerima beban eksentris. Ada empat jenis kayu yang dipakai pada pengujian kuat tumpu yaitu kayu jenis kamper, merbau, bengkirai dan kempas. Benda uji kuat tumpu terdiri dari sebuah baut yang menempel pada kayu sehingga menyerupai sambungan tampang dua yang menerima beban tekan sentris. Pada pengujian sambungan momen hanya dibuat 1 jenis benda uji dengan tiga pengulangan. Hasil pengujian kuat tumpu mendapatkan kurva hubungan gaya tumpu terhadap deformasi baut yang berbentuk linier pada tahap awal sampai deformasi 1 mm, kemudian nonlinier sampai keruntuhan. Selanjutnya, memakai kurva hubungan gaya dan deformasi pada bagian yang linier tersebut, untuk menghitung kapasitas sambungan menggunakan teori pusat rotasi sesaat, memberikan hasil yang hampir bersesuaian dengan hasil penelitian.

Kata kunci: *kuat tumpu, sambungan momen, pusat rotasi sesaat*

USE OF INSTANT ROTATION CENTER THEORY IN CALCULATING MOMENT CONNECTION CAPACITY IN WOOD CONSTRUCTION

ABSTRACT

A study has been carried out to compare the prediction results of the strength of bolted moment connection in wooden structures, using instantaneous center of rotation theory, with the experimental results. For this reason, two types of tests were carried out, which are; testing of the bolt bearing strength, to find the relationship between the bearing force and the deformation of the bolt, in various directions of force, and testing of moment connections that are subjected to eccentric loads. There are four types of wood used in the bearing strength test, which are; camphor, merbau, bengkirai and kempas. The bearing strength test specimens consists of a bolt that is attached on the wood so that it resembles a two-section connection that receives a compression load. In the moment connection test, only 1 type of specimen was made with three repetitions. The results of the bearing strength test obtained a curve showing the relationship between bearing force to bolt deformation which was linear in the initial stage up to 1 mm deformation, then nonlinear until failure for all wood. Furthermore, using the linear part of the force-deformation curve to calculate the connection capacity using instantaneous center of rotation theory gives results that are almost in accordance with the research results.

Keywords: *bearing strength, moment connection, instantaneous center of rotation*

1. PENDAHULUAN

Sambungan momen pada konstruksi kayu merupakan masalah yang menarik untuk diteliti karena tidak banyak tersedianya panduan untuk merencanakan sambungan tersebut. Pada sambungan yang memikul gaya atau momen yang besar, alat sambung berupa kombinasi pelat baja dan baut paling umum dipergunakan. Walaupun sambungan pemikul momen hampir selalu ada pada konstruksi kayu, Peraturan Konstruksi Kayu Indonesia (PKKI) maupun Standar Nasional Indonesia (SNI 7973-2013) tentang Tata Cara Perencanaan Konstruksi Kayu Indonesia tidak menjelaskan secara explicit tentang cara merencanakan sambungan kayu yang menerima moment atau beban eksentris tersebut. Terdapat beberapa penelitian tentang kapasitas momen dari sambungan kayu diantaranya adalah; Awaludin (2005), yang menggunakan pusat masa dari kelompok baut sebagai pusat rotasi dari baut dalam menghitung gaya tahanan yang diberikan oleh masing-masing baut, berdasarkan pada teori balok pada tumpuan elastis, yang kemudian dipakai untuk menghitung kapasitas momen sambungan. Selain itu Lam, et.al. (2010), yang mendapatkan pengaruh skrup, yang ditempatkan sebagai tulangan transversal, dapat meningkatkan kapasitas momen sambungan sampai 2 kali lipat pada beban monotonik.

Kapasitas sambungan momen menggunakan baut pada konstruksi kayu sepenuhnya berdasar pada perilaku kuat tumpu baut pada kayu. Oleh sebab itu perlu diketahui hubungan antara gaya tumpu dan deformasi (slip) dari sebuah baut pada sambungan kayu, pada berbagai sudut gaya terhadap serat. Untuk mendapatkan formula gaya tumpu sebagai fungsi dari deformasi baut pada kayu diperlukan penelitian hubungan antara gaya tumpu dan deformasi sebuah baut pada kayu pada berbagai arah gaya. Formula ini diperlukan untuk menghitung gaya tumpu pada setiap baut pada sambungan yang mengalami beban eksentris. Dengan diketahuinya gaya pada masing-masing baut tersebut maka kapasitas sambungan dalam menerima beban dapat dihitung dengan teori statika biasa atau teori lainnya. Telah banyak dilakukan penelitian untuk mengetahui hubungan antara gaya tumpu dan deformasi (slip) dari sebuah baut pada sambungan kayu seperti; Humprey et.al. (1989), Wilkinson (1993), Heine dan Dolan (2000). Teori yang paling banyak diacu saat ini untuk menghitung gaya tumpu baut adalah *European Yield Theory* (EYT), yang telah diadopsi oleh berbagai *building code* seperti di negara-negara Eropa, Australia, Canada dan New Zealand (Heine dan Dolan, 2000). EYT memprediksi kuat tekan dan moda kelelahan dari sambungan kayu yang menggunakan baut berdasar pada ketahanan lentur baut dan kekuatan tumpu dari kayu.

