

**SAMBUNGAN BALOK-KOLOM EKSTERIOR KAYU
GLULAM AKASIA DENGAN SISTEM PROFIL SIKU
DAN BATANG BAJA**

DISERTASI



Oleh :

**Djoni Simanta
2008832002**

Promotor:

Prof. Bambang Suryoatmono, Ph.D.

Ko-Promotor:

Dr. Johannes Adhijoso Tjondro, ME.

**PROGRAM DOKTOR ILMU TEKNIK SIPIL
PROGRAM PASCASARJANA
UNIVERSITAS KATOLIK PARAHYANGAN
BANDUNG
JULI 2016**

**SAMBUNGAN BALOK-KOLOM EKSTERIOR KAYU
GLULAM AKASIA DENGAN SISTEM PROFIL SIKU DAN
BATANG BAJA**

DISERTASI



Oleh :

**Djoni Simanta
2008832002**

Promotor:

Prof. Bambang Suryoatmono, Ph.D.

Ko-Promotor:

Dr. Johannes Adhijoso Tjondro, ME.

**PROGRAM DOKTOR ILMU TEKNIK SIPIL
PROGRAM PASCASARJANA
UNIVERSITAS KATOLIK PARAHYANGAN
BANDUNG
JULI 2016**

HALAMAN PENGESAHAN

**SAMBUNGAN BALOK-KOLOM EKSTERIOR KAYU GLULAM AKASIA
DENGAN SISTEM PROFIL SIKU DAN BATANG BAJA**



Oleh :

**Djoni Simanta
2008832002**

**Persetujuan Untuk Ujian Disertasi Terbuka pada Hari/Tanggal:
Senin, 18 Juli 2016**

Promotor:

Prof. Bambang Suryoatmono, Ph.D.

Ko-Promotor:

Dr. Johannes Adhijoso Tjondro, ME.

**PROGRAM DOKTOR ILMU TEKNIK SIPIL
PROGRAM PASCASARJANA
UNIVERSITAS KATOLIK PARAHYANGAN
BANDUNG
JULI 2016**

Pernyataan

Yang bertandatangan di bawah ini, saya dengan data diri sebagai berikut:

Nama : Djoni Simanta
Nomor Pokok Mahasiswa : 2008832002
Program Studi : Teknik Struktur
Program Doktor Ilmu Teknik Sipil
Program Pascasarjana
Universitas Katolik Parahyangan

Menyatakan bahwa Disertasi dengan judul:

SAMBUNGAN BALOK-KOLOM EKSTERIOR KAYU GLULAM AKASIA DENGAN SISTEM PROFIL SIKU DAN BATANG BAJA

adalah benar-benar karya saya sendiri di bawah bimbingan Pembimbing, dan saya tidak melakukan penjiplakan atau pengutipan dengan cara-cara yang tidak sesuai dengan etika keilmuan yang berlaku dalam masyarakat keilmuan.

Apabila di kemudian hari ditemukan adanya pelanggaran terhadap etika keilmuan dalam karya saya, atau jika ada tuntutan formal atau non formal dari pihak lain berkaitan dengan keaslian karya saya ini, saya siap menanggung segala resiko, akibat, dan/atau sanksi yang dijatuhkan kepada saya, termasuk pembatalan gelar akademik yang saya peroleh dari Universitas Katolik Parahyangan.

Dinyatakan : di Bandung
Tanggal : 22 Juni 2016

Materai

Djoni Simanta

SAMBUNGAN BALOK-KOLOM EKSTERIOR KAYU GLULAM AKASIA DENGAN SISTEM PROFIL SIKU DAN BATANG BAJA

Djoni Simanta (NPM: 2008832002)
Promotor: Prof. Bambang Suryoatmono, Ph.D.
Ko-Promotor: Dr. Johannes Adhijoso Tjondro, ME.
Doktor Ilmu Teknik Sipil
Bandung
Juli 2016

ABSTRAK

Untuk memenuhi kebutuhan industri konstruksi, keterbatasan produksi kayu utuh diatasi dengan sistem laminasi atau kayu glulam sehingga diperoleh ukuran kayu rekayasa yang lebih besar. Dua model (tipe M9B1 dan M9B2) dari sambungan balok-kolom eksterior kayu glulam akasia dengan sistem profil siku dan batang baja diuji dan dianalisis terhadap pembebanan statik monotonik dan siklik. Variasi dari benda uji adalah jumlah batang baja tumpu dan tebal besi siku yang menempel di balok glulam. Perilaku setiap model akibat pembebanan statik dan siklik, peralihan maksimum, momen maksimum, *equivalent viscous damping ratio*, kekakuan rotasi, degradasi kekakuan dan daktilitas dicari dan dipelajari. Dari hasil uji di atas dapat disimpulkan bahwa perilaku sambungan dipengaruhi oleh jumlah batang baja tumpu di balok, mutu kayu balok dan tebal besi siku. Sambungan tipe M9B2 lebih kaku dibandingkan sambungan tipe M9B1. Untuk perhitungan analitis, pada sambungan tipe M9B1, boleh dilakukan asumsi bahwa gaya tarik akibat momen diterima oleh kombinasi batang baja tarik dan gaya tumpu dari kuat tumpu batang baja tumpu dan kayu di sekitarnya. Sedang untuk sambungan tipe M9B2, gaya tarik akibat momen dapat diasumsikan sepenuhnya diterima oleh batang baja tarik dengan syarat besi siku dipasang cukup tebal sehingga kuat tumpu batang baja besarnya sama atau lebih besar dari kuat tarik baja tarik, dan pengencangan batang baja yang memadai. Sambungan tipe M9B2 bisa digunakan sebagai sambungan *semi-rigid* pada struktur tipe rangka.

Kata Kunci: glulam akasia, profil siku, batang baja, degradasi kekakuan, daktilitas

ACACIA GLULAM WOOD EXTERIOR BEAM-COLUMN CONNECTION WITH ANGLES AND STEEL RODS SYSTEM

Djoni Simanta (NPM: 2008832002)

Promotor: Prof. Bambang Suryatmono, Ph.D.

Co-Promotor: Dr. Johannes Adhijoso Tjondro, ME.

Doctor of Civil Engineering

Bandung

Juli 2016

ABSTRACT

In order to obtain larger engineered wood size in construction industry, the limited solid wood coped with laminate system or glulam timber is produced. Two models (M9B1 and M9B2 type) of acacia glulam wood exterior beam-column connections with angles and steel rod system under monotonic static loads and cyclic loading were tested and analyzed. The variation of the specimen was number of rod and thickness of angles attached at the glulam beams. The behavior of each model under static and cyclic loading, maximum displacement, maximum moment, equivalent viscous damping ratio, stiffness degradation, rotational stiffness and ductility were observed. From the above test results it can be concluded that the behavior of connections were influenced by number of bearing steel rods at the beam, wood quality and thickness of the angles. M9B1 type connections have more flexible than M9B2 type connections. For analytical calculations, in M9B1 type connection, an assumption can be made that the tensile forces due to the moment are received by the combination of tensile steel rods and bearing force of steel rod and wood around it. For the M9B2 type connection, tensile force due to moment can be assumed to be received by the tensile steel rods alone on condition sufficiently thick angle so the bearing steel rod strength is equal to or greater than the steel tensile strength, and with adequate tightened steel rods. M9B2 connection types can be used as semi - rigid connections in frame-type structure.

Keywords: acacia glulam, angles, steel rods, stiffness degradation, ductility

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kepada Allah Yang Maha Kuasa atas kasihNya yang telah mendampingi serta mengaruniakan berkat dan rahmatNya sehingga Disertasi ini dapat diselesaikan. Dari lubuk hati yang paling dalam, ungkapan terima kasih sebesar-besarnya diberikan kepada Promotor yang juga Wali Akademik, Prof. Bambang Suryoatmono, Ph.D. dan Ko-promotor, Dr. Johannes Adhijoso Tjondro, yang dengan sabar telah menyediakan waktu untuk membimbing, berdiskusi, serta memberi semangat saat pengujian di laboratorium dan saat penyusunan Disertasi.

Ungkapan terima kasih ditujukan kepada Dr. Paulus Karta Wijaya, yang telah memberikan masukan dari saat diseminarkan hingga diujikan dalam Sidang Terbuka; Dr. Indah Sulistyawati yang telah memberikan masukan saat proposal diseminarkan dan diujikan; Ali Awaludin, Ph.D yang telah berkenan memberi masukan dalam seminar penelitian hingga disidangkan; Dr. Ir. Naresworo Nugroho, MS. yang telah berkenan menjadi penguji dalam sidang tertutup maupun sidang terbuka.

Terima kasih juga disampaikan kepada Ketua dan Pengurus Yayasan, Rektor, Dekan Fakultas Teknik, dan Ketua Jurusan Teknik Sipil Universitas Katolik Parahyangan atas dukungan dana dan ijin untuk melanjutkan studi S3. Terima kasih juga ditujukan untuk Direktur Sekolah Pascasarjana dan Kepala Program Doktor Teknik Sipil atas dukungan saat proses studi doktor. Penghargaan disampaikan pada Dr. Cecilia Lauw dan Ir. Ny. Winarni Hadipratomo atas perhatian dan dukungan moril yang terus menerus sebelum dan selama masa studi doktor.

