

**PERILAKU SAMBUNGAN KAYU DENGAN
BAUT TUNGGAL BERPELAT SISI BAJA
AKIBAT BEBAN UNI-AKSIAL TARIK**

**BEHAVIOUR OF SINGLE-BOLTED TIMBER
CONNECTIONS WITH STEEL SIDE PLATES
UNDER UNI-AXIAL TENSION LOADING**

DISERTASI

**Diajukan dalam rangka Ujian Disertasi
untuk memperoleh gelar Doktor dari
Universitas Katolik Parahyangan
Bandung**



JOHANNES ADHIJOSO TJONDRO

NPM: 2001832004

**PROGRAM DOKTOR ILMU TEKNIK SIPIL
PROGRAM PASCASARJANA
UNIVERSITAS KATOLIK PARAHYANGAN
BANDUNG**

2007

**PERILAKU SAMBUNGAN KAYU DENGAN
BAUT TUNGGAL BERPELAT SISI BAJA
AKIBAT BEBAN UNI-AKSIAL TARIK**

BEHAVIOUR OF SINGLE BOLTED TIMBER
CONNECTIONS WITH STEEL SIDE PLATES
UNDER UNI-AXIAL TENSION LOADING

DISERTASI



JOHANNES ADHIJOSO TJONDRO

NPM: 2001832004

PROMOTOR:

Prof. Bambang Suryoatmono, Ph.D.

KO-PROMOTOR:

Iswandi Imran, Ph.D.

**PROGRAM DOKTOR ILMU TEKNIK SIPIL
PROGRAM PASCASARJANA
UNIVERSITAS KATOLIK PARAHYANGAN
BANDUNG**

2007

**PERILAKU SAMBUNGAN KAYU DENGAN
BAUT TUNGGAL BERPELAT SISI BAJA
AKIBAT BEBAN UNI-AKSIAL TARIK**

BEHAVIOUR OF SINGLE-BOLTED TIMBER
CONNECTIONS WITH STEEL SIDE PLATES
UNDER UNI-AXIAL TENSION LOADING

JOHANNES ADHIJOSO TJONDRO
NPM: 2001832004

PERSETUJUAN DISERTASI
Bandung, November 2007

PROMOTOR,

Prof. Bambang Suryoatmono, Ph.D

KO-PROMOTOR,

Iswandi Imran, Ph.D.

PENGUJI,

Prof. H.M. Surjono Surjokusumo, Ph.D.

PENGUJI,

Dr. Naresworo Nugroho

PENGUJI,

Dr. Paulus Karta Wijaya

ABSTRAK

Perilaku sambungan kayu dengan baut sangat kompleks karena sifat ortotropik dan non-linier bahan kayu. Demikian pula dengan interaksi antara kayu dengan baut pada bidang kontak. Disertasi ini memaparkan hasil penelitian tentang sifat mekanik linier/non-linier kayu dan perilaku sambungan kayu dengan baut tunggal dan pelat baja pada kedua sisi yang diperoleh dari uji eksperimental pada tiga jenis kayu Indonesia berdaun lebar, yaitu Akasia, Meranti dan Kruing.

Ruang lingkup penelitian ini meliputi uji eksperimental sambungan papan dan balok kayu dengan baut tunggal dan pelat penyambung baja pada ke dua sisi. Rentang berat jenis kayu yang digunakan adalah 0.40-0.80. Diameter baut yang digunakan 12 mm, 16 mm, 19 mm dan 22 mm dengan rasio kelangsingan 1.5-4.0. Baut diasumsikan kaku dengan mutu BJ-51 ($f_y=410$ MPa). Jarak ujung bervariasi dari 4d, 5d, 6d dan 7d dengan d adalah diameter baut. Pengaruh sudut antara arah tegangan dan sumbu/bidang tangensial pada penampang juga diteliti.

Sifat mekanik bahan kayu berupa kuat tarik, kuat tekan, kuat geser, dan kuat tumpu baut didapat dari hasil uji eksperimental benda uji bebas cacat. Persamaan-persamaan dalam fungsi berat jenis dan sudut antara serat kayu dan arah tegangan dihasilkan melalui analisis regresi majemuk. Sifat mekanik non-linier untuk kuat tekan yang diperlukan pada analisis non-linier juga dipaparkan dalam disertasi ini.

Kurva tegangan-peralihan dari sambungan dengan baut tunggal dan pelat baja pada kedua sisi dipengaruhi oleh banyak faktor, antara lain sifat fisik dan sifat mekanik linier/non-linier kayu dan sifat mekanik baja, dimensi sambungan dan alat penyambung, angka kelangsingan dan jarak ujung. Dari fenomena hasil uji eksperimental 288 buah benda uji, interaksi yang kompleks dari faktor-faktor tersebut disederhanakan dalam bentuk parameter-parameter kekakuan elastis k_1 , batas proporsional $F_{ep//}$, kuat tumpu baut pada 5%-offset diameter $F_{ef//}$ dan rasio bi-linier R_{k2} . Kurva tegangan-peralihan dibentuk oleh tiga buah garis yaitu garis elastis dengan batas $F_{ep//}$, garis lengkung non-linier dengan batas $F_{ef//}$, dan garis linier post-elastis dengan batas keruntuhan berdasarkan daktilitas.

Perilaku sambungan dengan baut tunggal diprediksi dengan menggunakan tiga buah persamaan garis tersebut yang membentuk suatu kurva tegangan-peralihan. Kurva tersebut telah teruji dengan membandingkan kembali dengan kurva hasil uji eksperimental dari benda uji sambungan kayu Akasia, Meranti, Kruing, Durian dan Bangkirai. Batas kinerja sambungan atau batas keruntuhan dinyatakan dengan angka daktilitas μ_{up} . Angka koreksi daktilitas R_d dan rasio daktilitas untuk disain μ_d disarankan karena tingkat daktilitas μ_{up} mempunyai variasi yang cukup besar. Model kurva tegangan-peralihan dalam disertasi ini hasilnya lebih baik dan cocok dengan hasil uji eksperimental jika dibandingkan dengan model-model kurva teoritis Teichmann and Borkmann, Foschi and Bonac dan Bla. Model kurva teoritis yang ada sebelumnya tersebut kurang memadai dalam memprediksi kuat tumpu baut pada 5% offset diameter, selain hal tersebut bentuk kurva lengkung non-linier yang dihasilkan lebih landai. Model kurva teoritis tersebut tidak mempunyai batas peralihan saat terjadi keruntuhan.

Teori-teori tegangan elastis dan fraktur yang sudah ada dapat digunakan untuk memprediksi besarnya gaya untuk tercapainya kuat tarik tegak-lurus serat, kuat tekan leleh/batas, mulai terbentuknya retak akibat fraktur dan mulainya penjalaran retak. Besarnya gaya yang menghasilkan tegangan-tegangan kritis material pada kurva gaya-peralihan akan dapat memberikan gambaran perilaku sambungan yang lebih jelas.

Sambungan kayu dengan baut tunggal berpelat baja pada ke dua sisi juga diuji terhadap beban statik berulang. Hasilnya menunjukkan bahwa sebelum terjadi penjalaran

retak yang merambat dengan cepat, degradasi pada kekakuan elastis, kekuatan dan daktilitas sambungan tidak terjadi.

Model kontak elemen antara kayu dan baut, dan sifat ortotropik kayu dapat dimodelkan dengan metode elemen hingga dengan menggunakan program ADINA v8.3. Program mempunyai keterbatasan karena hanya dapat memprediksi dengan baik tegangan-tegangan dalam batas elastis. Perangkat lunak yang ada tidak dapat memodelkan sifat non-linier dan regangan runtuh batas dengan tepat.

Persamaan-persamaan untuk menghitung sifat-sifat mekanik kayu dalam disertasi ini diharapkan dapat memberikan masukan untuk Peraturan Kayu Indonesia. Sifat mekanik non-linier yang dihasilkan dapat memperjelas perilaku non-linier bahan kayu dan diharapkan dapat mendorong dibuatnya perangkat lunak yang dapat memperhitungkan sifat ortotropik non-linier dan batas regangan runtuh yang berbeda pada masing-masing arah sumbu. Model kurva prediksi tegangan-peralihan yang dihasilkan dapat digunakan untuk analisis yang lebih akurat pada sambungan dengan baut majemuk.

Kata kunci: sifat mekanik linier/non-linier, batas proporsional, kuat tumpu baut, prediksi kurva tegangan-peralihan, daktilitas.

ABSTRACT

It is difficult to predict the behaviour of timber bolted connections because of the orthotropic and non-linear material properties of wood, and also the interaction between wood and bolt in the contact area. This dissertation presents the experimental research results of linear and non-linear mechanical properties of wood and the behaviour of single-bolted timber connections with steel side plates under uni-axial tension loading. Three Indonesian hardwood species have been used, namely *Akasia*, *Meranti* and *Keruing*.