Setiap daerah memiliki jenis kayu yang berbeda dari daerah lainnya dan setiap jenis kayu memiliki karakteristik tertentu yang tidak sama dengan jenis kayu lainnya. Walaupun pada jenis kayu yang sama, masih tetap terjadi perbedaan karakteristik akibat kematangan kayu yang berbeda. Sehingga untuk mendapatkan hasil perencanaan sambungan yang akurat, masih tetap diperlukan penelitian perilaku gaya tumpu dan deformasi baut pada kayu yang akan dipakai pada sambungan. Itulah sebabnya peneliti melakukan penelitian perilaku gaya tumpu dan deformasi sebuah baut pada sambungan kayu dengan baut yang menahan beban sentris, agar dapat dipakai sebagai dasar untuk membahas hasil penelitian kapasitas sambungan menerima beban eksentris.

Kayu adalah material yang tidak isotropis, sehingga saat sambungan kayu menerima beban, gaya yang terjadi pada tiap-tiap baut berbeda-beda bergantung pada sudut gaya terhadap arah serat kayu. Gaya tersebut juga bergantung pada deformasi yang terjadi pada baut tersebut. Teori statika, keseimbangan gaya dan momen, umumnya dipakai untuk menghitung kapasitas sambungan kayu dengan baut yang menerima beban momen atau beban eksentris namun perbedaannya terdapat pada asumsi titik pusat rotasi, yang dipakai. Jika kelompok baut menerima momen saja, maka benar memakai titik pusat baut sebagai pusat rotasi. Akan tetapi untuk kelompok baut yang menerima kombinasi gaya geser dan momen, maka kurang tepat memakai titik pusat baut sebagai pusat rotasi. Untuk itu dicoba menggunakan teori pusat rotasi sesaat atau *instantaneous center of rotation* (Smith, 1996), yang biasa dipakai dalam perhitungan sambungan pada konstruksi baja, untuk memprediksi kapasitas sambungan dan membandingkannya dengan hasil penelitian

Berdasarkan uraian yang dipaparkan diatas, maka dapat dirumuskan masalah yang akan diteliti yaitu:

- a. Bagaimanakah hubungan gaya tumpu dengan deformasi sebuah baut pada kayu yang menerima gaya sentris, pada berbagai sudut arah gaya terhadap serat.
- b. Bagaimana teori pusat rotasi sesaat, dapat digunakan untuk menghitung kapasitas sambungan baut pada kayu yang menerima beban eksentris.

2. MATERI

2.1 Kuat Tumpu Baut

Perhitungan kapasitas sambungan kayu menggunakan baut dalam menerima beban eksentris sangat bergantung pada kuat tumpu tiap-tiap baut pada kayu tersebut. Kuat tumpu ini bergantung pada arah gaya dan deformasi dari baut saat menerima beban. Untuk itu diperlukan suatu formula untuk dapat memprediksi gaya tumpu baut pada setiap deformasi dan pada berbagai arah gaya. Formula hubungan antara gaya tumpu baut terhadap deformasi biasanya didapatkan dengan melakukan penelitian pada sambungan kayu dengan baut tunggal yang menerima gaya tumpu. Selain arah gaya, ada beberapa variable lain yang mempengaruhi hubungan antara gaya tumpu baut terhadap deformasi nya, diantaranya adalah: jenis dan kematangan kayu, jarak baut ketepi kayu, mutu dan aspek kelangsingan baut. Banyak studi telah memberikan formula empiris hubungan gaya tumpu dan deformasi ini dengan tujuan untuk dapat memprediksi kekuatan seluruh sambungan seperti, Humphrey et.al. (1989), Wilkinson (1993), Heine dan Dolan (2001). Sebagian besar dari formula yang diberikan mendasarkan pada perilaku keruntuhan yang mengacu pada *European Yield Theory* (YET), yaitu kekuatan tumpu baut dihitung berdasarkan kapasitas lentur dari baut atau kekuatan hancur dari kayu di muka baut, dan diambil nilai yang terkecil dari keduanya.