Terima kasih kepada Prof. Paulus P. Rahardjo, Ph.D; Prof. R. Wahyudi Triweko, Ph.D., Prof. Wimpy Santosa, Ph.D., A. Caroline Sutandi, Ph.D., Doddi Yudianto, Ph.D., dan rekan-rekan dosen di Jurusan Teknik Sipil, khususnya rekan-rekan KBI Teknik Struktur yang telah mendukung untuk studi doktor. Terima kasih juga disampaikan kepada Prof. R. Bambang Budiono, Ph.D dan Prof. Tavio, Ph.D. yang telah mendukung studi kami.

Terima kasih kepada Altho Sagara, ST., MT., Stephen Sanjaya, ST., dan Gerry Sabastian, ST. atas bantuannya dalam proses editing. Terima kasih kepada Teguh Farid Nurul Iman A.md., ST., Cuncun Priatna, dan Markus Didi Gunadi yang telah banyak membantu saat uji eksperimen. Penghargaan juga disampaikan kepada Kepala Pusat Penelitian dan Pengembangan Perumahan dan Pemukiman Kementerian PUPR beserta jajarannya atas ijin dan bantuan dalam menggunakan fasilitas pengujian siklik.

Terima kasih yang tak terhingga secara khusus ditujukan untuk istri tercinta Maria Feliana Lestari, dan putra-putri Devina & James, Monika Nathania & Stephen dan Adrian, atas dukungan selama pengerjaan Disertasi ini.

Semoga Disertasi ini dapat menambah pengetahuan mengenai perilaku sambungan balok-kolom eksterior kayu glulam akasia dengan sistem profil siku dan batang baja. Semoga penelitian ini dapat menjadi inspirasi bagi penelitian lebih lanjut khususnya penerapannya dalam dunia konstruksi kayu.

Bandung, 6 Juni 2016

Penulis

Djoni Simanta

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
HALAMAN PENGESAHAN DISERTASI	
ABSTRAK	
KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR LAMBANG DAN NOTASI	xi
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xxvii
DAFTAR LAMPIRAN	xxix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian	3
1.3 Ruang Lingkup Penelitian	5
1.4 Perumusan Masalah	6
1.5 Hipotesis	7
1.6 Keutamaan Penelitian	7
1.7 Metodologi Penelitian	9
BAB II STUDI PUSTAKA	13
2.1 Kayu	13
2.2. Kayu Indonesia	14
2.3. Kayu Akasia [Mandang dan Pandit, 1997]	15
2.4 Kayu Glulam (Glued Laminated Timber)	16
2.5 Perekat [Suryoatmono, B. (2013)]	19

2.6 Sifat Fisik dan Mekanik Kayu	19
2.6.1 Berat Jenis dan Kadar Air	19
2.6.2 Kuat Tarik Kayu Sejajar dan Tegaklurus Serat [ASTM D143-09]	20
2.6.3 Kuat Tekan Kayu Sejajar dan Tegaklurus Serat [ASTM D143-94R07]	22
2.6.4 Kuat Geser Kayu Sejajar Serat[ASTM D143-94R07]	23
2.6.5 Kuat Tumpu Sejajar Serat[ASTM D5764-97aR(2002)]	24
2.7 Sifat Mekanik Batang baja	26
2.8 Model Sambungan Kayu	27
2.9 Model Konstitutif Kayu	28
2.9.1 Model Berdasarkan Elastisitas	33
2.9.2 Model Berdasarkan Plastisitas	34
2.10 Model Material 3 Dimensi dari Kayu	35
2.11 Menentukan Parameter Material Kayu	36
2.11.1 Modulus Elastisitas (MOE) dan Tegangan leleh	38
2.11.2 Modulus Geser Elastisitas dan Regangan Leleh Geser	39
2.11.3 Rasio Poisson	41
2.12 Metode Elemen Hingga Nonlinier	41
2.13 Alat Uji Eksperimental	42
2.14 Sambungan Penahan Momen pada Struktur Kayu	44
2.15 Riset dalam Sambungan Struktur Kayu Penahan Momen	51
2.15.1 Sambungan dengan Baut atau Dowel Baja	51
2.15.2 Sambungan dengan Lem dan Diinjeksi dengan <i>Epoxy</i>	53
2.15.3 Sambungan dengan Pelat Buhul yang Dipaku	54

2.15.4 Sambungan Cepat Rangka Portal	57
2.15.5 Sambungan Momen dengan pasak yang diuji Siklik	58
2.15.6 Sambungan Momen dengan Sistim Profil Siku dan Batang Baja	61
BAB III UJI EXPERIMENTAL PROPERTI MATERIAL	63
3.1 Pengujian Sifat Mekanis Material Kayu	63
3.1.1 <i>Spesific Gravity (SG)</i>	67
3.1.2 Uji Kuat Tekan Sejajar dan Tegak Lurus Serat	68
3.1.2.1 Uji Tekan Sejajar Serat	68
3.1.2.2 Uji Tekan Tegak Lurus Serat	71
3.1.3 Uji Kuat Geser Sejajar Serat	73
3.1.4 Uji Kuat Tarik Sejajar dan Tegak Lurus Serat	77
3.1.4.1 Uji Kuat Tarik Sejajar Serat	77
3.1.4.2 Uji Kuat Tarik Tegak Lurus Serat	79
3.1.5 Uji Kuat Tumpu Sejajar dan Tegak Lurus Serat	82
3.1.5.1 Uji Kuat Tumpu Sejajar	85
3.1.5.2 Uji Kuat Tumpu Tegak Lurus Serat	87
3.2 Uji Batang Baja	88
3.2.1 Uji Kuat Tarik Batang baja	89
3.2.2 Modulus Elastisitas Batang Baja [ASTM E111-97]	90
BAB IV UJI EXPERIMENTAL SAMBUNGAN	93
4.1. Ukuran Sambungan Momen yang akan Diuji	93
4.1.1 Kelompok I atau Tipe M9B1	93
4.1.2 Kelompok II atau Tipe M9B2	95

4.2 Perakitan Kayu Glulam dengan Menggunakan Perekat <i>polyvinyl acetate</i> (PVA/Lem Kayu).	98
4.3 Uji Ekperimental Benda Uji Tipe M9B1	99
4.3.1 Perakitan Benda Uji Sambungan Balok-Kolom dengan Profil Siku dan Batang Baja	99
4.3.2 Pemasangan Benda Uji Sambungan Momen Balok-Kolom	100
4.3.3 Pemasangan <i>Strain Gauge</i> Tipe FLA-6-11 di LVDT	101
4.3.4 Pembebanan Monotonik	102
4.3.5 Kegagalan Tumpu Sejajar Serat Kayu di Sekitar Batang Baja Geser	103
4.3.6 Kurva Beban (N) - Peralihan (mm) dan Momen (kNm) – Rotasi(rad)	104
4.3.7 Pembahasan Hasil Uji Sambungan Momen Tipe M9B1	108
4.4 Uji Ekperimental Benda Uji Tipe M9B2	110
4.4.1 Perakitan Benda Uji Sambungan Balok-Kolom Tipe M9B2	110
4.4.2 Pemasangan Benda Uji Sambungan Balok-Kolom	110
4.4.3 Pemasangan <i>Strain Gauge</i> di LVDT	111
4.4.4 Pembebanan Monotonik	112
4.4.5 Kegagalan Tumpu Sejajar Serat Kayu di Sekitar Batang Baja Geser	112
4.4.6 Kurva Beban (N) - Peralihan (mm) dan Momen (kNm) – Rotasi(rad)	113
4.4.7 Pembahasan Hasil Uji Sambungan Momen Tipe M9B2	119
4.5 Kesimpulan Hasil Uji Eksperimental Sambungan	121
BAB V KAJIAN NUMERIK DENGAN METODE ELEMEN HINGGA DAN UJI SIKLIK	123

5.1 Umum	123
5.2 Analisis Statik Metode Elemen Hingga Nonlinier	125
5.2.1 Model <i>Transverse Isotropic</i>	126
5.2.2 <i>Anisotropic Plasticity</i>	127
5.3 Model Material Kayu	129
5.3.1 Elemen Kayu	129
5.3.2 Properti Kayu	130
5.4 Model Baja	135
5.4.1 Elemen Batang Baja dan Profil Siku	135
5.4.2 Hubungan Tegangan-Regangan Baja Tulangan	136
5.5 Pemodelan Geometri Sambungan dengan ANSYS Workbench	137
5.6 Pemodelan Permukaan <i>Contact</i>	140
5.7 Pemodelan Kondisi Batas	143
5.8 Pembebanan pada Model Sambungan	144
5.9.1. Metode <i>Newton Raphson</i> Penuh	147
5.9.2. Metode Newton-Raphson dengan Modifikasi	147
5.10 Model Geometris Model-model Uji Numerik	148
5.10.1 Model M9B1	148
5.10.2 Model M9B2	149
5.11 Kajian Hasil Uji Numerik	152
5.11.1 Model M9B1	152
5.11.1.1 Kurva Beban-Peralihan	152
5.11.1.2 Tegangan Efektif dan lendutan pada beban 1,5 ton	154
5.11.1.3 Deformasi Total	156