The scope of this research project is an experimental investigation of single-bolted timber connections with steel side plates. The range of wood specific gravity tested was 0.40-0.80. The diameter of bolts were 12 mm, 16 mm, 19 mm and 22 mm with bolt slenderness ratios of 1.5-4.0. Bolt was assumed to be rigid and was made from grade BJ-51 ($f_y=410$ MPa). The variation of the end distance value was $4d$, $5d$, $6d$ and $7d$, where d is the bolt diameter. The influence of the angle between stress direction and tangential axis/plane was also observed.

The mechanical properties of wood such as tensile strength, compression strength, shear strength and embedment strength were investigated from small clear specimens. The equations for such strength were derived using multiple regressions based on the specific gravity and the angle between the stress direction and wood grain. The non-linear mechanical properties for compression strength are also presented in this dissertation.

The stress-displacement curve of single-bolted timber connection with steel side plates was influenced by many factors, e.g. physical and linear/non-linear mechanical properties of wood, mechanical properties of steel, the dimension of timber and plates, bolt slenderness ratio and the end distance. Based on the phenomena observed from 288 specimens in the experimental work, the complexity of the interaction between all factors was simplified in the form of elastic stiffness parameter k_1 , proportional limit $F_{ep//}$, bolt embedment strength at 5%-offset diameter $F_{ef//}$ and bi-linear ratio R_{k2} . The stress-displacement curve consists of the linear-elastic line until $F_{ep//}$, polynomial curve in the non-linear area until $F_{ef//}$, and non-linear post-elastic line with end failure point based on the ductility ratio.

The behaviour of timber bolted connections was predicted with those three line equations in the form of the stress-displacement curve. That predicted curve was compared with the experimental curve of *Akasia*, *Meranti*, *Keruing*, *Durian* and *Bangkirai* specimens. The performance of the connection before failure was limited by ductility ratio μ_{up} . Proposed ductility reduction factor R_d and ductility design ratio μ_d was suggested because of a quite large variation of μ_{up} . The stress-displacement curve model in this dissertation was fairly in agreement with the experimental results. The curve models from Teichmann and Borkmann, Foschi and Bonac and Blaß were not accurate in predicting the stress-displacement curve. The curve has a smaller slope either than the predicted or the experimental curves. The theoretical curves have no failure limit.

The elastic stress and fracture theories may be used to predict the forces when the stress reach the tension strength perpendicular to the grain, compression yield/ultimit strength or when crack tip starts because of fracture, and crack propagation. The forces in the force-displacement curve that caused the critical stresses in the material will give a better understanding about the behaviour of the connection.

The single-bolted timber connections with steel side plates were also tested under loading-unloading tension load. The result shows that there was no influence of such kind of loading on the elastic stiffness or ductility as far as a crack does not propagate rapidly.

The contact area between wood and bolt was modeled by the finite element method using ADINA v8.3. This method is capable of modelling the contact area and an orthotropic material. Unfortunately, the prediction was good only for elastic condition. The software used in this study has a limited capability to model the non-linear orthotropic material such as wood. The plastic strain limit can be set only for one value.

The equations for calculating the mechanical properties of wood can be useful to determine the mechanical properties of wood in the Indonesian Timber Code. The non-linear mechanical properties curve and the plastic strain limit in this dissertation can be useful to predict the non-linear behavior of wood using tools such as finite element analysis. The stress-displacement prediction curve model in this dissertation may also be used to accurately analyze the multiple bolt connections.

Key words: linear/non-linear mechanical properties, proportional limit, bolt embedment strength, stress-displacement prediction curve, ductility.

PRAKATA

Puji dan syukur kepada Tuhan, Allah Yang Maha Kuasa atas kebaikanNya yang telah mengaruniakan berkat dan rahmatNya, sehingga Disertasi ini dapat diselesaikan.

Penelitian dan Disertasi ini disusun untuk memberikan sumbangan bagi dunia Teknik Sipil, khususnya dalam bidang Konstruksi Kayu. Hasil penelitian dalam Disertasi ini diharapkan dapat memberikan kedalaman pengertian mengenai perilaku sambungan kayu dengan baut tunggal dan pelat baja pada kedua sisi, dapat berguna dan menjadi inspirasi bagi penelitian lebih lanjut.

Ungkapan terima kasih sebesar-besarnya diberikan kepada Promotor yang juga Wali Akademik, Prof. Ir. Bambang Suryoatmono, MSc., Ph.D. dan Ko-Promotor, Ir. Iswandi Imran, MAsc., Ph.D. yang telah dengan sabar membimbing, berbagi “ilmu” dan menyediakan waktunya yang berharga untuk berdiskusi selama proses studi, uji eksperimental di Laboratorium dan penyusunan Disertasi ini.

Ungkapan terima kasih sebesar-besarnya diberikan kepada Tim penguji: Prof. Ir. H. M. Surjono Suryokusumo, MSF., Ph.D. sebagai penguji yang juga telah banyak memberikan masukan dalam Seminar Kemajuan Penelitian, baik secara lisan maupun melalui “pinjaman” koleksi buku-bukunya; Dr. Ir. Paulus Karta Wijaya, MSc. Sebagai penguji yang telah memberikan banyak masukan dalam Seminar Kemajuan Penelitian dan diskusi dalam penelitian dan penyusunan Disertasi ini; Dr. Ir. Naresworo Nugroho, MS. yang telah berkenan menjadi penguji dalam sidang tertutup maupun sidang terbuka Disertasi.

Terima kasih sebesar-besarnya diberikan kepada: Ketua dan Pengurus Yayasan Universitas Katolik Parahyangan, Rektor, Dekan Fakultas Teknik dan Ketua Jurusan Teknik Sipil Universitas Katolik Parahyangan atas dukungan dana dan ijin untuk melanjutkan studi S3. Terima kasih kepada Prof. Dr. Johannes Gunawan, S.H., LL.M. dan Rekan-rekan dosen di Fakultas Teknik Jurusan Teknik Sipil yang telah ikut memberikan dorongan moril selama masa studi S3. Terima kasih kepada Rama F. Vermeulen, OSC dan Alm. Rama B. Herman Joedianto, OSC, atas bimbingan rohani sejak mahasiswa S-1 dan inspirasi untuk menjalani profesi sebagai tenaga pengajar.

Terima kasih diberikan kepada: Bapak Cuncun Priatna sebagai teknisi yang telah memberikan kontribusi dalam pembuatan benda-benda uji untuk uji eksperimental dalam penelitian di Laboratorium; Rekan-rekan mahasiswa program doktor, Dr. Hasanudin, Dr.

Wanny, Bambang A.R., Mulyantari, Martinus, Dr. Retno, Nathan, Wirjanto, dan Sr. Susi, terima kasih atas dorongan semangat dan kebersamaannya; Dr. P.J. Moss, Dr. Greg. MacRae, dan Sugeng Wijanto atas diskusi dan kiriman *paper-paper* pendukung; Dr. Tri Basuki atas bantuannya dalam pengadaan peralatan LVDT dan DC-104R; Rekan-rekan di TU Program Pascasarjana dan Fakultas Teknik Universitas Katolik Parahyangan yang telah banyak membantu proses administrasi untuk kelancaran studi.

Secara khusus terima kasih yang tak berhingga dihaturkan kepada Ayahanda Stefanus Sulistiono Tjondro dan Ibunda Theresia Sri Widowati yang telah membimbing dan setia mendoakan ananda sejak kecil; Istri tercinta Angela Yuniarti dan Putri tercinta Teresa Lisa yang tak hentinya mendoakan dan menyemangati selama perjalanan studi dengan penuh pengertian dan kesabaran atas “hilang”nya waktu-waktu bersama untuk berkumpul dalam keluarga.

Semoga Disertasi mengenai “Perilaku Sambungan Kayu dengan Baut Tunggal Berpelat Sisi Baja Akibat Beban Uni-aksial Tarik” ini dapat memberikan sumbangan dan bermanfaat untuk kemajuan ilmu pengetahuan khususnya dalam bidang Konstruksi Kayu.