2.2 Kapasitas Lentur Baut

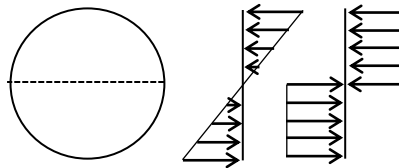
Saat baut mengalami gaya tumpu maka akan terjadi momen lentur pada baut yang besarnya dapat dihitung dari tegangan normal pada penampang baut tersebut, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Momen lentur itu dipengaruhi oleh diameter, mutu, dan kelangsingan baut. Kelangsingan baut, yang merupakan perbandingan antara tebal kayu terhadap diameter baut, sangat mempengaruhi apakah terjadi lentur elastis atau plastis pada baut. Baut dengan kelangsingan kecil memiliki kekakuan lentur yang besar sehingga kayu hancur terlebih dulu saat baut masih dalam kondisi elastis, dimana kapasitas lentur elastis dari baut adalah;

$$M_{el} = \frac{\pi d^3}{32} \sigma_y \quad (1)$$

Akan tetapi untuk baut dengan kelangsingan kecil akan mengalami deformasi yang besar sehingga mencapai kapasitas leleh lentur dari baut sebelum kayu mengalami kehancuran dengan kapasitas leleh lentur dari baut adalah;

$$M_{pl} = \frac{d^3}{6} \sigma_y \quad (2)$$

dengan M_{el} = momen tahanan elastis, M_{pl} = momen tahanan plastis, d = diameter baut, σ_y = tegangan leleh baut.



Gambar 1. Tegangan

2.3 Kuat Tumpu Kayu

Kuat tumpu kayu atau *dowel bearing strength* atau *embedment strength* adalah tegangan hancur kayu saat menumpu sebuah baut yang ditekan ke arah melintang. Nilai ini didapat dari hasil pengujian *dowel test* atau *embedment test* sebuah baut pada kayu, dengan catatan, baut harus dipastikan cukup kaku pada *dowel test*. Hasil dari pengujian *dowel test* atau *embedment test* akan berupa hubungan beban tumpu terhadap deformasi transversal baut. Arah gaya terhadap serat kayu merupakan variabel yang sangat berpengaruh terhadap hasil pengujian. Pada kayu solid, kuat tumpu terbesar adalah pada arah sejajar serat dan akan berkurang saat sudut arah gaya bertambah, dan paling kecil pada arah tegak lurus. Akan tetapi terjadi perbedaan pada kayu *laminated* di mana nilai kuat tumpu meningkat kembali saat arah gaya tegak lurus serat. Hal ini mengacu pada hasil penelitian kuat tumpu dari hasil *embedment test* oleh Smith et.al. (2006) seperti Tabel 1.

Tabel 1. Kuat Tumpu Beberapa Kayu (MPa.)

Sudut (°)	P inus	Spru ce	LVL Pinus	LSL Pinus
0	2	26,3	33,30	50,88
	9,33	8		
30	1	21,8	21,24	45,69
	4,10	2		
60	1	15,9	18,72	43,25
	1,35	2		
90	1	13,6	22,12	47,09
	0,64	6		

Keterangan; LVL = laminated venel lumber dan LSL = laminated strand lumber.

Sayangnya untuk mencapai nilai kuat tumpu tersebut diperlukan deformasi baut yang cukup besar yang bisa menjadi masalah pada konstruksi bangunan. SNI 7973-2013 membatasi deformasi baut maksimum sebesar 0,02 inci atau 0,5mm. Pada kasus sambungan momen, guna mencapai kekuatan maksimum dari kayu tersebut diperlukan rotasi yang besar yang mana hal ini tidak dimungkinkan karena ada batasan pada deformasi. Pada analisis sambungan momen diperlukan hubungan antara gaya tumpu dan deformasi baut pada kayu hasil dowel test atau embedment test. Ada beberapa model yang diusulkan untuk menyatakan hubungan antara gaya tumpu dan deformasi tersebut, diantaranya adalah model eksponensial oleh Heine et.al.(2001), model *logarithmic* oleh Kochkin et.al. (2005) dan model *bilinier* oleh Awalludi et.al. (2007). Model *bilinier* merupakan penyerderhanaan di mana kurva hubungan gaya dan deformasi dibagi menjadi dua garis lurus, yang pertama pada kondisi elastis dan yang kedua pada kondisi plastis. Penggunaan model ini dapat memudahkan aplikasinya pada analisa sambungan momen, selain itu batasan deformasi maksimum baut menyebabkan kondisi sabungan masih dalam keadaan elastis. Ini dapat dilihat dari kurva hubungan beban dengan deformasi baut yang diberikan oleh Smith et.al. 2006, Awalludi et.al. (2007) dan Deudeville e.al. (1999).

SNI 7973-2013 memberikan dua definisi kuat tumpu yaitu kuat tumpu pasak dan tahanan lateral, dimana kuat tumpu pasak adalah tegangan tumpu maksimal dari kayu dan tahanan lateral adalah gaya tumpu maksimal yang diberikan satu baut pada sambungan kayu, yang bergantung pada moda keruntuhan sambungan. Formula untuk menghitung tahanan lateral dapat dilihat pada tabel 11.3.1A, SNI 7973-2013 hal. 85. Formula ini dipakai jika tidak tersedia data kuat tumpu dari hasil embedment atau dowel test. Umumnya test hanya dilakukan pada arah sejajar dan tegak lurus serat untuk mendapatkan kuat tumpu pada kedua arah tersebut. Kemudian untuk mendapatkan kuat tumpu pada berbagai arah gaya digunakan rumus Hankinson seperti yang diadopsi oleh SNI 7973-2013 yaitu;

$$F_{e\theta} = \frac{F_{e//}F_{e\perp}}{F_{e//}\sin^2\theta + F_{e\perp}\cos^2\theta} \quad (3)$$