5.11.2 Model M9B2	157
5.11.2.1 Kurva Beban-Peralihan	157
5.11.2.2 Tegangan Efektif	159
5.11.2.3 Deformasi Total	162
5.12 Kesimpulan Kajian Analisis Numerik	163
5.13 Studi Parameter dengan Metode Elemen Hingga	165
5.13.1 Studi Pengaruh Tumpuan di Kolom	165
5.13.2 Studi Simulasi Test Numerik Properti Kayu	166
5.13.2.1 Simulasi Model Uji Kayu Tumpu (ASTM D5764)	166
5.13.2.1.1 Model Sejajar Serat	168
5.13.2.1.2 Model Tegak Lurus Serat	172
5.13.2.2 Simulasi model uji tekan kayu (ASTM D143)	176
5.13.2.2.1 Model sejajar serat kayu	176
5.13.2.2.2 Model Tekan Tegak Lurus Serat Kayu	181
5.14 Uji Eksperimental Siklik pada Sambungan Momen	189
5.14.1 Benda Uji M9B1	190
5.14.2 Benda Uji M9B2	198
5.14.3 Energi Disipasi dan <i>Equivalent Viscous Damping Ratio</i>	207
5.14.4 Degradasi Kekakuan Lateral	209
5.14.5 Daktilitas Peralihan dan Daktilitas Rotasi Hasil Uji Siklik	210
5.15 Rangkuman Seluruh Hasil Uji Ekperimental Statik Monotonik dan Siklik	211
5.16 Prosedur Analitis Kekuatan Penampang Sambungan Momen	212
5.16.1 Prosedur Analisis	212
5.16.2 Prosedur Desain	216

BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN	221
6.1. Kesimpulan	221
6.2. Saran	223
DAFTAR PUSTAKA	227
LAMPIRAN	237

DAFTAR LAMBANG DAN NOTASI

- A : luas penampang, mm^2
- b : lebar penampang, mm
- b_{coakan} : lebar total coakan untuk pemasangan profil siku, mm
- $cover$: jarak dari titik pusat batang baja ke serat terluar balok, mm
- D : diameter batang baja, mm
- E : modulus elastisitas, MPa
- E_L : modulus elastisitas longitudinal, MPa
- E_R : modulus elastisitas radial, MPa
- E_T : modulus elastisitas tangensial, MPa
- $E_{e//}$: modulus elastisitas sejajar serat, MPa
- $E_{p//}$: modulus plastis sejajar serat, MPa
- $E_{e\perp}$: modulus elastisitas tegaklurus serat, MPa
- $E_{p\perp}$: modulus plastis tegaklurus serat, MPa
- F_{bp} : kuat lentur pada batas proporsional, MPa
- F_{bu} : kuat lentur pada batas ultimit, MPa
- $F_{cy//}$: kuat leleh tekan sejajar serat, MPa
- $F_{cy\perp}$: kuat leleh tekan tegaklurus serat, MPa
- $F_{cu//}$: kuat ultimit tekan sejajar serat, MPa
- $F_{e//}$: kuat tumpu sejajar serat, MPa
- $F_{e\perp}$: kuat tumpu tegaklurus serat, MPa
- $F_{e\alpha}$: kuat tumpu untuk beban bersudut terhadap serat, MPa
- F_{em} : kuat tumpu maksimum sejajar serat, MPa

- $F_{t//}$: kuat tarik sejajar serat, MPa
- $F_{t\perp}$: kuat tarik tegaklurus serat, MPa
- $F_{t\theta\perp}$: kuat tarik tegaklurus serat terhadap tangensial, MPa
- F_u : tegangan tarik putus baja profil besi siku, MPa
- $F_{v//}$: kuat geser sejajar serat, MPa
- F_{yb} : kuat lentur leleh batang baja, MPa
- G : berat jenis kayu lamina
- G_{LR} : modulus rigiditas longitudinal-radial, MPa
- G_{LT} : modulus rigiditas longitudinal-tangensial, MPa
- G_{RT} : modulus rigiditas radial-tangensial, MPa
- h : tinggi penampang balok laminasi, mm
- j : lengan momen, mm
- K : parameter material, lihat SNI 7973-2013
- K_e : kekakuan elastik, kN-m/rad
- K_F : Faktor konversi format
- K_{ie} : kekakuan inelastik, kN-m/rad
- I : momen inersia penampang, mm⁴
- L_m : panjang tumpu pasak pada komponen struktur utama, mm
- L_s : tebal besi siku, mm
- M : momen lentur, N-m, kN-m
- M_n : momen nominal, N-m, kN-m
- MC : kadar air
- P : beban terpusat, N
- s : jarak antar baut, mm

- SG : *specific gravity*
- T : Gaya tarik, N, kN
- t : tebal, mm
- T_{nw} : Gaya tumpu nominal di kayu, N, kN
- T_{ns} : Gaya tarik nominal batang baja tarik, N, kN
- T_{ub} = gaya tarik maksimum batang baja tarik, N
- V : volume benda uji, mm³
- W_{basah} : berat benda uji pada kondisi sebelum dikeringkan, gram
- W_{kering} : berat kering, gram
- $\varepsilon_{cy//}$: regangan leleh tekan sejajar serat
- $\varepsilon_{cu//}$: regangan ultimit tekan sejajar serat
- $\varepsilon_{u//}$: regangan ultimit tarik sejajar serat
- $\varepsilon_{cy\perp}$: regangan leleh tekan tegak lurus serat
- θ : sudut antara arah beban terhadap arah serat, derajat
- ρ_{air} : kerapatan air (gr/cm³)
- γ_y : regangan leleh geser kurva tegangan-regangan geser bilinear [mm/mm]
- ξ_{hyst} : *equivalent viscous damping ratio*
- σ_{+i} : tegangan leleh tarik, MPa
- σ_{-i} : tegangan leleh tekan, MPa
- φ_u : putaran sudut pada saat kelelahan batas
- φ_y : putaran sudut pada saat kelelahan pertama
- φ_z : faktor reduksi kapasitas
- ν_{LT} : rasio poisson longitudinal-tangensial
- ν_{TL} : rasio poisson tangensial-longitudinal

- ν_{LR} : rasio poisson longitudinal-radial
- ν_{RL} : rasio poisson radial-longitudinal
- ν_{RT} : rasio poisson radial-tangensial
- ν_{TR} : rasio poisson tangensial-radial
- μ_{ϕ} : daktilitas rotasi

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1. Laminasi-laminasi Kayu yang Direkat dengan Bahan Adhesive Menjadi Glulam [APA,2010]	2
Gambar 1.2 Reorganisasi Kayu Utuh Menjadi Lamina-Lamina untuk Meningkatkan Efisiensi [Bodig, J., Jayne, B.A, 1993].	3
Gambar 1.3 Model Sambungan Balok-kolom Eksterior Kayu Glulam Akasia dengan Sistim Profil Siku dan Batang Baja Tipe M9B1	4
Gambar 1.4 Model Sambungan Balok-Kolom Eksterior Kayu Glulam Akasia dengan Sistim Profil Siku dan Batang Baja Tipe M9B2	5
Gambar 1.5 Garis Besar Diagram Alir Penelitian Disertasi	11
Gambar 2.1 Sumbu Utama Material Kayu [Ashby et.al., 1985]	14
Gambar 2.2 Balok Glulam [APA, 2010]	16
Gambar 2.3 Aplikasi Kayu Glulam [Structural Timber Association, 2014]	17
Gambar 2.4 Fabrikasi Kayu Glulam [Thelandersson, S., and Larsen, H.J., 2003]	18
Gambar 2.5 Alat <i>Oven</i> dan Alat Ukur Berat	20
Gambar 2.6 Ukuran Standar Benda Uji Tarik // Serat [ASTM D143-09]	21
Gambar 2.7 Ukuran Standar Benda Uji Tarik \perp Serat[ASTM D143-09]	21
Gambar 2.8 (a) Uji Tekan // Serat (b) Contoh Benda Uji Tekan // Serat	22
Gambar 2.9 (a) Uji Tekan \perp Serat (b) Contoh Benda Tekan \perp Serat	23
Gambar 2.10 Ukuran Standar Benda Uji Geser // Serat Kayu (ASTM D143)	23

Gambar 2.11 Ukuran Standar Benda Uji Kuat Tumpu (ASTM D5764-97aR(2002))	24
Gambar 2.12 Definisi Beban Leleh yang Ditentukan dari Kurva Beban vs Deformasi (ASTM D5764-97aR02)	25
Gambar 2.13 Pengujian Tarik Batang Baja	26
Gambar 2.14 (a) Modulus Elastisitas antara Tegangan P, di bawah antara Batas Proporsional dan R. (b) Modulus Tangen untuk Setiap Tegangan R.[ASTM E111-97]	27
Gambar 2.15 Ketiga Sumbu Utama Kayu [Wood handbook, 2010]	29
Gambar 2.16 Vektor P dalam Sistem Koordinat Lokal dan Global [Persson, 2000]	31
Gambar 2.17 Elastisitas [Huei-Huang, 2014]	33
Gambar 2.18 Plastisitas dan Regangan Residu (<i>plastic strain</i>) [Huei-Huang, 2014]	34
Gambar 2.19 Tiga Arah Utama dan Penampang di Kayu [Hong,2007]	37
Gambar 2.20 Kurva Tegangan-regangan Bilinier dalam Model Plastik Anisotropis[Hong,2007]	37
Gambar 2.21 Contoh pembuatan kurva bilinier dari kurva hasil eksperimental [Hong,2007]	39
Gambar 2.22 Instrumen Hung Ta [Hung Ta, 2004]	42
Gambar 2.23 Instrumen DC104R, LVDT, dan <i>Strain Gauges</i>	43
Gambar 2.24 Sambungan di Struktur Glulam[Structural Timber Engineering Bulletin, 2014]	47
Gambar 2.25 Bentuk Konstruksi Portal [Systems in Timber Engineering, 2008]	48