Bandung, November 2007

Johannes Adhijoso Tjondro

DAFTAR ISI

PENGESAHAN PROMOTOR DAN KO-PROMOTOR	
PENGESAHAN TIM PENGUJI	
ABSTRAK	i
PRAKATA	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR LAMPIRAN	x
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR NOTASI	xvii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	6
1.3 Hipotesa	7
1.4 Tujuan Penelitian	7
1.5 Ruang Lingkup	8
1.6 Metode Penelitian	9
1.7 Keutamaan Penelitian	11
BAB 2 STUDI PUSTAKA	12
2.1 Sifat Fisik dan Mekanik	12
2.2 Kuat Tumpu Baut	13
2.3 Sambungan Kayu dengan Baut Tunggal	14
2.3.1 Rasio Kelangsingan	14
2.3.2 Jarak Ujung	16
2.3.3 Jarak Tepi	18
2.4 Pemodelan Dalam Analisis	18
2.4.1 <i>Pin Loaded Hole</i>	19
2.4.2 <i>Bolt/Hole Clearance</i>	19
2.4.3 Friksi pada Daerah Kontak Baut	20
2.5 Kekuatan dan Mekanisme Keruntuhan Sambungan	21
2.5.1 Batas Proporsional	21
2.5.2 Model Leleh Eropa (<i>European Yield Model</i>)	22
2.5.3 Penelitian Jorissen 1998	26

2.5.4 Penelitian Schmid dan Blass 2002	31
2.5.5 Penelitian Dodson 2003	32
2.6 Model Kurva Tegangan-Peralihan (Jorissen, 1998)	33
2.7 Rangkuman	35
BAB 3	UJI EKSPERIMENTAL SIFAT FISIK DAN MEKANIK
3.1 Peralatan Uji	
3.2 Pengujian Sifat Fisik dan Mekanik	
3.2.1 Berat Jenis dan Kadar Air	
3.2.2 Kuat Tarik Sejajar Serat	
3.2.3 Kuat Tarik Tegak-lurus Serat	
3.2.4 Kuat Tekan Sejajar Serat	
3.2.5 Kuat Tekan Tegak-lurus Serat	
3.2.6 Kuat Geser Sejajar Serat	
3.2.7 Fraktur Ragam I	
3.3 Kuat Tumpu Baut Sejajar Serat	
3.4 Kuat Tarik Lentur Baut	
BAB 4	UJI EKSPERIMENTAL SAMBUNGAN KAYU DENGAN BAUT TUNGGAL
4.1 Persiapan Pengujian	
4.1.1 Alat Benda Uji	
4.1.2 Alat Uji	
4.1.3 Pengukuran dan Perekaman Data	
4.2 Hasil Uji Eksperimental	
4.2.1 Mekanisme dan Ragam Keruntuhan	
4.2.2 Kurva Gaya-Peralihan	
4.3 Parameter-parameter Hasil Uji Eksperimental	
4.3.1 Kekakuan Elastis k_1	
4.3.2 Kurva Daerah <i>Softening</i>	
4.3.3 Kuat Tumpu Baut	
4.3.4 Kekakuan Post-elastis k_2	
4.3.5 Kuat Batas Proporsional	
4.3.6 Daktilitas Maksimum	
4.4 Model Kurva Tegangan – Peralihan	
4.5 Uji Beban Berulang	
BAB 5	ANALISIS TEGANGAN DENGAN METODE ELEMEN HINGGA

5.1 Distribusi Tegangan Tarik Tegak-lurus Serat

5.2 Distribusi Tegangan Geser Sejajar Serat

5.3 Kekakuan Elastis

BAB 6 MODEL PREDIKSI KEGAGALAN SAMBUNGAN KAYU

6.1 Model Kurva Tegangan–Peralihan

6.2 Perbandingan Kurva Prediksi dan Eksperimental

6.2.1 Perbandingan Kurva Kayu Akasia, Meranti dan Kruing

6.2.2 Perbandingan Kurva Kayu Bangkirai dan Durian

6.3 Perbandingan Kurva Prediksi dengan Model Kurva Teoritis

6.3.1 Model Kurva Teichmann-Borkmann

6.3.2 Model Kurva Foschi-Bonac

6.3.2 Model Kurva Bla□

6.4 Analisis Tegangan dan Fraktur Pada Kurva Prediksi

6.4.1 Kuat Tarik Sejajar Serat

6.4.2 Kuat Geser Sejajar Serat

6.4.3 Kuat Tekan Sejajar Serat

6.4.4 Kuat Tarik Tegak-lurus Serat

6.4.5 Kuat Fraktur

6.4.6 Kuat Geser Baut

6.4.7 Kuat Lentur Baut

6.5 Penjalaran Retak

6.6 Daktilitas Disain

6.7 Uji Pembebanan Berulang

BAB 7 KESIMPULAN DAN SARAN

7.1 Kesimpulan

7.2 Saran

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN:

Lampiran-A Identifikasi jenis dan pengeringan kayu

Lampiran-B Peralatan uji

Lampiran-C Grafik beban-peralihan (P-□) hasil uji eksperimental

Lampiran-D Foto pola keruntuhan benda uji sambungan

Lampiran-E Kekakuan elastis k_1

Daftar Isi

Lampiran-F	Rasio bi-linier k_2/k_1 (R_{k2})
Lampiran-G	Kuat tumpu baut F_{cf}
Lampiran-H	Rasio F_{cp}/F_{cf} (R_{pf})
Lampiran-I	Daktilitas-p (μ_{up})
Lampiran-J	Daktilitas-y (μ_{uy})
Lampiran-K	Rasio tegangan geser
Lampiran-L	Energi fraktur
Lampiran-M	Contoh perhitungan prediksi grafik tegangan-peralihan
Lampiran-N	Perhitungan analisis tegangan dan fraktur pada kurva prediksi
Lampiran-O	Rekaman LVDT-1 vs LVDT-2, LVDT-3 dan LVDT-4

DAFTAR GAMBAR

- Gambar 1.1 Sumbu utama berdasarkan arah serat dan lingkaran pertumbuhan.
- Gambar 1.2 Sudut antara sumbu beban dan arah serat pada penampang.
- Gambar 1.3 Hubungan gaya–peralihan dan pola keruntuhan sambungan kayu
- Gambar 1.4 Evaluasi dari pendekatan model (Haller 1998).
- Gambar 1.5 Langkah-langkah penelitian disertasi.
- Gambar 2.1 Hubungan antara kuat tumpu baut sejajar serat dengan rasio kelangsingan (λ) Trayer (1932); Moss (1997).
- Gambar 2.2 Hubungan antara tegangan batas proporsional tegak-lurus serat dengan rasio kelangsingan (λ), a) *species of low strength*, b) *species of high strength*, Trayer (1932); Moss (1997).
- Gambar 2.3 Hubungan antara tegangan tumpu baut dengan λ pada batas proporsional, (air-dry douglas-fir), Doyle dan Scholten (1963); Moss (1997)
- Gambar 2.4 Jarak-jarak baut pada sambungan geser ganda
- Gambar 2.5 Hubungan antara beban maksimum dengan jarak ujung, Yasumura *et al.* (1987); Moss (1997).
- Gambar 2.6 Pengaruh friksi interface pada pembentukan retak. Tanpa friksi (pada gambar kanan) menambah besar gaya belah tegak-lurus serat, Fs. Heine (2001).
- Gambar 2.7 Hubungan beban–peralihan dan 5% *offset yield*
- Gambar 2.8 Ragam keruntuhan *European Yield Model/NDS*, pada sambungan kayu dengan penyambung kayu
- Gambar 2.9 Ragam keruntuhan pada sambungan kayu dengan penyambung pelat baja
- Gambar 2.10 Deformasi baut dan sendi plastis
- Gambar 2.11 Tegangan dan daerah plastis pada ujung retak (*crack tip*), Jorissen 1998
- Gambar 2.12 Distribusi tegangan tegak-lurus serat dengan puncak tegangan, Jorissen 1998.
- Gambar 2.13 Ilustrasi distribusi tegangan pada sambungan
- Gambar 2.14 Tegangan pada bidang kontak, Jorissen 1998
- Gambar 2.15 Distribusi tegangan tegak-lurus serat Jorissen 1998
- Gambar 2.16 Distribusi tegangan tegak-lurus serat
- Gambar 2.17 Model tegangan geser Volkersen, Jorissen 1998

- Gambar 2.18 Distribusi tegangan geser, Jorissen, 1998.
- Gambar 2.19 Dua macam ragam keruntuhan kayu akibat mekanika fraktur, Jorissen 1998.
- Gambar 2.20 Energi fraktur, Jorissen, 1998
- Gambar 2.21 Keruntuhan geser-blok dan belah, Schmid dan Blass (2002).
- Gambar 2.22 Retak di dekat baut, Schmid dan Blass (2002).
- Gambar 2.23 Pemodelan retak pada sambungan di atas pondasi elastis, Schmid dan Blass (2002).
- Gambar 2.24 Kurva tegangan-peralihan, Teichmann dan Borkmann
- Gambar 2.25 Kurva tegangan-peralihan, Foschi dan Bonac
- Gambar 2.26 Kurva tegangan-peralihan, Blass.
- Gambar 3.1 *Universal Testing Machine* Hung Ta dan *Smart Dynamic Strain Recorder* DC-104R
- Gambar 3.2 Benda uji kuat tarik sejajar serat dan LVDT
- Gambar 3.3 Pola keruntuhan benda uji kuat tarik sejajar serat
- Gambar 3.4 Kurva tegangan-regangan benda uji kuat tarik sejajar serat
- Gambar 3.5 Kuat tarik sejajar serat, mc=15%
- Gambar 3.6 Alat dan benda uji kuat tarik tegak-lurus serat.
- Gambar 3.7 Pola keruntuhan benda uji kuat tarik tegak-lurus serat
- Gambar 3.8 Kurva tegangan-peralihan benda uji kuat tarik tegak-lurus serat
- Gambar 3.9 Kuat tarik tegak-lurus serat, mc=15%
- Gambar 3.10 Penggunaan LVDT untuk pengukuran deformasi arah horisontal pada benda uji kuat tekan sejajar serat
- Gambar 3.11 Pola keruntuhan benda uji kuat tekan sejajar serat
- Gambar 3.12 Kurva tegangan-regangan benda uji kuat tekan sejajar serat
- Gambar 3.13 Model kurva non-linier tegangan-regangan tekan sejajar serat
- Gambar 3.14 Rasio *poisson* rata-rata kayu Akasia Mangium
- Gambar 3.15 Rasio *poisson* rata-rata kayu Meranti
- Gambar 3.16 Rasio *poisson* rata-rata kayu Keruing
- Gambar 3.17 Kuat tekan sejajar serat, mc=15%
- Gambar 3.18 Alat dan benda uji kuat tekan tegak-lurus serat
- Gambar 3.19 Kurva tegangan-regangan benda uji kuat tekan tegak-lurus serat
- Gambar 3.20 Model kurva non-linier tegangan-regangan tekan tegak-lurus serat
- Gambar 3.21 Kuat tekan tegak-lurus serat, mc=15%
- Gambar 3.22 Alat dan benda uji kuat geser sejajar serat
- Gambar 3.23 Pola keruntuhan benda uji kuat geser sejajar serat