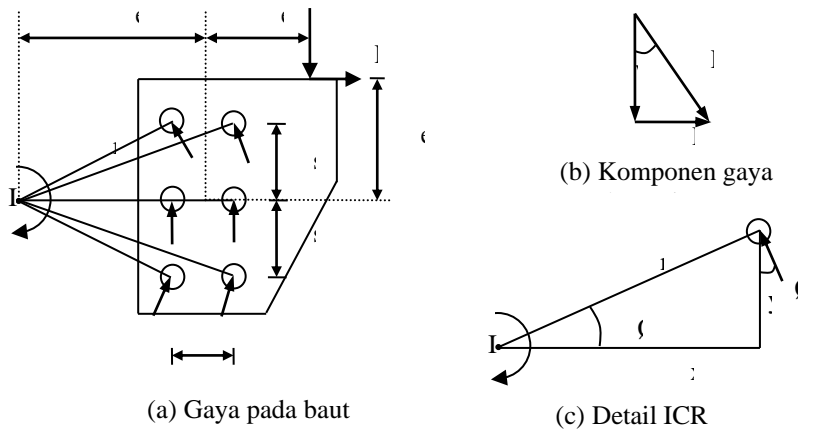
dengan: $F_{e\theta}$ = kuat tumpu pasak pada sudut θ , $F_{e\perp}$ = kuat tumpu pasak arah tegak lurus serat,

$F_{e//}$ = kuat tumpu pasak arah sejajar serat, θ = sudut antara garis gaya dengan arah serat

2.4 Teori Pusat Rotasi Sesaat (*Instantaneous Center of Rotation, ICR*)

Teori ICR merupakan salah satu cara untuk mencari kekuatan sambungan yang menerima beban eksentris yang diambil dari AISC-LRFD (Smith,1996) . Teori ini berdasarkan asumsi bahwa pada saat keruntuhan terdapat suatu titik pusat rotasi sesaat dari kelompok baut yang memberikan persamaan keseimbangan gaya dan momen. Titik ini dinamakan titik pusat rotasi sesaat atau *Instantaneous Center of Rotation*, yang posisinya dicari dengan cara mencoba-coba sehingga dicapai keseimbangan gaya dalam dan gaya luar pada sambungan. Teori ini merupakan persamaan statika biasa yang dapat digunakan untuk bahan konstruksi apapun sepanjang diketahui hubungan antara gaya dan deformasi dari bahan tersebut.

Gambar 2 adalah kelompok baut pada sambungan yang menerima beban eksentris dan baut ke i memberi gaya perlawanan R_i yang berarah tegak lurus garis yang menghubungkan titik pusat baut ke titik pusat rotasi.



Gambar 2 Teori ICR untuk gaya eksentris pada sambungan baut

Persamaan keseimbangan yang harus dipenuhi oleh sambungan:

$$\frac{\sum R_i x_i}{r_i} = V_u \tag{4}$$

$$\frac{\sum R_i y_i}{r_i} = H_u \tag{5}$$

$$(e_{ox} + e_x)V_u + e_y H_u = \sum R_i r_i \tag{6}$$

Perhitungan sambungan dilakukan dengan cara mencoba-coba letak titik ICR agar ketiga persamaan diatas terpenuhi. Jika $H_u = 0$ maka posisi titik ICR tepat saat V_u yang didapat dari persamaan 4 sama dengan yang dari persamaan 6. Penggunaan teori ICR ini memerlukan hubungan antara gaya dan deformasi baut yang mengalami tumpu yang secara tepatnya berbentuk fungsi eksponensial yang parameternya sulit ditentukan. Akan tetapi pada tahap deformasi yang masih kecil hubungan tersebut mendekati elastis linier, sehingga dengan asumsi hubungan gaya dan deformasi baut elastis linier, maka gaya baut ke i adalah:

$$R_i = k_{\theta i} * \delta_i \tag{7}$$

Dengan $k_{\theta i}$ dihitung memakai rumus Hankinson sebagai berikut

$$k_{i\theta} = \frac{k_{i\parallel} k_{i\perp}}{k_{i\parallel} \sin^2 \theta + k_{i\perp} \cos^2 \theta} \tag{8}$$

$$\delta_i = \frac{r_i}{r_{maks}} \times \Delta_{max} \tag{9}$$

dengan: $k_{i\theta}$ = kekakuan tumpu pada sudut θ , $k_{i\perp}$ = kekakuan tumpu arah tegak lurus serat,
 δ_i = deformasi baut ke- i , $k_{i\parallel}$ = kekakuan tumpu arah sejajar serat,
 r_i = jari-jari baut ke- i terhadap pusat rotasi (ICR),
 r_{maks} = jari-jari baut terbesar terhadap pusat rotasi,
 Δ_{max} = 0,02 inch (max deformasi untuk tiap-tiap baut)