Gambar 2.26 Bentuk Rangka Kaku Penahan Momen terdiri dari Kolom dan Kumpulan Balok [Systems in Timber Engineering, 2008]	49
Gambar 2.27 Bentuk Rangka Kaku Penahan Momen Terdiri dari Balok dan Kumpulan kolom[Systems in Timber Engineering, 2008]	49
Gambar 2.28 Bentuk Rangka Kaku Penahan Momen Terdiri dari Kolom dan Balok Bersilangan[Systems in Timber Engineering, 2008]	50
Gambar 2.29 Bentuk Rangka Kaku Penahan Momen terdiri dari Kolom dan Balok Menerus[Systems in Timber Engineering, 2008]	50
Gambar 2.30 Bentuk Rangka Kaku Penahan Momen <i>Forked Column</i> [Systems in Timber Engineering, 2008]	51
Gambar 2.31 Pola Pemasangan Baut Melingkar	52
Gambar 2.32 Sambungan dengan Dowel yang Dipasang Melingkar	53
Gambar 2.33 Sambungan <i>Knee Joint</i> pada Rangka Payon [Buchanan, 1993]	54
Gambar 2.34 Sambungan <i>Knee</i> Tipikal [Gardner, 1989]	54
Gambar 2.36 Sambungan Balok-Kolom dengan Paku pada Bangunan Bertingkat [Buchanan, 1993]	56
Gambar 2.37 Sambungan Kayu Glulam dengan Pelat Buhul Berpaku dan Bracket Berpaku	57
Gambar 2.38 Sambungan Cepat Rangka Portal [Scheibmair, F., and Queneville, P. (2012)]	58
Gambar 2.39 Benda uji sambungan momen dengan uji siklik [.Leitner, Emma J. (2011)]	58
Gambar 2.40 Model numerik dari sambungan [.Leitner, Emma J. (2011)]	59
Gambar 2.41 Perbandingan <i>Hysteresis Loop</i> hasil uji numerik dan ekperimental	60

Gambar 2.42 Perbandingan <i>Hysteresis Envelopes</i> hasil uji numerik dan ekperimental	60
Gambar 2.43 Sambungan Penahan Momen dengan Profil Siku dan Baut	62
Gambar 3.1 Specimen Pengujian Kadar Air Kayu Akasia	68
Gambar 3.2(a) Uji Tekan // Serat (b) Contoh Benda Uji Tekan // Serat	69
Gambar 3.3 Kurva Beban-Peralihan (Uji Kuat Tekan Sejajar Serat) batang D	69
Gambar 3.4 Kurva Beban-Peralihan (Uji Kuat Tekan Sejajar Serat) batang E	70
Gambar 3.5 Kurva Beban-Peralihan (Uji Kuat Tekan Sejajar Serat) batang G	70
Gambar 3.6(a) Uji Tekan \perp Serat (b) Contoh Benda Tekan \perp Serat	71
Gambar 3.6 Uji Tekan Tegak Lurus Serat	71
Gambar 3.7 Kurva Beban-Peralihan (Uji Kuat Tekan \perp Serat) Batang C	72
Gambar 3.8 Kurva Beban-Peralihan (Uji Kuat Tekan \perp Serat) Batang F	72
Gambar 3.9 Kurva Beban-Peralihan (Uji Kuat Tekan \perp Serat) Batang H	73
Gambar 3.10 Ukuran Standar Benda Uji Geser // Serat Kayu (ASTM D143)	73
Gambar 3.11 Contoh Benda Uji Kuat Geser // Serat Kayu	74
Gambar 3.12 (a) Konfigurasi Pengujian Kuat Geser // Serat Kayu (b) Uji Geser	74
Gambar 3.13 Kurva Beban-Peralihan (Uji Kuat Geser // Serat) Batang C	75
Gambar 3.14 Kurva Beban-Peralihan (Uji Kuat Geser // Serat) Batang F	75
Gambar 3.14 Kurva Beban-Peralihan (Uji Kuat Geser // Serat) Batang H	76
Gambar 3.15 Kurva Beban-Peralihan (Uji Kuat Geser // Serat) Batang I	76
Gambar 3.16 Ukuran Standard Benda Uji Tarik // Serat [ASTM D143-09]	77
Gambar 3.17 Contoh Benda Uji Tarik // Serat Kayu	77
Gambar 3.18 Kurva Beban-Peralihan (Uji Kuat Tarik // Serat) Batang C	78
Gambar 3.19 Kurva Beban-Peralihan (Uji Kuat Tarik // serat) Batang F	78

Gambar 3.20 Kurva Beban-Peralihan (Uji Kuat Tarik // Serat) Batang H	79
Gambar 3.21 Kurva Beban-Peralihan (Uji Kuat Tarik // Serat) Batang I	79
Gambar 3.22 Ukuran Standard Benda Uji Tarik \perp Serat[ASTM D143-09]	80
Gambar 3.23 (a) Contoh Benda Uji Tarik \perp Serat (b) Uji Tarik \perp Serat.	80
Gambar 3.24 Kurva Beban-Peralihan (Uji Kuat Tarik \perp serat) Batang C	81
Gambar 3.25 Kurva Beban-Peralihan (Uji Kuat Tarik \perp serat) batang F	81
Gambar 3.26 Kurva Beban-Peralihan (Uji Kuat Tarik \perp Serat) Batang H	82
Gambar 3.27 Kurva Beban-Peralihan (Uji Kuat Tarik \perp Serat) Batang I	82
Gambar 3.28 Ukuran Standar Benda Uji Kuat Tumpu (ASTM D5764-97aR(2002))	83
Gambar 3.29 Contoh Benda Uji Kuat Tumpu	83
Gambar 3. 30 Pengujian Kuat Tumpu	84
Gambar 3.31 Definisi Beban Leleh yang Ditentukan dari Kurva Beban vs Deformasi (ASTM D5764-97aR02).	84
Gambar 3.33 Kurva Beban-Peralihan (Uji Kuat Tumpu // serat) Batang F	85
Gambar 3.34 Kurva Beban-Peralihan (Uji Kuat Tumpu // serat) Batang H	86
Gambar 3.35 Kurva Beban-Peralihan (Uji Kuat Tumpu // Serat) Batang I	86
Gambar 3.36 Kurva Beban-Peralihan (Uji Kuat Tumpu \perp Serat) Batang C	87
Gambar 3.37 Kurva Beban-Peralihan (Uji Kuat Tumpu \perp Serat) Batang F	87
Gambar 3.38 Kurva Beban-Peralihan (Uji Kuat Tumpu \perp Serat) Batang H	88
Gambar 3.39 Kurva Beban-Peralihan (Uji Kuat Tumpu \perp Serat) Batang I	88
Gambar 3.40 Contoh Batang baja Diameter 7,7 mm	89
Gambar 3.41 Pengujian Tarik Batang Baja	89
Gambar 3.42 Kurva Tegangan-Regangan Batang Baja Diameter 7,7 mm	90

Gambar 3.43 (a) Modulus Elastisitas antara Tegangan P, di bawah antara Batas Proporsional dan R. (b) Modulus Tangen untuk Setiap Tegangan R.	90
Gambar 3.44 Diagram Tegangan-Regangan Masing-masing Batang Baja D7,7	91
Gambar 4.1 (a). Ukuran Sambungan Momen Tipe M9B1.	94
Gambar 4.1 (b). Ukuran Profil Siku yang Digunakan pada Sambungan Tipe M9B1	95
Gambar 4.2 (a). Ukuran Sambungan Momen tipe M9B2.	96
Gambar 4.2 (b). Ukuran Profil Siku yang Digunakan pada Sambungan Tipe M9B2	97
Gambar 4.3 Perakitan Lapisan Kayu menjadi Kayu Glulam	99
Gambar 4.4 (a) Benda Uji Sambungan Momen dengan Baja Siku.(b) Batang Baja dengan Panjang 600 mm	99
Gambar 4.5 Pemasangan Benda Uji Sambungan Balok-Kolom	100
Gambar 4.6 Posisi Penempatan LVDT pada Benda Uji Sejarak b dari Muka Kolom	100
Gambar 4.7 Pemasangan <i>Strain Gauge</i> Pada LVDT	101
Gambar 4.8 Pemasangan <i>Strain Gauge</i> Pada <i>Batang Baja</i> Tarik 3 & 4 yang Terletak di bawah dan Batang Baja Tekan 2 yang Terletak di atas	101
Gambar 4.9 Pembebanan Inkremental Monotonik dilakukan	102
Gambar 4.10 Balok Melendut ke atas Akibat Dorongan dari Bawah	102
Gambar 4.11. Kegagalan Pada Kayu Sekitar Batang Baja Tumpu, Benda Uji 1	103
Gambar 4.12 Kegagalan pada Kayu sekitar Batang Baja Tumpu, Benda Uji 2	104
Gambar 4.13 Penjelasan Kurva Bilinier	105
Gambar 4.14 Kurva Pembebanan dan Peralihan, Benda Uji 1	106