Gambar 3.24 Kurva tegangan-peralihan benda uji kuat geser sejajar serat

Gambar 3.25 Kuat geser sejajar serat, $mc=15\%$

Gambar 3.26 Skema benda uji untuk fraktur, Ramskill (2002).

Gambar 3.27 Alat dan benda uji fraktur

Gambar 3.28 Keruntuhan benda uji fraktur

Gambar 3.29 Kurva Gaya-Peralihan benda uji fraktur

Gambar 3.30 Energi fraktur, $mc=15\%$

Gambar 3.31 *Fracture toughness*, $mc=15\%$

Gambar 3.32 Skema benda uji untuk tegangan tumpu baut dengan lubang kayu penuh dan lubang kayu setengah, Heine (2001).

Gambar 3.33 Alat dan benda uji kuat tumpu baut dengan lubang setengah pada kayu

Gambar 3.34 Pola keruntuhan benda uji kuat tumpu baut sejajar serat

Gambar 3.35 Kurva tegangan-peralihan benda uji kuat tumpu baut sejajar serat

Gambar 3.36 Perbandingan kuat tumpu baut sejajar serat (uji setengah lubang)

Gambar 3.37 Benda uji dan pengujian lentur baut.

Gambar 3.38 Kurva tegangan lentur – peralihan vertikal pada benda uji baut

Gambar 3.39 Distribusi normal kuat lentur benda uji baut

Gambar 4.1 Skema pengukuran dengan LVDT pada benda uji.

Gambar 4.2 Lokasi LVDT dan benda uji terpasang pada UTM.

Gambar 4.3 Keruntuhan geser saat $F_{cy//}$ dan F_{\square} belum terlampaui.

Gambar 4.4 Keruntuhan geser saat $F_{cy//}$ terlampaui dan $F_{c//}$ serta F_{\square} belum terlampaui

Gambar 4.5 Keruntuhan belah saat $F_{c//}$ dan F_{\square} terlampaui

Gambar 4.6 Keruntuhan belah terjadi saat $F_{c//}$ dan F_{\square} terlampaui

Gambar 4.7 Keruntuhan geser pada saat $F_{c//}$ dan F_{\square} belum terlampaui

Gambar 4.8 Persentase ragam keruntuhan geser dan belah

Gambar 4.9 Koreksi slip dan perpanjangan pelat penyambung

Gambar 4.10 Kurva gaya-peralihan hasil uji eksperimental sambungan papan

Gambar 4.11 Kurva gaya-peralihan hasil uji eksperimental sambungan balok

Gambar 4.12 *Trendline* kurva gaya-peralihan pada benda uji sambungan papan

Gambar 4.13 *Trendline* kurva gaya-peralihan pada benda uji sambungan balok

Gambar 4.14 Hubungan antara kuat tumpu baut sejajar serat dan berat jenis

Gambar 5.1. Model sambungan kayu dengan baut tunggal dengan elemen hingga.

Gambar 5.2 Daerah kontak antara elemen kayu dan baut

Gambar 5.3 Distribusi tegangan tarik tegak-lurus serat, line 1, AK4D16

Gambar 5.4 Distribusi tegangan tarik tegak-lurus serat, line 3, AK4D16

Gambar 5.5 Distribusi tegangan tarik tegak-lurus serat, line 1, AK7D16

Gambar 5.6 Distribusi tegangan tarik tegak-lurus serat, line3, AK7D16

Gambar 5.7 Distribusi tegangan geser sejajar serat, line 1, AK4D16

Gambar 5.8 Distribusi tegangan geser sejajar serat, line 3, AK4D16

Gambar 5.9 Distribusi tegangan geser sejajar serat, line 1, AK7D16

Gambar 5.10 Distribusi tegangan geser sejajar serat, line 3, AK7D16

Gambar 5.11 Kekakuan sambungan k_1 , $e = 4d$

Gambar 5.12 Kekakuan sambungan k_1 , $e = 7d$

Gambar 5.13 Kontur regangan arah sumbu – Y

Gambar 5.14 Kontur regangan arah sumbu – Z

Gambar 5.15 Kontur tegangan geser bidang – YZ

Gambar 5.16 Koefisien friksi vs tegangan Z

Gambar 6.1 Diagram alir perhitungan kurva prediksi tegangan/gaya-peralihan

Gambar 6.2 *Trendline* prediksi grafik tegangan–peralihan PK194D-4.

Gambar 6.3 Prediksi grafik tegangan–peralihan PK194D-4.

Gambar 6.4 Prediksi grafik gaya–peralihan PK194D-4.

Gambar 6.5 Perbandingan kurva prediksi dengan uji eksperimental pada sambungan kayu akasia, meranti dan keruing.

Gambar 6.6 Perbandingan kurva prediksi dengan uji eksperimental pada sambungan kayu durian dan bangkirai.

Gambar 6.7 Perbandingan kurva tegangan-peralihan prediksi Tjondro et.al dengan Teichmann-Borkmann dan Foschi-Bonac.

Gambar 6.8 Perbandingan kurva gaya-peralihan prediksi Tjondro et.al dengan Bla□ .

Gambar 6.9 Distribusi tegangan geser pada berbagai jarak ujung, Jorissen 1998.

Gambar 6.10 Energi fraktur ragam I dan II

Gambar 6.11 P saat kondisi batas material pada kurva gaya-peralihan PA125D-3

Gambar 6.12 P saat kondisi batas material pada kurva gaya-peralihan PA167D-4

Gambar 6.13 P saat kondisi batas material pada kurva gaya-peralihan PM166D-3

Gambar 6.14 P saat kondisi batas material pada kurva gaya-peralihan PK194D-4

Gambar 6.15 P saat kondisi batas material pada kurva gaya-peralihan BA224D-2

Gambar 6.16 P saat kondisi batas material pada kurva gaya-peralihan BM167D-2

Gambar 6.17 P saat kondisi batas material pada kurva gaya-peralihan BK196D-3

Gambar 6.18 P saat kondisi batas material pada kurva gaya-peralihan BK167D-4

Gambar 6.19 Deformasi horisontal pada arah tegak-lurus serat di ujung sambungan

Gambar 6.20 Angka reduksi daktilitas R_d

Gambar 6.21 Kurva gaya-peralihan sambungan papan dengan pembebanan berulang

DAFTAR NOTASI

A	luas penampang	(mm ²)
A _b	luas penampang baut	(mm ²)
B	tebal balok/papan kayu	(mm)
C	konstanta	
COV	<i>Coefficient of variation</i>	
D	diameter lubang	(mm)
E _{e//} , E _{//}	modulus elastisitas sejajar serat	(N/mm ²)
E _{e⊥} , E ₉₀	modulus elastisitas tegak-lurus serat	(N/mm ²)
E _{p//}	modulus plastis sejajar serat	(N/mm ²)
E _{p⊥}	modulus plastis tegak-lurus serat	(N/mm ²)
E _{p⊥□}	modulus plastis tegak-lurus serat dengan sudut □	(N/mm ²)
F	gaya pada satu sisi pelat sambungan (Johansen)	(kN)
F _e	kuat tumpu baut	(N/mm ²)
F _{e//}	kuat tumpu baut sejajar serat	(N/mm ²)
F _{e⊥}	kuat tumpu baut tegak-lurus serat	(N/mm ²)
F _{eα}	kuat tumpu baut bersudut α terhadap serat (Hankinson)	(N/mm ²)
F _{ef//}	kuat tumpu baut sejajar serat dari uji sambungan/lubang penuh	(N/mm ²)
F _{eh//}	kuat tumpu baut sejajar serat dari uji setengah lubang	(N/mm ²)
F _{ep//}	kuat tumpu baut sejajar serat pada batas proporsional	(N/mm ²)
F _{e□}	kuat tumpu baut bersudut □ terhadap serat (Tjondro <i>et al.</i>)	(N/mm ²)
F _{cy//}	kuat tekan leleh sejajar serat	(N/mm ²)
F _{cu//}	kuat tekan batas sejajar serat	(N/mm ²)
F _{cy⊥}	kuat tekan leleh tegak-lurus serat	(N/mm ²)
F _{ep}	kuat tumpu baut pada batas proporsional	(N/mm ²)
F _{v//}	kuat tarik sejajar serat	(N/mm ²)
F _□	kuat tarik tegak-lurus serat	(N/mm ²)
F _{□□}	kuat tarik tegak-lurus serat dengan sudut □	(N/mm ²)
F _{ub}	kuat lentur batas baut	(N/mm ²)
F _{v//}	kuat geser sejajar serat	(N/mm ²)
F _{v□//}	kuat geser sejajar serat dengan sudut □	(N/mm ²)
F _y	Tegangan leleh baja	(N/mm ²)
F _{yb}	kuat lentur leleh baut	(N/mm ²)
G	modulus geser	(N/mm ²)
G _{I_I} , G _{I_c}	energi fraktur ragam I	(N-mm/mm ²)
G _{II_c}	energi fraktur ragam II	(N-mm/mm ²)
G _c	energi fraktur global	(N-mm/mm ²)