Data kuat tekan acuan, yang terdapat pada SNI 7973 tabel 4.2.1 adalah tegangan yang diambil pada deformasi 0,04 inch. Jika ingin menghitung gaya lateral baut memakai kuat tekan acuan maka nilai yang dipakai adalah tegangan pada limit deformasi 0,02 inch. SNI 7973-2013 menyarankan nilainya adalah 73 % dari tegangan pada limit deformasi 0,04 inch atau:

$$F_{c(0,02)} = 0,73 * F_c \tag{10}$$

Sehingga gaya tahanan lateral baut dengan moda keruntuhan I_m adalah:

$$R_{i max} = \frac{d l_m F_{c(0,02)}}{R_d} \tag{11}$$

Dengan: d = diameter baut, l_m = tebal kayu, F_c = kuat tekan acuan,
 R_d = factor reduksi (SNI 7973-2013 tabel 11.3.1B).

3. METODE

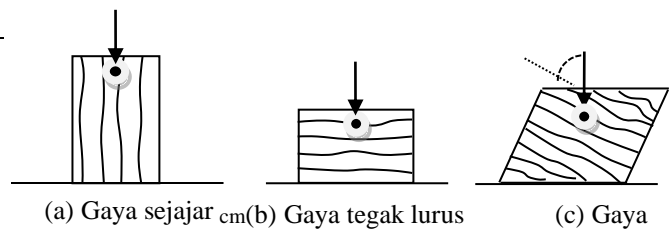
Penelitian ini menggunakan baut mutu biasa diameter 13 mm, dan jenis kayu yang dipakai adalah kayu Kamper, Merbau, Kempas, dan Bengkirai. Pengujian terdiri dari dua jenis yaitu pengujian kuat tumpu kayu dan pengujian sambungan momen. Pengujian kuat tumpu kayu dilakukan dengan dowel test, ditujukan untuk mendapatkan fungsi gaya tumpu terhadap deformasi baut dan pengujian sambungan momen ditujukan untuk memeriksa kesesuaian antara hasil prediksi dengan hasil penelitian pada sambungan yang menerima beban eksentris.

3.1 Pengujian Kuat Tumpu Kayu

Pengujian kuat tumpu kayu terhadap baut dilakukan dengan memberikan beban tekan pada sambungan tumpang dua baut-kayu yang dibuat dengan menjepit kayu pada baja chanal yang disatukan dengan baut. Selanjutnya baja chanal diberi beban tekan sehingga baut yang menghubungkan baja chanal menekan kayu sebagai gaya tumpu dan membentuk beban tekan seperti pada Gambar 3. Arah gaya terhadap serat dibuat bervariasi untuk mengetahui pengaruh sudut gaya terhadap kuat tumpu kayu. Pada kayu Bengkirai, lima variasi sudut yaitu 0° , 30° , 45° , 60° , dan 90° , sedangkan pada kayu Kamper, Merbau dan Kempas hanya dibuat dua variasi sudut yaitu 0° dan 90° . Rincian benda uji *dowel* ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Rincian Benda Uji Dowel

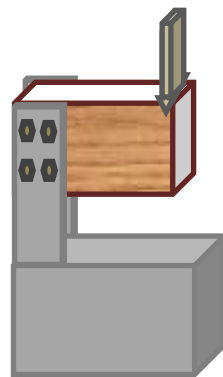
Jenis Kayu	Sudut t ($^\circ$)	Jumlah
Kamper	0	3 buah
	90	3 buah
Merbau	0	3 buah
	90	3 buah
Kempas	0	3 buah
	90	3 buah
	0	3 buah
Bengkirai	30	3 buah
	45	3 buah
	60	3 buah
	90	3 buah



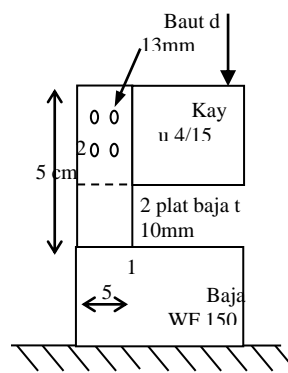
Gambar 3 Pengujian

3.2 Pengujian Sambungan Momen

Pengujian sambungan momen dilakukan dengan memberikan beban eksentris pada benda uji. Benda uji terdiri dari sebuah balok kayu yang ditempatkan diantara dua buah pelat baja tebal 10 mm ukuran 15x25 cm yang dilaskan ke dukungan berupa propil baja I sehingga membentuk kantilever seperti pada Gambar 4. Kayu disatukan dengan plat baja menggunakan 4 buah baut diameter 13mm. Beban diberikan pada jarak 400 mm terhadap titik pusat kelompok baut. Kayu yang dipakai hanya jenis bengkirai saja dan dibuat 3 buah benda uji yang sama. Skema pengujian dapat dilihat pada Gambar 5