Gambar 4.15 Kurva Momen (kNm) dan Rotasi (rad), Benda Uji 1	106
Gambar 4.16 Kurva Pembebanan dan Peralihan, Benda Uji 2	107
Gambar 4.17 Kurva Momen (kNm) dan Rotasi (rad), Benda Uji 2	108
Gambar 4.18 Perakitan Benda Uji Sambungan Momen tipe M9B2	110
Gambar 4.19 Pemasangan Benda Uji	111
Gambar 4.20 Pemasangan <i>LVDT</i>	111
Gambar 4.21 Pembebanan Inkremen Dilakukan	112
Gambar 4.22 Kegagalan Tumpu di Kayu dan Batang Baja Tarik	113
Gambar 4.23 Kurva Pembebanan dan Peralihan, Benda Uji 1	114
Gambar 4.24 Kurva Momen dan Rotasi, Benda Uji 1	114
Gambar 4.25 Kurva Pembebanan dan Peralihan, Benda Uji 2	115
Gambar 4.26 Kurva Momen dan Rotasi, Benda Uji 2	116
Gambar 4.27 Kurva Pembebanan dan Peralihan, Benda Uji 3	117
Gambar 4.28 Kurva Momen dan Rotasi, Benda Uji 3	117
Gambar 4.29 Kurva Pembebanan dan Peralihan, Benda Uji 4	118
Gambar 4.30 Kurva Momen dan Rotasi, Benda Uji 4	119
Gambar 5.1 Bentuk Elemen <i>Hexahedron</i>	124
Gambar 5.2 Bentuk Elemen <i>Tetrahedron</i>	124
Gambar 5.3 Permukaan Leleh 3 Dimensi untuk <i>Anisotropic Plasticity</i> (ANSYS Inc. 2015)	127
Gambar 5.4 Elemen <i>SOLID45</i> (8 titik simpul)	130
Gambar 5.5 Perilaku Kurva Tegangan-regangan Bilinier dalam Model Plastik Anisotropis [Hong,2007]	130
Gambar 5.6 Elemen <i>SOLID186</i>	135

Gambar 5.7 Elemen SOLID187	135
Gambar 5.8 Diagram Tegangan-Regangan <i>Steel rod</i>	136
Gambar 5.9 Perilaku Tegangan-regangan <i>Bilinear Isotropic Plasticity</i>	137
Gambar 5.10 Tampak Perspektif Model Geometri Sambungan Momen	137
Gambar 5.11 Detail Model Sambungan – Model Batang Baja dan Besi Siku	138
Gambar 5.13 <i>Perspective Automatic Meshing</i> Sambungan Momen	139
Gambar 5.14 <i>Automatic Meshing</i> Model Geometri Sambungan Momen	139
Gambar 5.15 <i>Detail Meshing</i> batang baja dan besi siku Sambungan Momen	140
Gambar 5.16 Pembebanan pada Model Sambungan	144
Gambar 5.17 Ilustrasi Metode Newton-Raphson untuk 1 kali Iterasi	146
Gambar 5.18 Ilustrasi Prosedur Newton-Raphson untuk Beban Inkremental	147
Gambar 5.19 Geometris dari Model M9B1_Uji_1	148
Gambar 5.20 Geometris dari Model M9B1_Uji_2	149
Gambar 5.21 Geometris dari Model M9B2_Uji_1	150
Gambar 5.22 Geometris dari Model M9B2_Uji_2	151
Gambar 5.23 Geometris dari Model M9B2_Uji_3	151
Gambar 5.24 Geometris dari Model M9B2_Uji_4	152
Gambar 5.25 Kurva Beban – Lendutan benda uji M9B1_Uji1, M9B1_Uji2, EXP_Uji1, EXP_Uji2	153
Gambar 5.26 Kontur Tegangan Efektif Benda Uji M9B1_Uji1 dan M9B1_Uji2	155
Gambar 5.27 Kontur Deformasi Benda Uji M9B1_Uji1 dan M9B1_Uji_2	156
Gambar 5.28 Kurva Beban – Lendutan benda uji M9B2_Uji1,M9B2_Uji3, EXP_Uji1, EXP_Uji3	158

Gambar 5.29 Kurva Beban – Lendutan benda uji M9B2_Uji2,M9B2_Uji4, EXP_Uji2, EXP_Uji4	158
Gambar 5.30 Kontur Tegangan Efektif benda uji M9B2_Uji1 dan M9B2_Uji3	160
Gambar 5.31 Kontur Tegangan Efektif benda uji M9B2_Uji2 dan M9B2_Uji4	161
Gambar 5.33 Kontur Deformasi Benda Uji M9B2_Uji2 dan M9B2_Uji4	163
Gambar 5.34 Kelompok 1	165
Gambar 5.35 Kelompok 2 A	166
Gambar 5.36 Kelompok 2 B	166
Gambar 5.37 Model Simulasi Uji Tumpu	167
Gambar 5.38 Kontur Tegangan Tumpu Normal // Serat Kayu	168
Gambar 5.40 Kurva Beban Tumpu // - Peralihan Kayu E	170
Gambar 5.41 Kurva Tegangan Tumpu // - Regangan Kayu E	170
Gambar 5.42 Kurva Beban Tumpu // - Peralihan Kayu H	171
Gambar 5.43 Kurva Tegangan Tumpu // - Regangan Kayu H	171
Gambar 5.44 Tegangan Tumpu Normal Tegak Lurus Serat Kayu	172
Gambar 5.45 Tegangan Tumpu Ekuivalen Tegak Lurus Serat Kayu	173
Gambar 5.46 Kurva Beban Tumpu Tegak Lurus Serat - Peralihan Kayu E	174
Gambar 5.47 Kurva Tegangan Tumpu Tegak Lurus - Regangan Kayu E	174
Gambar 5.48 Kurva Beban Tumpu Tegak Lurus Serat - Peralihan Kayu H	175
Gambar 5.49 Kurva Tegangan Tumpu Tegak Lurus - Regangan Kayu H	175
Gambar 5.50 Model Uji Tekan // Kayu	176
Gambar 5.51 Tegangan Normal tTekan // Serat Kayu	177
Gambar 5.52 Tegangan Tekan Ekuivalen // Serat Kayu	178
Gambar 5.53 Kurva Beban Tekan // Serat - Peralihan Kayu E	179

Gambar 5.54 Kurva Tegangan Tekan // - Regangan Kayu E	179
Gambar 5.57 Model Uji Tekan Tegak Lurus Serat Kayu	181
Gambar 5.58 Tegangan Normal Tekan Tegak Lurus Serat Kayu	182
Gambar 5.59 Tegangan Tekan Ekuivalen Tegak Lurus Serat Kayu	183
Gambar 5.60 Kurva Beban Tekan Tegak Lurus Serat - Peralihan Kayu E	184
Gambar 5.61 Kurva Tegangan Tekan Tegak Lurus Serat - Regangan Kayu E	184
Gambar 5.63 Kurva tegangan tekan tegak lurus serat - regangan kayu H	185
Gambar 5.64 Kurva Beban-Peralihan dan Momen-Rotasi Model M9B1	186
Gambar 5.68 Model Benda Uji M9B1	190
Gambar 5.69 Instalasi Benda Uji M9B1	191
Gambar 5.70 Proses Pengujian Siklik M9B1	191
Gambar 5.71 Kerusakan di sekitar Besi Siku Benda Uji M9B1	192
Gambar 5.72 Kegagalan Putus Batang Baja Tumpu di Balok	193
Gambar 5.73 Proses Pencatatan Hasil Pengujian lewat Komputer	194
Gambar 5.74 Catatan Hasil Akhir setelah Pengujian M9B1 Selesai	194
Gambar 5.75 Kurva Beban-Lendutan Siklik Benda Uji M9B1	195
Gambar 5.76 Kurva Momen-Rotasi Siklik Benda Uji M9B1	195
Gambar 5.77 Kurva beban-Lendutan M9B1 Hasil Eksperimental dan ANSYS	196
Gambar 5.78 Kurva Amplop Momen-Rotasi M9B1 Hasil Eksperimental dan ANSYS	197
Gambar 5.79 Model Benda Uji M9B2	198
Gambar 5.80 Proses Instalasi Benda Uji M9B2	198
Gambar 5.81 Proses Pengujian Siklik M9B2	199

Gambar 5.82 Kegagalan Pada Benda Uji M9B2: Putusnya Batang Baja Akibat Tarik	200
Gambar 5.83 Tampak Kondisi Besi Siku, Batang Baja Tumpu dan Kayu Balok	201
Gambar 5.84 Kondisi Batang Baja yang Mengalami Tarik	201
Gambar 5.85 Proses Pencatatan Hasil Pengujian oleh Komputer	201
Gambar 5.86 Instalasi Uji Statik Monotonik M9B2	202
Gambar 5.87 Proses Pengujian Statik Monotonik M9B2	202
Gambar 5.88 Kegagalan Batang Baja Tarik Akibat Pembebanan	203
Gambar 5.89 Pencatatan Hasil Pengujian dengan Komputer	203
Gambar 5.92 Kurva Beban-Lendutan M9B2 Hasil Eksperimental dan ANSYS	205
Gambar 5.93 Kurva amplop momen-rotasi M9B2 hasil eksperimental dan ANSYS	206
Gambar 5.94 Gaya yang Dipancarkan dan yang Disimpan untuk : (a) Viscous	207
Gambar 5.95 Definisi Kekakuan <i>Peak to Peak</i> pada Suatu Siklus Pembebanan	209
Gambar 5.96 Kurva Normalisasi Degradasi Kekakuan Lateral K_L vs <i>Drift Ratio</i>	210
Gambar 5.97 Kegagalan Putus Baja Tumpu dan Kerusakan Kayu di Lubang	213
Gambar 5.98 Mekanisme gaya yang bekerja pada sambungan tipe M9B1	214
Gambar 5.99 Pemasangan Pemegang Batang Baja Ulir	214
Gambar 5.100 Uji Tarik Kuat Tarik Ulir Batang Baja Berulir	215
Gambar 5.101 Kurva Beban-Peralihan Batang Baja Berulir	215
Gambar 5.102 Mekanisme gaya yang bekerja pada sambungan tipe M9B2	216