H	tinggi penampang balok/papan	(mm)
I	momen inersia	(mm ⁴)
K _I	<i>fracture toughness</i> ragam I	(N-mm ^{-3/2})
L ₁	panjang bidang geser pada model Volkersen	(mm)
M ₁	momen pada baut	(N-mm)
M _y	momen leleh pada baut	(N-mm)
P	gaya, beban	(N, kN)
P _{ef}	gaya tumpu baut pada 5%- <i>offset diameter</i>	(kN)
P _{ep}	gaya tumpu baut pada batas proporsional	(kN)
R _{CU}	rasio tegangan tekan terhadap kuat tekan batas	
R _{CY}	rasio tegangan tekan terhadap kuat tekan leleh	
R _d	angka reduksi daktilitas untuk disain	
R _{fp}	rasio kuat tumpu proporsional terhadap kuat tumpu 5% <i>offset</i>	
R _G	rasio tegangan geser terhadap kuat geser	
R _{k2}	rasio kekakuan k ₂ /k ₁ , rasio bi-linier	
R _{LU}	rasio tegangan lentur terhadap tegangan lentur batas	
R _{LY}	rasio tegangan lentur terhadap tegangan lentur leleh	
R _T	rasio tegangan tarik terhadap kuat tarik	
SD	simpangan baku	
SG	berat jenis	
Z	statis momen penampang	(mm ³)
a	panjang kantilever benda uji fraktur	(mm)
b	lebar balok/papan	(mm)
d	diameter baut	(mm)
e	rasio jarak ujung dengan diameter baut: 4, 5, 6, 7.	
e _d	jarak ujung	(mm)
f _b	tegangan lentur baut	(N/mm ²)
f _{y_b}	tegangan lentur leleh baut	(N/mm ²)
f _{ub}	tegangan lentur batas baut	(N/mm ²)
f _{e5%}	tegangan tumpu baut pada 5% <i>offset</i>	(N/mm ²)
f _{ef//}	tegangan tumpu baut pada 5% <i>offset</i> pada uji sambungan	(N/mm ²)
f _{ep//}	tegangan tumpu baut pada batas proporsional	(N/mm ²)
f _{c//}	tegangan tekan sejajar serat	(N/mm ²)
f _{cy//}	tegangan tekan leleh sejajar serat	(N/mm ²)
f _{cu//}	tegangan tekan batas sejajar serat	(N/mm ²)
f _{c□}	tegangan tekan tegak-lurus serat	(N/mm ²)
f _{cy□}	tegangan tekan leleh tegak-lurus serat	(N/mm ²)
f _{t//}	tegangan tarik sejajar serat	(N/mm ²)
f _{t□}	tegangan tarik tegak-lurus serat	(N/mm ²)

$f_{v//}$	tegangan geser sejajar serat	(N/mm ²)
f_{yz}	tegangan geser pada bidang yz	(N/mm ²)
f_{zz}	tegangan tarik arah zz	(N/mm ²)
h	tinggi balok/papan, tinggi kantilever benda uji fraktur	(mm)
k_1	kekakuan elastis sambungan	(N/mm ³)
k_2	kekakuan sambungan setelah tegangan tumpu 5% <i>offset</i>	(N/mm ³)
l_{cr}	panjang retak pada kondisi 2 retakan simetris	(mm)
l_{cr1}	panjang retak ke 1 pada kondisi retak tidak simetris	(mm)
l_{cr2}	panjang retak ke 2 pada kondisi retak tidak simetris	(mm)
mc	kadar air	(%)
n	jumlah benda uji	
d_1, d_2, d_3, d_4	konstanta pada persamaan garis <i>softening</i>	
q_b	beban merata pada baut	(N/mm)
r_{\square}	rasio antara $F_{cy//}/F_{cu//}$	
r_{\square}	rasio antara $\square_{cy//}/\square_{cu//}$	
r_{γ}	rasio antara $E_{p//}/E_{e//}$	
t	tebal benda uji	(mm)
t_p	tebal pelat penyambung	(mm)
x, y, z	sumbu koordinat	
\square	sudut antara sisi panjang (h) penampang dan bidang tangensial	(°)
δ	peralihan	(mm)
\square	regangan	
$\square_{cy//}$	regangan tekan leleh sejajar serat	
$\square_{cy\square}$	regangan tekan leleh tegak-lurus serat	
$\square_{cu//}$	regangan tekan batas sejajar serat	
$\square_{cur//}$	regangan tekan batas rata-rata sejajar serat	
λ	rasio kelangsingan, b/d	
μ	koefisien friksi	
μ_{up}	rasio daktilitas terhadap batas proporsional	
μ_{uy}	rasio daktilitas terhadap batas leleh fiktif	
μ_{dp}	disain rasio daktilitas terhadap batas proporsional	
μ_{dy}	disain rasio daktilitas terhadap batas leleh fiktif	
ν	rasio poisson	
ν_{LR}	rasio poisson arah radial akibat beban arah longitudinal	
ν_{LT}	rasio poisson arah tangensial akibat beban arah longitudinal	
ξ	rasio gaya geser efektif	
π	konstanta, 22/7	
ϕ	sudut friksi	(°)
ρ	kepadatan	(kg/m ³)

σ	tegangan	(N/mm ²)
σ_h, σ_c	tegangan tumpu (<i>embedgment stress</i>)	(N/mm ²)
σ_{90}	tegangan tegak-lurus serat	(N/mm ²)
$\sigma_{t,90}$	tegangan tarik tegak-lurus serat	(N/mm ²)
σ_v	tegangan geser sejajar serat	(N/mm ²)
σ_z	tegangan tarik arah sumbu z	(N/mm ²)
τ	tegangan geser	(N/mm ²)
θ	sudut antara sumbu beban dengan bidang tangensial serat	(radian)

BAB 1

PENDAHULUAN

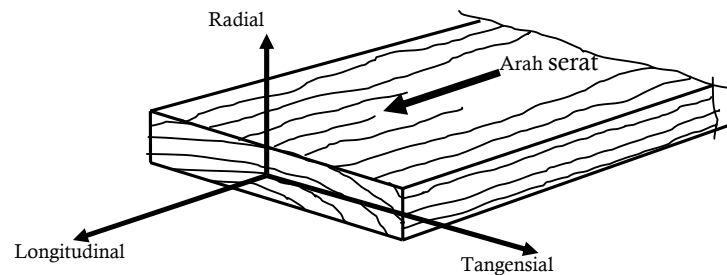
1.1 Latar Belakang

Bangunan dengan struktur yang terbuat dari kayu akan kuat, stabil dan kaku jika memenuhi persyaratan disain yang meliputi antara lain sambungan kayu. Syarat untuk mendisain sambungan kayu yang baik dapat dilakukan apabila perilaku sambungan kayu tersebut telah diketahui dengan jelas dan akurat.

Sambungan kayu yang umum dipakai adalah dengan menggunakan alat pengencang dari paku, sekrup atau baut, di samping penggunaan berbagai macam alat penyambung lainnya. Penggunaan sambungan baut pada struktur kayu dalam pelaksanaannya cukup mudah dan praktis. Sambungan dengan baut secara fisik cukup sederhana, tetapi perilaku yang sebenarnya dari interaksi baut dan kayu adalah sangat rumit. Kegagalan struktur bangunan kayu dalam kenyataannya sekitar 80% bersumber dari kegagalan pada sambungan (Patton-Mallory *et al.*,1997a). Mekanisme keruntuhan pada sambungan kayu dengan baut terutama bergantung pada sifat fisik dan mekanik material kayu, dimensi penampang, mutu baut baja, kelangsingan baut, geometri letak lubang dan arah beban.