Gambar 4. Sambungan momen

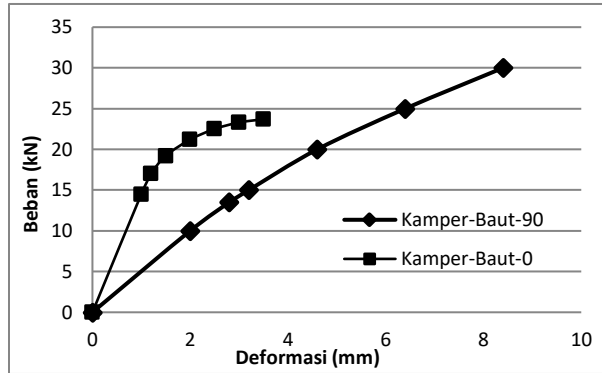


Gambar 5. Schema Pengujian

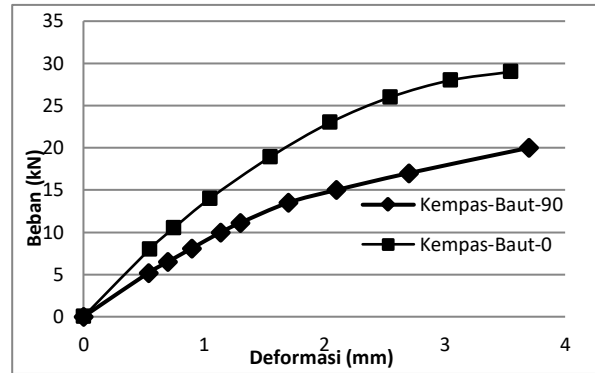
4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengujian Kuat Tumpu Kayu

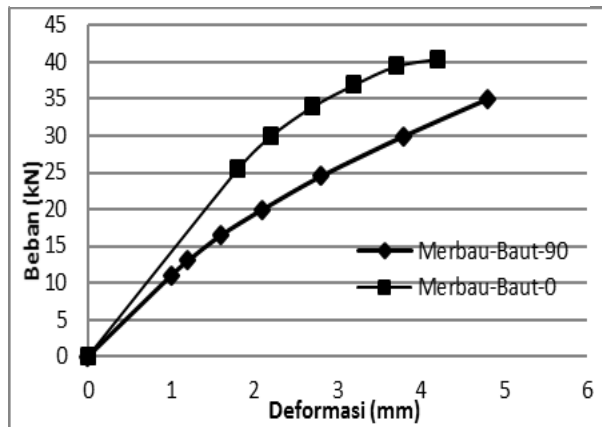
Pengujian kuat tumpu kayu memberikan hasil pengujian berupa data kurva beban terhadap deformasi dicatat langsung oleh computer yang terintegrasi dengan alat uji. Kurva beban terhadap deformasi dalam bentuk grafik yang ditampilkan pada Gambar 6 sampai dengan Gambar 9.



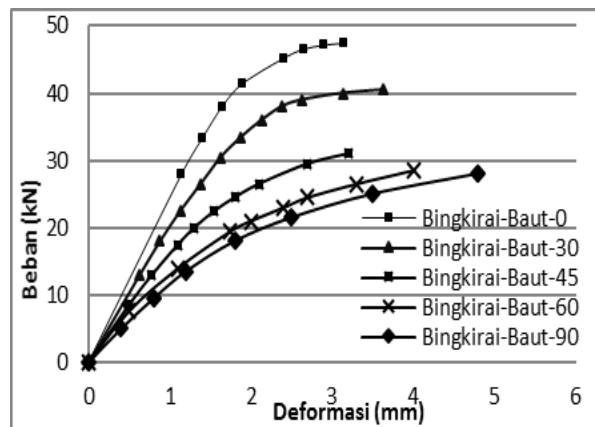
Gambar 6. Beban-Deformasi Kamper-Baut



Gambar 7. Beban-Deformasi Kempas-Baut



Gambar 8. Beban-Deformasi Merbau-Baut



Gambar 9. Beban-Deformasi Bingkirai-Baut

Kurva hubungan antara beban dan deformasi, menunjukkan pola yang sama untuk semua benda uji. Pada awal pembebanan, kurva beban-deformasi meningkat secara linier, kemudian dengan bertambahnya deformasi, peningkatan beban semakin berkurang atau kurva beban-deformasi meningkat secara non linier sampai terjadi deformasi yang sangat besar. Kurva elastis terjadi sampai deformasi 1mm sampai dengan 2 mm, dan setelah itu beban masih terus meningkat 2 sampai 3 kalinya, sebelum runtuh, namun dengan deformasi yang sangat besar hingga mencapai 4mm – 8mm. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kayu kamper dan merbau bersifat lebih *ductile* karena tidak pecah sampai beban maksimum, berbeda dengan kayu bengkirai dan kempas yang mengalami pecah saat beban maksimum. Dari kurva tersebut kemudian dihitung kekakuan tumpunya (k) pada setiap titik yang kesimpulannya ditampilkan pada Tabel 3, dengan k_e adalah kekakuan pada kondisi elastis yaitu gradien pada kurva awal bagian linier.

