

**STUDI EKSPERIMENTAL DAN NUMERIKAL
PERILAKU LENTUR BALOK BOKS GLULAM**

TESIS



**Oleh:
Sutedjo Krisnadi
2015831004**

**Pembimbing:
Dr. Johannes Adhijoso Tjondro**

**PROGRAM MAGISTER TEKNIK SIPIL
SEKOLAH PASCASARJANA
UNIVERSITAS KATOLIK PARAHYANGAN
BANDUNG
JUNI 2017**

HALAMAN PENGESAHAN

**STUDI EKSPERIMENTAL DAN NUMERIKAL
PERILAKU LENTUR BALOK BOKS GLULAM**



**Oleh:
Sutedjo Krisnadi
2015831004**

Disetujui Untuk Diajukan Ujian Sidang pada Hari/Tanggal :

Pembimbing:

Dr. Johannes Adhijoso Tjondro

TES-PMTS
Kri
5/17
tes 1858

**PROGRAM MAGISTER TEKNIK SIPIL
SEKOLAH PASCASARJANA
UNIVERSITAS KATOLIK PARAHYANGAN
BANDUNG
JUNI 2017**

PERNYATAAN



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

Nama : Sutedjo Krisnadi
Nomor Pokok Mahasiswa : 2015831004
Program Studi : Magister Teknik Sipil
Sekolah Pascasarjana
Universitas Katolik Parahyangan

Menyatakan bahwa Tesis dengan judul :

Studi Eksperimental dan Numerikal Perilaku Lentur Balok Boks Glulam

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 : 12 Juni 2017



Sutedjo Krisnadi

STUDI EKSPERIMENTAL DAN NUMERIKAL PERILAKU LENTUR BALOK BOKS GLULAM

Sutedjo Krisnadi (NPM : 2015831004)
Pembimbing : Dr. Johannes Adhijoso Tjondro
Program Magister Teknik Sipil
Sekolah Pascasarjana
Universitas Katolik Parahyangan
Bandung
Juni 2017

ABSTRAK

Kayu solid sebagai bahan bangunan tersedia di pasaran dengan ukuran-ukuran penampang yang terbatas. Rekayasa kayu *glue-laminated* (glulam) adalah salah satu metode untuk memperbesar ukuran penampang dan kekuatan kayu. Dalam penelitian ini, kayu-kayu, yang terbatas ukuran penampangnya, disusun menjadi balok boks glulam. Balok boks glulam dalam penelitian ini dibuat dari kayu Albasia dan kombinasi kayu Meranti Albasia. Perilaku lentur balok-balok boks glulam diuji dengan metode *third point loading*. Uji perilaku lentur dilakukan dengan cara eksperimental dan numerikal. Analisis numerikal dilakukan dengan bantuan program komputer ANSYS. Beban desain menurut ANSYS untuk balok boks glulam Albasia adalah 20.772 kN dan untuk Meranti Albasia adalah 28.298 kN. Beban desain menurut uji eksperimental untuk balok boks glulam Albasia berbeda 3.99% dari hasil ANSYS-nya, sedangkan untuk Meranti Albasia berbeda 6.13%. Peningkatan kinerja lentur karena penggantian elemen-elemen balok dari kayu Albasia menjadi kayu Meranti adalah 36.23%. Perbedaan tegangan-tegangan normal serat terluar balok boks glulam antara uji eksperimental dan analisis numerikal adalah antara -14.61% sampai 3.02%. Untuk mendapatkan momen inersia balok boks glulam, pada perhitungan momen inersia balok boks solidnya diperlukan suatu faktor koreksi k. Balok boks glulam Albasia memerlukan faktor koreksi k sebesar 0.23, sedangkan kombinasi Meranti Albasia memerlukan faktor koreksi k sebesar 0.19. Penelitian ini juga menunjukkan bahwa untuk perilaku lentur balok boks glulam, program komputer ANSYS memberikan hasil analisis yang mendekati hasil uji eksperimental.

Kata kunci : glulam, boks, kuat lentur, Albasia, Meranti, ANSYS

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDY OF THE BENDING BEHAVIOUR OF GLULAM BOX BEAM

Sutedjo Krisnadi (NPM : 2015831004)
Advisor : Dr. Johannes Adhijoso Tjondro
Magister of Civil Engineering Program
Parahyangan Catholic University
Bandung
June 2017