Sampai saat ini walaupun cara-cara dalam mendisain sambungan dengan baut sudah dipakai sejak awal tahun 1900-an, penelitian tentang sambungan dengan baut masih terus berlangsung. Penelitian-penelitian terus dilakukan agar dapat lebih mengerti tentang perilaku sambungan kayu dengan lebih jelas untuk dapat memrediksi kekuatan dan kinerjanya dengan lebih akurat. Kendalanya kayu mempunyai banyak variasi jenis dan faktor-faktor yang menentukan kekuatannya. Kekuatan kayu dipengaruhi oleh kondisi alam seperti iklim dan cuaca sejak pertumbuhannya, demikian pula cara-cara pemrosesan menjadi kayu bahan bangunan dari mulai penebangan, penyimpanan sampai dengan penggergajian. Kondisi lingkungan di mana struktur bangunan kayu berada seperti misalnya faktor kelembaban dan keterbukaan terhadap sinar matahari atau hujan juga akan berpengaruh terhadap kekuatan maupun keawetan kayu. Karenanya peraturan-peraturan dan penelitian-penelitian yang telah dilakukan di luar negeri dengan kondisi alam dan iklim yang berbeda pada jenis kayu non-Indonesia belum tentu dapat diterapkan begitu saja untuk jenis kayu Indonesia.

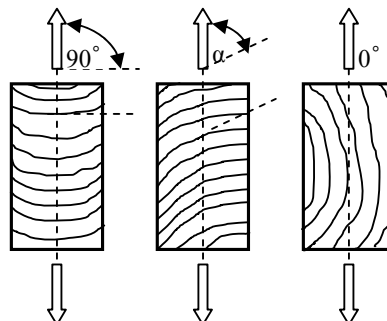
Kayu adalah material alam yang terbentuk dari elemen dasar sel tabung. Sesuai pertumbuhannya dalam kondisi alam, sel-sel tabung tersebut membentuk sifat dasar kekuatan kayu. Sel-sel terutama terbuat dari selulosa, lignin dan hemiculosa. Selulosa memberikan kekuatan dan lignin berfungsi sebagai perekat dan memperkuat serat selulosa tersebut. Sifat material kayu adalah anisotropik yaitu berbeda pada masing-masing arah, dan dalam kondisi tertentu dapat diasumsikan bersifat ortotropik dengan tiga buah sumbu utama seperti pada Gambar 1.1.



Gambar 1.1 Sumbu utama berdasarkan arah serat dan lingkaran pertumbuhan.

Kuat tarik kayu dalam arah sejajar serat adalah yang terbesar, sedangkan yang terlemah adalah kuat tarik tegak-lurus serat. Kuat tekan kayu dalam arah tegak-lurus serat lebih lemah dibandingkan dengan kuat tekan sejajar serat. Kuat geser sejajar serat kayu bergantung pada kekuatan lignin yang menyatukan sel-sel tabung. Kuat tarik kayu dalam arah sejajar serat dapat mencapai sekitar 50 kali kuat tarik arah tegak-lurus serat (Ramskill 2002). Pada sambungan kayu dengan baut, lemahnya kuat tarik tegak-lurus serat merupakan hal kritis yang dapat memicu retak awal, penjarangan retak dan pada akhirnya berlanjut pada keruntuhan.

Sudut antara arah serat kayu dan sumbu beban juga akan berpengaruh pada kekuatan komponen struktur kayu. Sebagai contoh seperti pada Gambar 1.2 tampak sudut antara sumbu beban dan arah serat lingkaran pertumbuhan tahunan; hal ini dapat berpengaruh misalnya pada kuat tarik tegak-lurus dan kuat tekan tegak-lurus serat.



Gambar 1.2 Sudut antara sumbu beban dan arah serat pada penampang.

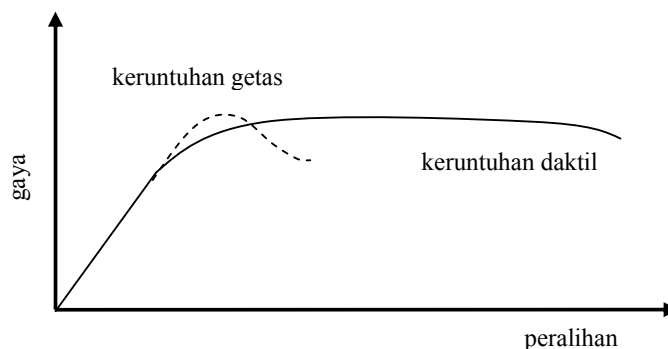
Berbeda dengan material kayu, material baja mempunyai sifat isotropik dengan kuat tarik leleh dan kuat tekan leleh yang sama besar. Baja juga mempunyai faktor *overstrength*. Baut baja karena kepraktisannya banyak digunakan untuk sambungan batang tarik pada struktur ringan ataupun berat yang terbuat dari kayu utuh maupun kayu lamina. Sambungan tersebut meneruskan gaya aksial lewat mekanisme geser tunggal antara dua balok kayu, atau mekanisme geser ganda antara tiga balok kayu atau balok kayu dengan dua pelat sisi penyambung dari baja. Kekuatan sambungan antara lain ditentukan oleh interaksi antara kuat tumpu baut terhadap kayu dan kuat lentur baut.

Perbedaan kekuatan kayu dalam arah sumbu-sumbu utama karena sifat anisotropik menyebabkan kekuatan sambungan dan kekuatan tumpu baut akan bergantung juga pada sudut antara sumbu beban dengan arah serat. Selain hal tersebut di atas, parameter-parameter lain yang mempengaruhi kekuatan sambungan dengan baut tunggal antara lain berat jenis (*specific gravity*), kadar air, dimensi balok, toleransi lubang baut, jarak baut terhadap ujung dan tepi balok kayu, jumlah bidang geser, diameter baut, mutu baut baja dan rasio kelangsingan baut (rasio kelangsingan baut = panjang baut pada batang utama dibagi dengan diameter baut). Pada sambungan dengan rasio kelangsingan baut yang kecil, baut relatif kaku dan kekuatan penuh tumpu kayu dapat tercapai. Pada rasio kelangsingan baut yang besar, kapasitas kuat lentur baut terjadi sebelum kuat tumpu kayu penuh tercapai, sehingga kapasitas kekuatan sambungan akan berkurang. Faktor-faktor lain yang dapat mempengaruhi kekuatan sambungan adalah jenis dan riwayat pembebanan, cacat kayu, cuaca dan umur kayu.

Penelitian yang telah dilakukan oleh Sawata (2002), Rodd et.al. (2000), Smart (2002), Cates (2002) dan para peneliti lain, umumnya lebih banyak pada sambungan baut tunggal dengan beban aksial sentris, sejajar arah sumbu memanjang sambungan kayu. Penelitian lebih lanjut tentang kekuatan sambungan kayu dengan baut majemuk oleh Jorissen (1998), Schmid et.al.(2002), Dolan et.al. (2002) dan Dodson (2003), menunjukkan bahwa kekuatan sambungan tidak dapat ditentukan secara sederhana dengan mengalikan jumlah baut dengan kekuatan satu baut tunggal. Kekuatan sambungan dengan baut majemuk selain dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti pada baut tunggal juga dipengaruhi oleh jumlah baut, jarak antar baut, jumlah baris, dan konfigurasi letak baut. Faktor reduksi atau faktor aksi kelompok mulai diperkenalkan untuk menghitung kekuatan baut majemuk pada standar kayu Amerika yaitu NDS 1973 Dodson (2003). Perilaku dan kekuatan sambungan dengan baut tunggal tidak dapat diekstrapolasi untuk memrediksi kekuatan sambungan dengan baut majemuk.

Hasil yang diperoleh para peneliti dari kajian sambungan baut tunggal maupun majemuk telah banyak digunakan dalam berbagai peraturan kayu dalam bentuk persamaan-persamaan untuk mendisain kekuatan sambungan kayu dengan baut terhadap gaya aksial. Penelitian awal yang dilakukan oleh Trayer (1932) menjadi dasar untuk menghitung kekuatan ijin sambungan kayu dengan baut yaitu mulai dari NDS 1944 sampai dengan NDS 1986. Perubahan filosofi yang mendasar dalam mendisain kekuatan sambungan kayu dengan baut terjadi pada tahun 1980-an, dari konsep *Allowable Stress Design* (ASD) menjadi konsep *Load and Resistance Factor Design* (LRFD). Peraturan LRFD sebagian besar merupakan konversi dari Peraturan ASD. Perbedaan yang mendasar pada ASD acuannya adalah batas proporsional sedangkan pada LRFD acuannya adalah batas keruntuhan. Perilaku sambungan yaitu hubungan gaya-peralihan seperti pada Gambar 1.3. perlu diketahui dengan jelas untuk mengetahui kinerja (*performance*) sampai dengan batas keruntuhan. Kekuatan baut serta *detailing*, seperti toleransi lubang, jarak ujung, dan spasi antar baut harus dapat menjamin tercapainya kinerja sesuai pola keruntuhan yang diinginkan.

Keruntuhan yang terjadi pada sambungan dapat disebabkan akibat keruntuhan pada material baut dan /kayu. Keruntuhan pada kayu dapat berupa hancurnya kayu akibat desak atau tekan, keruntuhan geser blok dan keruntuhan belah. Keruntuhan sobek dalam baris atau kelompok dapat juga terjadi pada sambungan dengan baut majemuk.