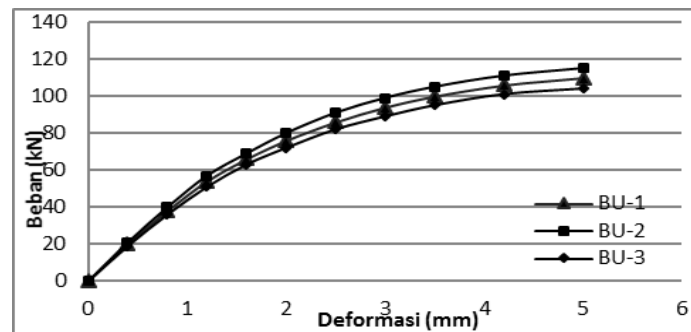
Tabel 3. Tegangan dan Kekakuan Tumpu Kayu

Jenis Kayu	Tegangan Maks.		Tegangan Acuan		Kekakuan Tumpu Elastis	
	$F_{u//}$ (Mpa)	$F_{u\perp}$ (Mpa)	$F_{e//}$ (Mpa)	$F_{e\perp}$ (Mpa)	$k_{e//}$ (kN/mm)	$k_{e\perp}$ (kN/mm)
Kamper	45.6	57.7	13.9	4.8	13.9	4.8
Merbau	77.9	67.3	13.6	10.6	13.6	10.6
Kempas	55.8	38.5	14.0	9.3	14.0	9.3
Bengkirai	91.2	53.9	23.4	12.5	23.4	12.5

Peraturan SNI 7973 yang mensyaratkan kuat tekan acuan diambil pada kuat tekan saat deformasi maksimal sebesar 0,5 mm, sehingga masih dalam kondisi elastis. Dengan persyaratan tersebut, kuat tekan acuan kayu hanya sekitar 20% - 30% dari tegangan maksimumnya. Kesimpulan dari tegangan maksimum dan kuat tekan acuan serta nilai kekakuan tumpu pada kondisi elastisnya ditabelkan pada Tabel 3. Untuk kayu kamper, merbau dan kempas hanya dilakukan pengujian arah gaya sejajar dan tegak lurus serat yang hasilnya seperti pada Tabel 3. Untuk kayu bengkirai dilakukan pengujian pada beberapa sudut gaya terhadap arah serat dan hasilnya ditampilkan pada Tabel 4 bersama dengan nilai kekakuan elastis pada sudut tersebut. Dari tabel tersebut terlihat bahwa dengan bertambahnya sudut gaya, tegangan ultimit (F_{ue}) makin mengecil, sehingga tegangan acuannya juga makin mengecil. Tegangan ultimit, tegangan acuan dan kekakuan tumpu pada beberapa sudut arah gaya dari kayu bengkirai ditampilkan pada Tabel 4, bersama dengan hasil prediksinya pada sudut 30°, 45° dan 60° menggunakan Persamaan 3 dan 8. Dari Tabel 4 terlihat bahwa Persamaan 3 dan 8 memberikan hasil yang mendekati hasil eksperimen, sehingga Persamaan 8 selanjutnya akan dipakai untuk menghitung kuat tumpu kayu pada berbagai sudut sesuai dengan deformasinya, yang dipakai pada perhitungan sambungan momen.

Tabel 4. Tegangan dan kekakuan tumpu kayu bengkirai

Sudut	$F_{u\theta}$ (Mpa)	$F_{e\theta}$ (Mpa)		k_{θ} (kN/mm)	
		Exp.	Theo.	Exp.	Theo.
0°	91.2	23.4	23.4	24.3	24.3
30°	77.9	19.8	19.2	20.6	19.5
45°	59.6	16.5	16.3	17.2	16.3
60°	59.6	14.7	14.1	15.3	14.0
90°	53.9	12.5	12.5	12.3	12.3



Gambar 10. Grafik Beban-Deformasi Sambungan

4.2 Pengujian Sambungan Momen

Pengujian sambungan momen dilakukan dengan memberikan beban tekan pada benda uji sambungan seperti Gambar 4 dengan kecepatan 0,01 mm / detik. Beban tekan berada pada jarak 400 mm dari pusat kombinasi baut, sehingga sambungan mengalami beban eksentris. Hasil pengujian berupa data beban tekan dan deformasi langsung dicatat oleh computer yang terintegrasi dengan alat uji dan selanjutnya memberikan hasil dalam bentuk grafik hubungan antara beban terhadap deformasi. Dari grafik tersebut kemudian di ambil data beban dan deformasi pada beberapa titik, yang selanjutnya diplot kembali dalam bentuk grafik seperti pada Gambar 10. Dari grafik hubungan beban terhadap deformasi tersebut terlihat bahwa pada tahap pembebanan awal sampai beban sekitar 30% dari beban maksimum perilaku beban-deformasi masih linier, selanjutnya berperilaku non linier sampai beban mencapai maksimum dan tidak meningkat lagi. Pengujian dihentikan saat batas deformasi sudah terlampaui walaupun benda uji masih belum hancur.