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Penurunan Rata-rata Kuat Kayu Per 1% Pertambahan Kadar Air [Bodig, 1993]	15
Tabel 2.2 Rentang dan Nilai Rata-rata Berat Jenis Kayu [Tjondro, 2007]	15
Tabel 3.2 Hasil Pengujian Sifat Fisik Kayu Akasia	65
Tabel 3.2 Hasil Pengujian Sifat Fisik Kayu Akasia (Lanjutan)	66
Tabel 3.3 Tegangan Leleh dan Modulus Elastisitas Batang baja Diameter 7,7 mm	92
Tabel 4.3. Rangkuman Hasil Pengujian Sambungan Momen Tipe M9B2	121
Tabel 5.1 Properti Kayu Umum Untuk Model Sambungan Momen	133
Tabel 5.2 Properti Kayu Tumpu Untuk Model Sambungan Momen	134
Tabel 5.3 Hasil Uji Kelompok 1, pada P=1,5 ton	154
Tabel 5.4 Hasil Uji Kelompok 2, pada P=1,5 ton	159
Tabel 5.5. Rangkuman Hasil Numerik Sambungan Momen Tipe M9B1	188
Tabel 5.6. Rangkuman Hasil Numerik Sambungan Momen Tipe M9B2	188
Tabel 5.7 Hasil Perhitungan <i>Equivalent Viscous Damping Ratio</i> ,%	209
Tabel 5.8 Hasil Perhitungan Degradasi Kekakuan Lateral	210
Tabel 5.9 Daktilitas Peralihan, μ_{Δ}	211
Tabel 5.10 Daktilitas Rotasi, μ_{ϕ}	211
Tabel 5.11 Rangkuman Hasil Uji Eksperimental Sambungan Momen Tipe M9B1	211

DAFTAR LAMPIRAN

L.1. PROPERTI MEKANIK KAYU UMUM	239
L.1. PROPERTI MEKANIK KAYU UMUM (LANJUTAN)	240
L.2. PROPERTI MEKANIK KAYU TUMPU	241
L.3. CONTOH PERHITUNGAN ANALISIS SAMBUNGAN	242
L.4. CONTOH PERHITUNGAN DISAIN SAMBUNGAN	244

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kayu adalah material yang mempunyai karakteristik positif seperti rendah penggunaan energi, menyerap CO₂ sehingga dapat mengurangi polusi, dan berkelanjutan (*sustainability*). Kayu memiliki berat jenis lebih ringan dibanding material baja dan beton, sehingga akan menguntungkan dalam segi pengangkutan, ereksi (*erection*), dan produksinya. Pondasi bangunan kayu lebih sederhana dalam pelaksanaan dan desainnya. Kayu material dengan massa yang ringan sehingga gaya inersia akibat beban gempa yang ditimbulkan relatif kecil. Dari segi arsitektural, kayu memiliki kualitas estetika yang baik dalam desain arsitektural. Kayu apabila diproduksi secara massal akan lebih murah (*low cost*) dibandingkan material beton dan baja [*Forest Product Laboratory, 2010*].

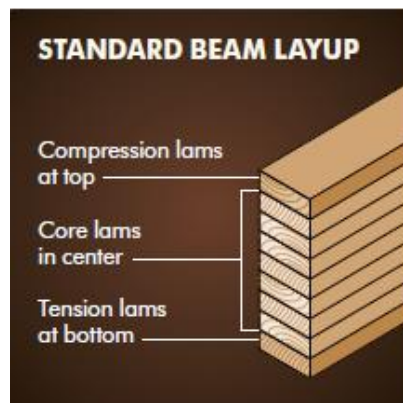
Kayu memiliki ratio kekuatan terhadap berat yang tinggi dan daya tahan yang baik sebagai bahan material. Kelebihan kayu diantaranya dapat menahan panas, meredam suara, dan penghantar listrik yang buruk. Kayu mudah dibentuk dan disambung menggunakan bahan perekat (lem), paku, sekrup, dan baut. Sebagai tambahan, kayu juga dapat menahan oksidasi, asam, air garam, dan bahan korosif lainnya [*Forest Product Laboratory, 2010*].

Kayu juga digunakan sebagai konstruksi jembatan sebelum dikembangkannya material beton dan baja. Kini penggunaan kayu sebagai bahan utama bangunan terus dikembangkan. Kayu dapat digunakan sebagai elemen

struktural seperti balok, kolom, pelat lantai, atap, dan lainnya [Thelandersson, S., and Larsen, H.J, 2003].

Ketersediaan kayu dari pohon dengan diameter penampang besar sudah sangat langka dan harganya relatif mahal. Oleh karena itu, untuk memenuhi kebutuhan industri dan konstruksi yang membutuhkan kayu berpenampang besar, muncul penemuan kayu rekayasa (*engineered wood product*), seperti kayu glulam (*glued laminated timber*), kayu laminasi silang (*cross laminted timber*), *Laminated Veneer Lumber (LVL)*, dan *Parallel Strand Lumber (PSL)*.

Kayu laminasi dibentuk dari kayu dengan dimensi-dimensi yang kecil dan direkatkan menggunakan lem, lihat gambar 1.1. atau menggunakan paku, baut, maupun kombinasi dari alat penyambung tersebut, lihat gambar 1.2.

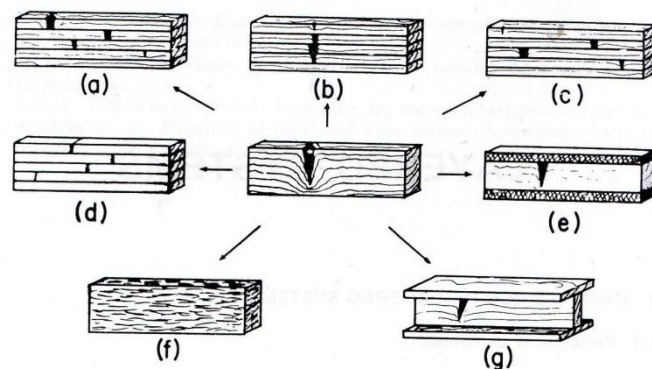


Gambar 1.1. Laminasi-laminasi Kayu yang Direkat dengan Bahan Adhesive Menjadi Glulam [APA,2010]

Struktur bangunan kayu dengan lantai lebih dari satu umumnya dimodelkan sebagai struktur rangka kaku penahan momen dengan elemen berupa balok dan kolom. Pemodelan tersebut memiliki konsekwensi, yaitu sambungan harus cukup rigid agar mampu menahan momen. Telah dikembangkan berbagai tipe sambungan yang direncanakan mampu menahan momen [Bohnhoff et.al (1987, 1988, 1989, 1992, 1997), Gecys, T. (2014), Hattar, C.F., Cheng, J.J.Roger.

(1995), Hendro. (2013), Kharouf, N., McClure, G., Smith, I. (2003), Scheibmair, Felix and Queneville, P. (2012)] yang pada umumnya masing-masing memiliki kelebihan dan juga kekurangan, khususnya dalam hal kemudahan pemasangan, momen maksimum yang mampu diterima dan daktilitas rotasi sambungan.

Disertasi ini membahas sambungan antara balok dan kolom, yang diharapkan berperilaku kaku, sambungannya dapat dibuat sederhana dan pengerjaannya tidak sulit. Untuk membantu agar sambungan berperilaku sebagaimana yang diharapkan, yaitu berperilaku rigid sehingga mampu menahan momen maka pada sambungan ini dipasang juga profil siku dan batang baja sebagai elemen penyalur gaya tarik dan gaya tumpu. Pemasangan dan konfigurasi batang baja sebagai penyalur gaya haruslah diatur sedemikian rupa agar diperoleh kinerja sambungan yang optimal.