Gambar 1.3 Hubungan gaya–peralihan dan pola keruntuhan sambungan kayu.

European Yield Model dengan dasar empat macam ragam keruntuhan akibat lelehnya baut dan hancurnya kayu mulai diperkenalkan oleh Johansen, 1949 (lihat sub-bab 2.5.2), dan akhirnya setelah penelitian-penelitian lebih lanjut digunakan pada NDS 1991. Kekurangan-kekurangan yang terdapat pada NDS 1997 disempurnakan pada NDS 2001 dengan tambahan ragam keruntuhan seperti ragam keruntuhan getas akibat penampang tarik bersih, sobek dalam baris (*row tear out*) dan sobek dalam kelompok (*group tear out*).

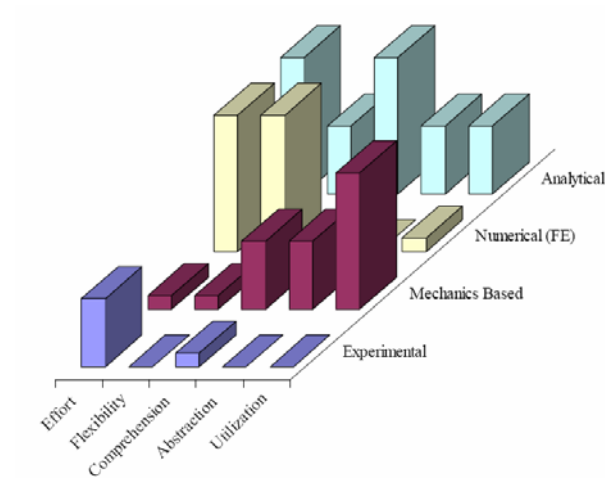
Sedangkan peraturan kayu Indonesia, SNI-xxxx-2002 yang terakhir, masih mengacu pada NDS 1997 di mana belum tercantum tiga tambahan ragam keruntuhan seperti pada NDS 2001.

Pada NDS 2001, dapat digunakan 2 macam cara disain, yang pertama menggunakan rumus-rumus dan yang kedua menggunakan tabel-tabel dari hasil penggunaan rumus-rumus tersebut yang sudah disediakan untuk jenis kayu tertentu. Dalam menentukan kekuatan sambungan kayu yang paling tepat adalah berdasarkan harga minimum dari *bearing*, *net tension*, *row tear-out*, *group tear-out* atau *splitting (tension perpendicular to the grain)*. Khusus untuk keruntuhan belah atau *splitting* belum diperhitungkan pada NDS 2001 (*Appendix-E*), di mana terlihat bahwa dalam rumus-rumus perhitungan kekuatan sambungan, fungsi kuat tarik tegak-lurus serat belum diperhitungkan secara jelas.

Analisis untuk memrediksi perilaku dan kekuatan sambungan baut dengan lebih akurat dengan dasar-dasar mekanika sampai penggunaan program-program berbasis elemen hingga banyak dilakukan dalam penelitian-penelitian. Analisis numerik dengan metode elemen hingga dengan model material kayu anisotropik, elemen kontak dan material non-linier juga mulai banyak digunakan sebagai pembanding dan untuk melengkapi hasil penelitian eksperimental.

Menurut Heine (2001), analisis hasil eksperimental harus melengkapi analisis teoritis. Model teoritis pada awalnya membantu untuk mengerti dan juga membuat studi eksperimental lebih khusus. Heine (2001), menggunakan model hibrida yang meliputi formula gabungan mekanika, analitis dan empiris.

Menurut Haller (1998), analisis teoritis dapat dikategorikan pada pendekatan yang berdasarkan eksperimental, mekanika, numerik dan analitis seperti Gambar 1.4. Analisis teoritis berdasarkan eksperimen umumnya berfokus pada interpolasi dan *curve fitting*, sedangkan analisis teoritis dengan dasar mekanika, umumnya memodelkan struktur menjadi elemen diskrit dengan pegas linier atau non-linier.



Gambar 1.4 Evaluasi dari pendekatan model (Haller 1998).

Analisis teoritis berbasis numerik pada umumnya adalah dengan metode elemen hingga yang lebih fleksibel dan dapat menggantikan kerumitan serta mahal nya uji eksperimental. Model analitis juga memberikan kontribusi untuk mengerti faktor-faktor yang mempengaruhi perilaku sambungan.

1.2 Perumusan Masalah

1. Penelitian tentang korelasi berat jenis (SG) dan sudut antara arah tegangan terhadap sumbu/bidang tangensial penampang kayu (\square) dengan besaran-besaran sifat mekanik material kayu elastis dan non-linier, khususnya jenis kayu daun lebar Indonesia belum banyak dilakukan.
2. Teori-teori dan rumus-rumus perhitungan kekuatan sambungan dengan baut tunggal pada umumnya berdasarkan pada batas proporsional atau daerah elastis. Proses kegagalan, kinerja, daktilitas sambungan dan tingkat keamanan yang pasti belum banyak diobservasi.
3. Kurva gaya-peralihan dapat dikembangkan dengan lebih akurat dengan memperhitungkan variabel-variabel berat jenis (SG), rasio kelangsingan baut (λ), jarak ujung (e_d) dan sudut antara sisi tegak dan arah tangensial serat pada penampang (α).

1.3 Hipotesa

1. Proses kegagalan sambungan akan dimulai dengan hancurnya kayu akibat tegangan tekan sejajar serat mencapai kekuatan batas dan atau akibat kombinasi

fraktur ragam I dan II yaitu kombinasi tegangan tarik tegak-lurus serat dan tegangan geser sejajar serat yang menyebabkan terjadinya awal retak pada bidang kontak dan kurva lengkung non-linier pada kurva tegangan-peralihan. Terjadi penjaralan retak diikuti dengan terjadinya keruntuhan belah atau geser blok.

2. Daerah kurva lengkung non-linier pada kurva tegangan-peralihan dimulai pada saat $F_{ep//}$ (batas proporsional) dan berakhir pada $F_{ef//}$ (5%-offset). Garis kekakuan elastis (k_1) dan garis kekakuan inelastis (k_2) merupakan garis singgung pada kurva lengkung non-linier.
3. Kuat tumpu baut pada 5%-offset diameter ($F_{ef//}$) tidak hanya dipengaruhi oleh berat jenis (SG), tetapi juga oleh besarnya rasio kelangsingan baut (λ).
4. Rasio batas proporsional ($F_{ep//}/F_{ef//}$) sangat dipengaruhi oleh berat jenis (SG), sedangkan besarnya rasio kelangsingan baut (λ) dan jarak ujung (e_d) pengaruhnya kecil.
5. Jarak ujung (e_d) yang besar dan rasio kelangsingan baut (λ) yang kecil akan menghasilkan rasio daktilitas (μ_{up}) yang besar dan kinerja sambungan yang baik.

1.4 Tujuan Penelitian

1. Meneliti korelasi berat jenis (SG) dan sudut antara arah tegangan terhadap sumbu/bidang tangensial penampang kayu (\square) dengan besaran-besaran sifat dasar fisik dan mekanik elastis dan non-linier pada material kayu daun lebar.
2. Meneliti pengaruh berat jenis (SG), jarak ujung (e_d), rasio kelangsingan baut (λ) dan sudut antara sisi tegak dan arah tangensial serat pada penampang (α) pada kekuatan, peralihan, daktilitas dan ragam kegagalan sambungan kayu dengan baut tunggal berpelat baja pada kedua sisi.
3. Meneliti parameter-parameter pada kurva tegangan-peralihan pada sambungan kayu dengan baut tunggal seperti: kekakuan elastis (k_1), kuat tumpu proporsional ($F_{ep//}$), kuat tumpu baut pada 5%-offset ($F_{ef//}$), rasio bi-linier (R_{k2}), dan rasio daktilitas (μ_{up}).
4. Meneliti pengaruh kombinasi tegangan geser sejajar serat dan tegangan tarik tegak-lurus serat akibat gaya uni-aksial tarik sejajar serat pada proses kegagalan sambungan kayu dengan baut tunggal berpelat baja pada kedua sisi.
5. Meneliti perilaku kurva gaya-peralihan pada proses kegagalan sambungan kayu dengan baut tunggal berpelat baja pada kedua sisi. Mulai saat kondisi elastis,

terjadinya desak baut pada kayu, terjadinya kurva lengkung non-linier, terbentuknya retak, penjalaran retak di depan maupun di belakang lubang, sampai terjadinya kegagalan geser blok atau belah pada sambungan kayu.

6. Mengembangkan model yang akurat untuk memrediksi kurva gaya–peralihan serta proses dan ragam kegagalan sambungan kayu dengan baut tunggal berpelat baja pada kedua sisi.

1.5 Ruang Lingkup

Penelitian dilakukan pada sambungan kayu geser ganda baut tunggal dengan penyambung pelat baja pada kedua sisi dengan tebal 6 mm untuk papan dan 9 mm untuk balok. Gaya yang bekerja adalah gaya uni-aksial tarik sejajar serat.