Menggunakan persyaratan batasan deformasi, deformasi yang diijinkan sebesar $L/360$ untuk balok dua tumpuan, maka untuk kantilever akan menjadi $L/720$. Sehingga kapasitas sambungan yang bisa dipakai adalah nilai beban pada deformasi $L/720$. Dengan panjang kantilever $L = 400$ mm maka deformasi ijin nya adalah 0,56 mm. Dengan interpolasi linier data hasil uji rata-rata pada deformasi ijin tersebut memberikan beban sebesar 27,2 kN. Hasil teoritis dengan menggunakan teori pusat rotasi sesaat (Persamaan 4 dan 6) dan memakai batasan deformasi baut maksimum sebesar 0,5 mm, memberikan hasil kapasitas sambungan sebesar 24,6 kN. Nilai ini hampir mendekati, walaupun sedikit lebih kecil dari hasil experiment, yang disebabkan karena penggunaan batasan deformasi maksimum sebesar 0,5 mm. Hasil yang hampir sama akan didapatkan jika menggunakan batasan deformasi baut sebesar 0,55 mm.

5. KESIMPULAN

1. Pengujian kuat tumpu kayu-baut menunjukkan bahwa kuat tumpu acuan kayu dipengaruhi oleh arah serat. Nilai kuat tumpu acuan arah tegak lurus serat berkisar antara 35% sampai 75% dari kuat tumpu acuan sejajarnya. Nilai kuat tumpu acuan hanya sekitar 20% sampai 30% dari kuat tumpu maksimum yang dapat dicapai.
2. Dari grafik hubungan kuat tumpu terhadap deformasi terlihat bahwa kurva berperilaku linier pada tahap awal beban sampai deformasi sekitar 1 mm dan berperilaku non linier pada deformasi setelah 1 mm. Kuat tumpu maksimum didapat setelah deformasi mencapai sekitar 5 mm.
3. Pada kayu bingkirai, nilai kuat tumpu dan kekakuan tumpu kayu pada sudut 30° , 45° dan 60° yang didapat dari hasil penelitian mendekati hasil yang diberikan oleh formula Hankinson, persamaan 3 dan 8.
4. Pemakaian teori pusat sesaat (ICR) untuk memprediksi kapasitas sambungan momen yang menerima beban eksentris, dengan menggunakan hubungan gaya-deformasi baut pada bagian linier, pada deformasi maksimum 0,5 mm, memberikan hasil yang hampir sama, namun sedikit lebih kecil, dari hasil eksperimen.

DAFTAR PUSTAKA

- Awaludin, A. (2005). "Moment Resistance Anlysis on Various Configuration of Multiple Bolt Timber Connection Using Beam on Elastic Foundation Theory and Rigid Plate Assumption", *Media Komunikasi Teknik Sipil Universitas Gajah Mada*, Vol. 13, No. 2, Juni 2005.
- Awaludin, A., Smittakorn, W., Hayashikawa, T. and Hirai, T. (2007). "M- θ Curve of Timber Connection with Various Bolt Arrangements under Monotonic Loading". *Journal of Structural Engineering*, Vol. 53A.
- Badan Standar Nasional Indonesia (2013). *Spesifikasi Disain Untuk Konstruksi Kayu*, SNI 7973-2013. Jakarta
- Deudeville, L., Davenne and Yasumura, L. (1999). "Prediction of Load Carrying Capacity of Bolted Timber Joints". *Wood Science and Technology*, Vol. 33, Springer-Verlag 1999.
- Heine, C. P., and Dolan, J. D. (2001). "A New Model to Predict the Load-Slip Relationship of Bolted Connection in Timber". *Journal of Wood Fiber Science*, Vol. 33, No. 4.
- Humphrey, P.E. and Ostman, L.J. (1988). "Bolted Timber Connections: Part II, Bolted Bending and Associated Wood Deformation". *Wood and Fiber Science*, Vol. 21, No.4, pp. 354-366
- Kochkin, V. G., and Loferski, J. R. (2005). "Modeling the nonlinear moment-rotation relationship of a nail plate connector". *Journal of Wood and Fiber Science*, Vol. 37, No. 3, pp. 514-520.

- LAM, F., Schutel, M., LAO, C.C., dan GU, James, J. (2008). "Moment Resistance of Bolted Timber Connection with Perpendicular to Grain Reinforcement". Proc. 10th WCTE Miyazaki, Japan.
- Smith, I., Asiz, A., and Snow, M. (2006). "Design Method for Connections in Engineering Wood Structures". *Research Report*, Project No. UNB2, Canada.
- Smith, J. C. (1996). "A Bolt Group Subjected to Eccentric Shear". *Structural Steel Design*, 2nd edition, pp. 313-315, John Wiley & Sons, Inc, New York, USA
- Wilkinson, T.L. (1986). "Load distribution among bolts parallel to load". *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 112, No. 4, pp. 835-852.