ABSTRACT

Solid wood as a building material available in the market with limited cross section sizes. Glue-laminated (glulam) timber engineering is one of the methods to increase the cross section size and the strength of the wood. In this study, wood, which is cross section size limited, composed into glue laminated box beams. Glulam box beams in this study made of Albasia wood and the combination of Meranti Albasia wood. The bending behaviour of the glulam box beams were tested with the third point loading method. The bending behaviour test is done by means of experimental and numerical. Numerical analysis is carried out with the help of ANSYS computer program. The design load according to ANSYS for Albasia glulam box beam is 20.772 kN and for Meranti Albasia is 28.298 kN. The design load according to experimental test for Albasia glulam box beams is 3.99% different from the ANSYS results, and for Meranti Albasia is 6.13%. The improved of bending performance capacity due to the beam elements replacement from Albasia wood to Meranti wood is 36.23%. The difference of the glulam box beam outer fiber stresses between experimental tests and numerical analysis are between -14.61% to 3.02%. To get the moment of inertia of the glulam box beam, the calculation of the moment inertia of its solid box beam needs a correction factor k . Albasia glulam box beam requires correction factor $k=0.23$, and the combination of Meranti Albasia requires correction factor $k=0.19$. The study also suggests that for the glulam box beam bending behaviour, ANSYS computer program analysis result approximates to the experimental test result.

Keywords : glulam, box, bending capacity, Albasia, Meranti, ANSYS

KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa atas selesainya tesis berjudul *Studi Eksperimental dan Numerikal Perilaku Lentur Balok Boks Glulam*. Tesis ini adalah salah satu syarat akademik untuk menyelesaikan studi magister di Fakultas Pasca Sarjana Program Studi Teknik Sipil, Universitas Katolik Parahyangan.

Penyusunan tesis ini tidak akan terlaksana tanpa bantuan dari pihak-pihak lain. Penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Bapak Dr. Johannes Adhijoso Tjondro, selaku dosen pembimbing, yang telah banyak memberikan bimbingan dan masukan yang sangat membantu terselesaikannya tesis ini.
2. Bapak Prof. Bambang Suryoatmono, Ph.D., selaku dosen penguji, yang telah memberikan masukan-masukan berarti dalam penyelesaian tesis ini.
3. Bapak Dr. Paulus Karta Wijaya, selaku dosen penguji, yang telah memberikan masukan-masukan yang berarti dalam penyelesaian tesis ini dan, juga selaku Kepala Laboratorium Struktur Universitas Katolik Parahyangan, yang telah memberikan ijin untuk melakukan uji eksperimental di sana.
4. Bapak Teguh Farid Nurul Iman, ST. dan Bapak Markus Gunardi, selaku laboran dan teknisi, yang telah membantu melakukan uji mekanikal properti dan uji lentur balok boks glulam di laboratorium struktur Universitas Katolik Parahyangan.

5. Bapak Deni yang telah membantu pembuatan benda-benda uji, dari mulai sampel-sampel untuk uji properti mekanis sampai dengan balok-balok boks glulam.
6. Universitas Katolik Parahyangan dengan para staf dosen dan tata usahanya yang memfasilitasi dan membantu selama penulis menuntut ilmu sampai dengan penyusunan tesis ini.
7. Almarhum ayahanda Surianto Krisnadi yang tidak sempat menyaksikan penulis menyelesaikan program Magister ini.
8. Keluarga penulis yang telah membantu secara moril dan materil selama penyelesaian tesis ini.
9. Christian, Julius, Sandy, Nessa, Handi, Franky, rekan-rekan kuliah di program pasca sarjana yang selalu memberikan dukungan.
10. Pihak-pihak lain yang tidak dapat disebutkan satu per satu.

Karena terbatasnya waktu dan kemampuan penulis dalam menyusun tesis ini, penulis menyadari bahwa tesis ini masih jauh dari sempurna. Namun penulis berharap tesis ini dapat memberikan manfaat bagi pihak-pihak yang membacanya.