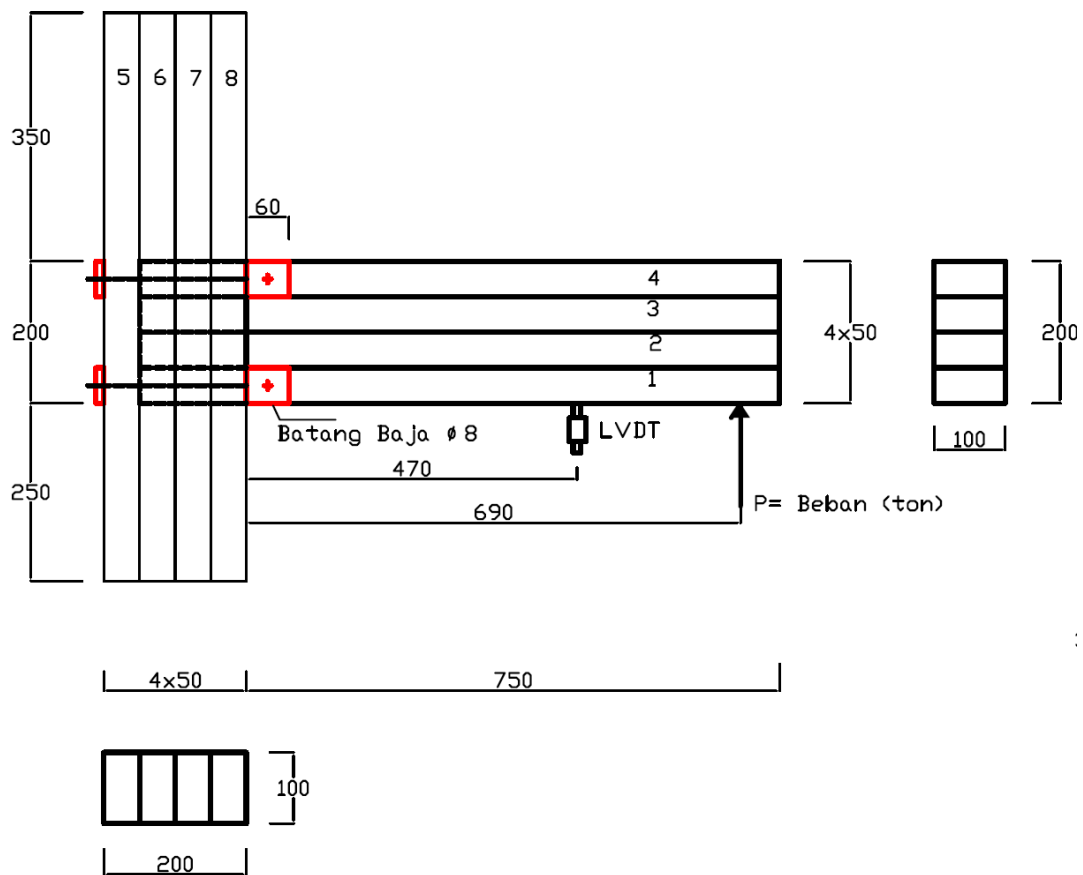


Gambar 1.2 Reorganisasi Kayu Utuh Menjadi Lamina-Lamina untuk Meningkatkan Efisiensi [Bodig, J., Jayne, B.A, 1993].

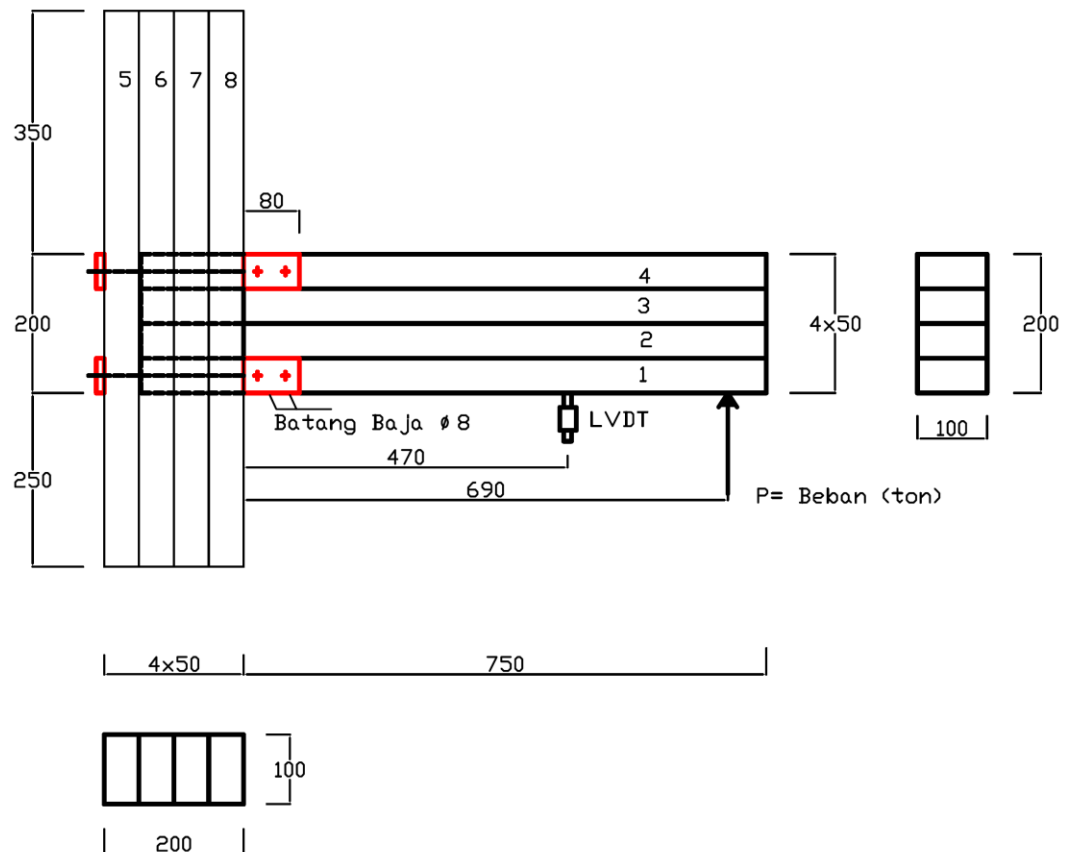
1.2 Tujuan Penelitian

Penelitian dalam Disertasi ini bertujuan untuk (1) melakukan uji eksperimental statik monotonik dan uji siklik dari sambungan balok-kolom eksterior kayu glulam akasia dengan sistim profil siku dan batang baja, dengan model dan ukuran seperti pada gambar 1.3 dan gambar 1.4, dan (2) melakukan simulasi numerik

metode elemen hingga dari model sambungan balok-kolom eksterior kayu glulam akasia tersebut, diharapkan model tersebut dapat mendekati perilaku model eksperimental, (3) menentukan besar kekuatan (strength), kekakuan (stiffness), *equivalent viscous damping ratio*, degradasi kekakuan dan daktilitas sebagai hasil uji dari sambungan.



Gambar 1.3 Model Sambungan Balok-kolom Eksterior Kayu Glulam Akasia dengan Sistem Profil Siku dan Batang Baja Tipe M9B1



Gambar 1.4 Model Sambungan Balok-Kolom Eksterior Kayu Glulam Akasia dengan Sistem Profil Siku dan Batang Baja Tipe M9B2

1.3 Ruang Lingkup Penelitian

Ruang lingkup penelitian dalam Disertasi ini dibatasi sebagai berikut:

1. Sambungan eksterior berarti lokasi sambungan terletak di kolom luar sistem rangka atau di salah satu sisi kolom, dan bukan berarti sambungan di ekspos terhadap cuaca. Bentuk penampang balok dan kolom adalah prismatis, artinya kekakuan sepanjang elemen tetap.
2. Balok glulam tanpa sambungan.
3. Laminasi dilakukan dengan menggunakan bahan *polyvinyl acetate* (PVA).
4. Sistem laminasi yang ditinjau adalah laminasi secara horisontal.

5. Laminasi balok-kolom disusun oleh lamina-lamina dengan jenis kayu seragam, dalam hal ini kayu akasia
6. Penelitian numerik dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak ANSYS [ANSYS, 2015] berbasis metode elemen hingga nonlinier.
7. Penelitian eksperimental dilakukan di laboratorium untuk mendapatkan data dan fakta empiris.
8. Kayu yang digunakan adalah kayu Akasia (*Acacia mangium*) dengan ukuran total penampang 100 mm x 200 mm, yang terdiri atas 4 lamina dengan ukuran masing-masing 50 mm x 100 mm
9. Tumpuan kolom adalah sendi-sendi dengan ujung balok bebas (*cantilever*)
10. Jenis pembebanan adalah beban terpusat P hingga benda uji runtuh (*failure*).
11. Alat uji statik monotonik menggunakan UTM-Hung Ta dan instrumen pembacaan output menggunakan *Dynamic Strain Recorder* dan *LVDT* di laboratorium Teknik Struktur Universitas Katolik Parahyangan Bandung. Untuk uji siklik, digunakan peralatan uji siklik di laboratorium teknik struktur PUSKIM Bandung.
12. Pengaruh friksi dan slip antar lamina-lamina kayu tidak ditinjau, artinya kontak antara lapisan kayu glulam dianggap *bonded*. Ini akan diverifikasi pada waktu uji eksperimen.

1.4 Perumusan Masalah

Sesuai dengan judul penelitian Disertasi yaitu Sambungan Balok-Kolom Eksterior Glulam Kayu Akasia dengan sistim profil siku dan batang baja, maka penelitian ini akan mempelajari dan menemukan beberapa hal, yaitu mengenai:

1. Interaksi batang baja dengan lamina kayu, yaitu kuat tumpu sejajar serat kayu. Batang baja dikencangkan dengan metode kencang pas (*snug-tight*).
2. Menentukan kuat momen maksimum yang bisa diterima sambungan..
3. Hubungan momen-rotasi sambungan, sehingga bisa diperoleh *equivalent viscous damping ratio*, kekakuan, degradasi kekakuan dan daktilitas sambungan.
4. Pembuatan simulasi model sambungan dengan menggunakan program elemen hingga.