Balok dan papan kayu yang diteliti mempunyai rentang berat jenis antara 0.4-0.8 terdiri dari tiga jenis kayu daun lebar, yaitu Meranti (*Shorea sp.*), Keruing (*Dipterocarpus sp.*) dan Akasia Mangium (*Acacia Mangium*). Baut tunggal yang digunakan adalah baut dengan mutu B_j.55 ($F_y = 410$ MPa). Kayu diasumsikan bersifat ortotropik, serat memanjang lurus dan sejajar dengan sumbu memanjang sambungan. Toleransi sudut antara sumbu serat memanjang dengan sumbu memanjang papan/balok kayu maksimum 5.7° .

Sambungan mempunyai variasi rasio kelangsingan baut $1.5 < \lambda < 4$, dengan asumsi baut adalah kaku dan tegangan tumpu baut merata. Digunakan variasi tebal penampang 28 mm dan 56 mm, tinggi penampang 100-115 mm, sedangkan diameter baut adalah 12 mm, 16 mm, 19 mm dan 22 mm. Jarak ujung yang digunakan adalah 4, 5, 6 dan 7 kali diameter baut.

Pengujian dilakukan pada kadar air (mc) sekitar 12-15%, dengan kelembaban (rh) antara 68.5-73.8% pada suhu antara 25-27°C, sesuai dengan kondisi lokasi pengujian di Laboratorium Teknik Struktur, Fakultas Teknik Universitas Katolik Parahyangan di Bandung, Jawa Barat.

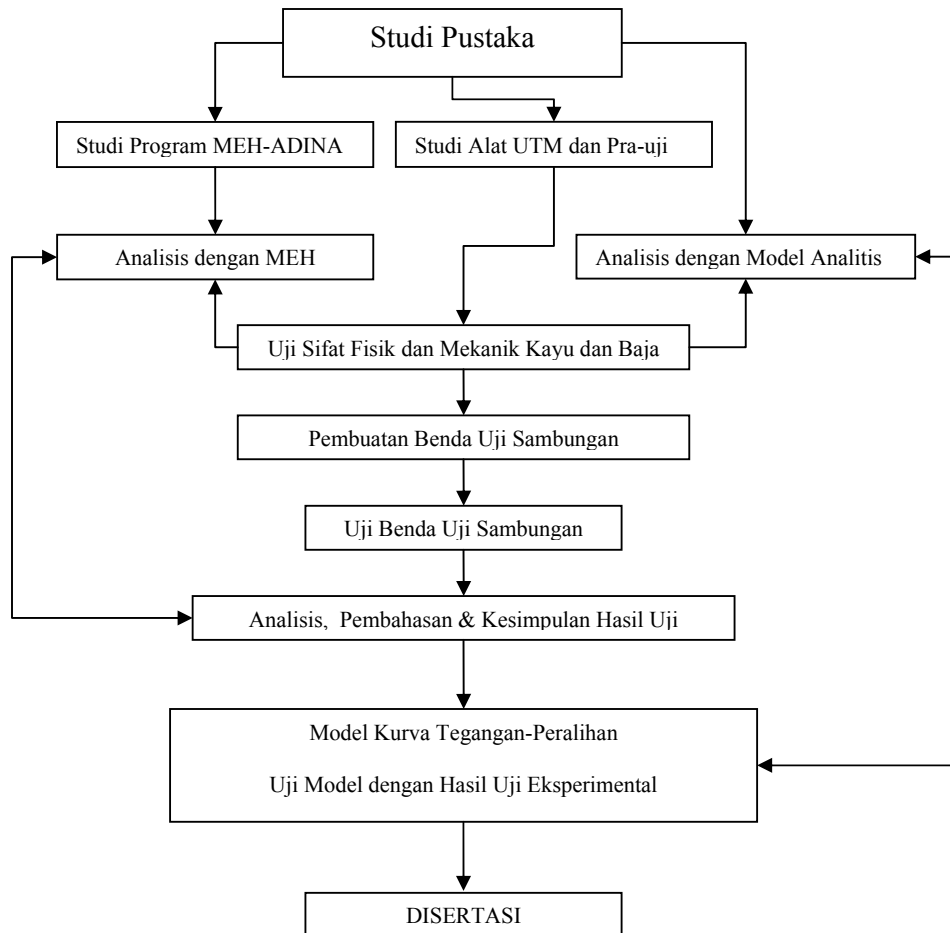
Perangkat lunak yang digunakan untuk analisis regresi adalah MINITAB v.15.1 dan untuk analisis sambungan dengan metode elemen hingga menggunakan ADINA v.8.3.

1.6 Metode Penelitian

Metode penelitian adalah hibrida dengan kombinasi studi pustaka, model analitis dan uji eksperimental. Langkah-langkah yang dilakukan adalah seperti pada Gambar 1.5.

Studi pustaka meliputi penelusuran pada buku-buku baku dan hasil penelitian-penelitian yang dipublikasikan dalam bentuk buku disertasi/tesis, makalah dalam prosiding, jurnal maupun *open source* di internet. Studi dilakukan untuk mengenal lebih dalam sifat material kayu dan teori-teori mengenai kekuatan sambungan dan pendekatan kurva hubungan gaya-peralihan serta faktor-faktor yang mempengaruhi kekuatannya. Hasil penelitian dan teori yang ada digunakan sebagai titik tolak untuk penelitian lebih lanjut.

Tata cara pengujian baku menurut ASTM (*American Society for Testing and Material*) dan yang telah dilakukan oleh para peneliti terdahulu dipelajari. Peralatan testing seperti UTM (*Universal Testing Machine*), pengukuran peralihan dengan menggunakan LVDT (*Linier Variable Differential Transformers*) dan perekaman data dengan *data logger Dynamic Strain Recorder DC-104R* juga dipelajari terlebih dahulu. Peralatan pemegang tambahan (*attachment*) pada UTM dirancang dan dibuat sesuai dengan benda uji dan rencana pengujian. Pra-uji pada benda uji bebas cacat dan sambungan dilakukan agar data yang akan diukur pada benda uji sesungguhnya sesuai dengan yang direncanakan dan memberikan hasil yang akurat.



Gambar 1.5 Langkah-langkah penelitian disertasi.

Analisis kontur tegangan dengan analisis non-linier berbasis metode elemen hingga dilakukan dengan menggunakan program elemen hingga ADINA v8.3 untuk mempelajari perilaku sambungan dan kontak antara baut dengan kayu dengan menggunakan besaran-besaran sifat fisik dan mekanik dari hasil pengujian. Analisis tegangan dan kekuatan sambungan dengan menggunakan teori-teori yang sudah ada juga dilakukan.

Pengujian besaran sifat fisik dan sifat mekanik kayu pada benda uji bebas cacat yang dilakukan pada tiga jenis kayu daun lebar yaitu: Akasia Mangium (*Acacia Mangium*), Meranti (*Shorea sp.*) dan Keruing (*Dipterocarpus sp.*) meliputi: besaran-besaran sifat fisik seperti: berat jenis, modulus elastisitas, modulus plastis, regangan leleh, regangan batas, rasio bi-linier dan rasio *poisson*. Korelasi berat jenis (SG) dan sudut antara arah tegangan terhadap sumbu/bidang tangensial penampang kayu (α) diteliti pengaruhnya terhadap besaran-besaran sifat mekanik kayu seperti: kuat tarik tegak-lurus serat, kuat tarik sejajar serat, kuat tekan tegak-lurus serat, kuat tekan sejajar serat, kuat geser sejajar serat, kuat

tumpu baut, dan energi fraktur ragam I. Pengujian kuat lentur juga dilakukan pada baut baja yang telah digunakan pada uji sambungan kayu dengan baut tunggal.

Analisis statistik dan pembahasan dilakukan, dan dilanjutkan dengan pengembangan model kurva tegangan-peralihan untuk prediksi perilaku sambungan dan diakhiri dengan kesimpulan.

1.7 Keutamaan Penelitian.

1. Hasil penelitian dengan jenis kayu Indonesia dapat memberikan masukan untuk besaran sifat fisik dan mekanik pada SNI Struktur Kayu Indonesia.
2. Sifat non-linier fisik dan mekanik material kayu yang dihasilkan dapat digunakan untuk analisis non-linier.
3. Penelitian melihat kinerja dan proses kegagalan sambungan yang dimulai dari fase desak, awal retak, penjarangan retak dan keruntuhan belah atau geser blok.
4. Mendapatkan model kurva gaya-peralihan, rasio daktilitas dan kinerja dari sambungan baut tunggal dengan variabel-variabel: berat jenis (SG), jarak ujung (e_d), rasio kelangsingan baut (λ) dan sudut antara sisi tegak dan arah tangensial serat pada penampang (α).
5. Memberikan solusi untuk penyederhanaan dari kerumitan analisis di sekitar lubang dengan parameter-parameter kurva gaya-peralihan pada sambungan baut tunggal yang dapat digunakan untuk analisis non-linier sambungan dengan baut majemuk.