1.5 Hipotesis

Hipotesis dalam penelitian perilaku sambungan dengan uji eksperimental statik monotonik dan uji eksperimental siklik dalam disertasi ini adalah sebagai berikut:

1. Mekanisme tarik akibat momen disalurkan oleh batang tarik, batang baja tumpu dan kuat tumpu sejajar serat kayu, sedang gaya lintang diterima oleh bagian balok yang masuk kedalam kolom, dan diterima oleh efek tumpu lamina kolom.
2. Diameter dan mutu kekuatan batang batang baja mempengaruhi perilaku kekuatan dan daktilitas sambungan balok-kolom.
3. Batang baja tarik merupakan material daktail, sehingga diharapkan dapat meningkatkan daktilitas struktur sambungan balok-kolom.

1.6 Keutamaan Penelitian

Tipe sambungan balok-kolom eksterior glulam akasia dengan sistim profil siku dan batang baja ini dipilih karena alasan-alasan berikut:

1. Model sambungan sederhana dan tidak rumit. Prinsip-prinsip kerja dalam menahan momen dan gaya lintang melalui mekanisme yang sederhana, seperti yang dijelaskan dalam hipotesis, pasal 1.5.1.
2. Sambungan momen ini mudah dikerjakan di lapangan, khususnya untuk bangunan struktur kayu satu dua tingkat dengan bentang yang menyesuaikan ukuran panjang kayu dasar di pasaran.

Motivasi penelitian ditujukan untuk mempelajari perilaku sambungan balok-kolom eksterior glulam akasia dengan sistem profil siku dan batang baja (penelitian eksperimental), yang kemudian dilakukan simulasi melalui pemodelan numerik berbasis metode elemen hingga nonlinier. Kinerja yang dimaksud disini adalah memiliki kekuatan, kekakuan dan daktilitas akibat pembebanan statik monoton dan siklik.

Penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi pada perkembangan ilmu pengetahuan dalam bentuk informasi baru mengenai hal-hal berikut:

1. Perbedaan perilaku sambungan akibat digunakannya batang baja tumpu dalam jumlah yang berbeda, yaitu satu dan dua batang baja.
2. Pengaruh kekuatan ulir batang baja tarik terhadap kekuatan sambungan.
3. Pengaruh tebal besi siku pada kekakuan dan kinerja sambungan
4. Perilaku siklis sambungan, daktilitas dan degradasi kekakuan sambungan sehubungan dengan uji siklik.
5. Pemodelan material, elemen dan geometri untuk keperluan kaji numerik pada struktur sambungan balok-kolom eksterior dengan sistem profil siku dan batang baja.

6. Usulan prosedur perhitungan analitis untuk memprediksi kekuatan sambungan balok-kolom eksterior kayu glulam akasia dengan sistem profil siku dan batang baja.

Penelitian ini diharapkan juga bermanfaat untuk para akademisi dan praktisi sebagai salah satu referensi dalam meneliti dan mendisain sambungan balok-kolom kayu glulam.

1.7 Metodologi Penelitian

Penelitian dalam Disertasi ini dikelompokkan menjadi empat tahap utama, lihat gambar 1.5. Tahap pertama adalah mengumpulkan literatur untuk mempelajari dasar teori dari masalah yang diteliti, sehingga diketahui tingkat orisinalitas penelitian. Dukungan literatur berasal dari buku, jurnal, publikasi ilmiah terkait lainnya, maupun penelitian numerik dan eksperimental pendahuluan. Tahap kedua adalah menyusun hipotesis, yaitu dugaan penyelesaian masalah. Tahap ketiga adalah mendapatkan bukti secara ilmiah melalui penelitian eksperimental dan penelitian numerik apakah hipotesis benar dan dapat menjadi fakta empiris. Tahap keempat adalah menyusun prosedur analitis untuk menghitung kekuatan sambungan berdasarkan perilaku sambungan yang diteliti.

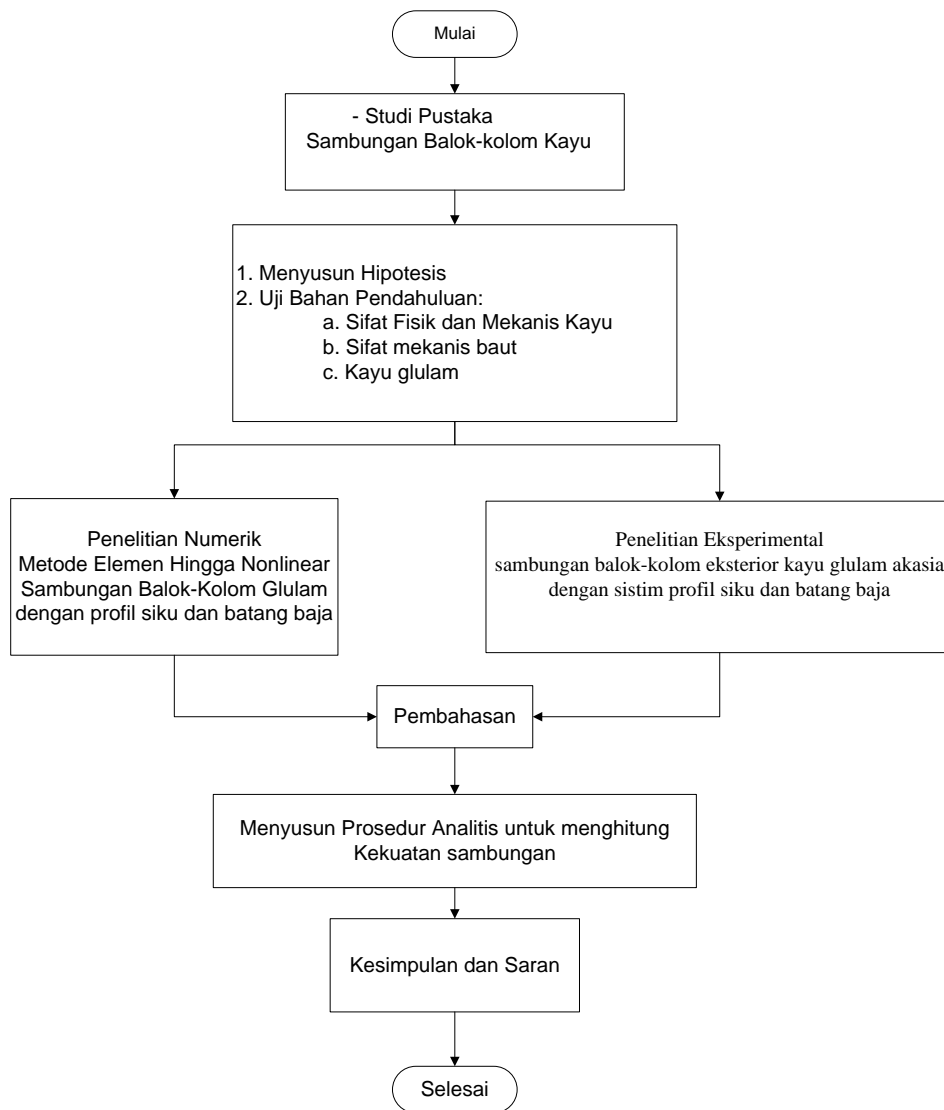
Untuk mendapatkan data primer yaitu sifat fisik kayu, sifat mekanis kayu, dan sifat mekanis baut yang digunakan sebagai data masukan dalam metode numerik, maka dilakukan terlebih dahulu penelitian eksperimental pendahuluan. Tata cara pengujian dipelajari menurut tata cara pengujian baku menurut *American Society for Testing Material* (ASTM) maupun dari para peneliti terdahulu.

Dipelajari juga peralatan yang digunakan dalam uji eksperimental, yaitu *Universal Testing Machine* (UTM), Pengukuran peralihan menggunakan *Linear Variable Differential Transformers* (LVDT), Regangan diukur menggunakan *Strain Gauges*, dan alat rekam data *Smart Dynamic Strain Recorder* (DC-104R). Peralatan uji siklik di laboratorium teknik struktur di PUSKIM Bandung. Jika dibutuhkan, akan dirancang dan dibuat peralatan pendukung (*attachment*) sesuai kebutuhan benda uji dan proses pengujian.

Untuk memperoleh data primer dari sifat fisik kayu, sifat mekanik kayu, dan sifat mekanis batang baja yang digunakan sebagai data masukan (properti bahan) dalam penelitian numerik, dilakukan uji experimental pendahuluan.

Pengujian besaran sifat fisik kayu pada benda uji bebas cacat meliputi berat jenis, modulus elastisitas, dan rasio poisson. Korelasi berat jenis kayu (*specifig gravity* atau SG) diteliti pengaruhnya terhadap besaran sifat mekanis kayu yaitu kuat tarik sejajar dan tegak lurus serat, kuat tekan sejajar dan tegak lurus serat, kuat tumpu sejajar dan tegak lurus serat. Pengujian besaran sifat mekanis batang baja dilakukan meliputi kuat tarik dan modulus elastisitas batang baja.

Analisis numerik metode elemen hingga nonlinear dilakukan untuk mempelajari perilaku sambungan balok-kolom glulam akasia dengan sistim profil siku dan batang baja.



Gambar 1.5 Garis Besar Diagram Alir Penelitian Disertasi