Bandung, 12 Juni 2017

Penulis,

Sutedjo Krisnadi

DAFTAR ISI

ABSTRAK

ABSTRACT

Kata Pengantar

DAFTAR ISI

DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN

DAFTAR GAMBAR

DAFTAR TABEL

BAB 1

Pendahuluan

1

1.1 Latar Belakang

1

1.2 Tujuan Penelitian

3

1.3 Ruang Lingkup Penelitian

4

1.4 Pembatasan Masalah

4

1.5 Metode Penelitian

5

1.6 Sistematika Penulisan

6

BAB 2

Studi Pustaka

9

2.1 Jenis-jenis Kayu

9

2.2 Sifat Material Kayu

10

2.3 Kriteria Hill

15

2.4 Kayu Glulam

17

2.5 Perekat Kayu

18

2.6 Kayu Albasia

19

	2.7	Kayu Meranti	20
	2.8	Balok dengan Beban Terpusat di Tengah	21
	2.9	Uji <i>Third Point Loading</i>	24
BAB 3		Uji Eksperimental	27
	3.1	Bahan-bahan dan Alat-alat	28
	3.2	Persiapan Bahan-bahan Kayu	30
	3.3	Uji <i>Specific Gravity</i> dan <i>Moisture Content</i>	31
	3.4	Properti Mekanis Kayu Albasia dan Kayu Meranti	36
	3.4.1	Uji Kuat Tekan Kayu Sejajar Serat	36
	3.4.2	Uji Kuat Tekan Kayu Tegak Lurus Serat	39
	3.4.3	Uji Kuat Geser Kayu	43
	3.4.4	Sifat Elastis Ortotropik Kayu	50
	3.4.5	Kriteria Hill	51
	3.4.6	Perilaku non-Linier Kayu Albasia dan Kayu Meranti	52
	3.5	Properti Mekanis Elemen Balok Boks Glulam	57
	3.6	Kuat Geser Perekat	65
	3.7	Pembuatan Balok Boks Glulam	68
	3.8	Uji Lentur Balok Boks Glulam	74
	3.9	Hasil Pengujian Lentur Balok Boks Glulam	78
	3.10	Analisis Hasil Pengujian Lentur Balok Boks Glulam	97
BAB 4		Studi Numerikal dan Perbandingan Hasil Uji	97
	4.1	<i>Engineering Data (ANSYS Workbench module)</i>	99
	4.2	<i>Geometry (ANSYS Workbench module)</i>	100

4.3	<i>Model (ANSYS Workbench module)</i>	101
4.4	<i>Geometry (Model module)</i>	102
4.5	<i>Construction Geometry (Model module)</i>	104
4.6	<i>Mesh (Model module)</i>	105
4.7	<i>Static Structural (Model module)</i>	106
4.8	<i>Chart (Model module)</i>	110
4.9	Analisis Lentur ANSYS untuk Balok Boks Glulam	111
4.10	Perbandingan Hasil Analisis Eksperimental dan ANSYS	115
4.11	Tegangan-tegangan pada P_{maks} menurut ANSYS	118
BAB 5	Kesimpulan dan Saran	121
5.1	Kesimpulan	121
5.2	Saran	122
	DAFTAR PUSTAKA	123

DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN

A'	= luas elemen penampang transformasi
A_i	= benda uji kayu Albasia ke-i
A_t	= luas total penampang
ANSYS	= <i>Analysis System</i>
APDL	= <i>ANSYS Parametric Design Language</i>
ASTM	= <i>American Society for Testing and Materials</i>
b	= lebar benda uji destruktif
b'	= lebar elemen penampang transformasi
BA	= balok boks glulam berbahan Albasia-Albasia
BA _i	= balok boks glulam berbahan Albasia-Albasia ke-i
BM	= balok boks glulam berbahan Meranti-Albasia
BM _i	= balok boks glulam berbahan Meranti-Albasia ke-i
CM	= faktor layanan basah menurut SNI 7973-2013
δ	= lendutan
δ_{maks}	= lendutan saat beban maksimal
δ_y	= lendutan saat tegangan normal leleh tercapai
ΔP_L	= selisih beban pada kondisi elastis
ΔP_T	= selisih beban pada kondisi inelastis
ΔY_L	= selisih lendutan pada kondisi elastis
ΔY_T	= selisih lendutan pada kondisi inelastis
DA _i	= benda uji destruktif kayu Albasia ke-i

dkk	= dan kawan-kawan
DMi	= benda uji destruktif kayu Meranti ke-i
ϵ_{yield}	= regangan normal saat tegangan normal leleh terjadi
E10	= kode mutu kayu dalam SNI 7973-2013
E14	= kode mutu kayu dalam SNI 7973-2013
E_{Θ}	= kemiringan pada grafik tegangan-regangan saat material dalam kondisi in-elastis
EAI	= benda uji kayu Albasia ke-i
E_L	= modulus elastisitas arah longitudinal
EMi	= benda uji kayu Meranti ke-i
E_R	= modulus elastisitas arah radial
E_{SB}	= modulus elastisitas yang didapat dari uji lentur statik
E_{SBi}	= modulus elastisitas akibat uji lentur statik dari beban ke-i
E_T	= modulus elastisitas arah tangensial
E_{tr}	= modulus elastisitas penampang transformasi
G_i	= benda uji kuat geser perekat ke-i
G_{LR}	= modulus geser bidang L arah R
G_{LT}	= modulus geser bidang L arah T
Glulam	= glue laminated
gr	= gram
gr/cm^3	= gram per sentimeter kubik
G_{RT}	= modulus geser bidang R arah T
h'	= tinggi elemen penampang transformasi
I	= momen inersia

I'_{elemen}	= momen inersia elemen transformasi
I_{tr}	= momen inersia penampang transformasi
I_x	= momen inersia arah sumbu x
K	= faktor koreksi luas penampang geser
k	= faktor koreksi momen inersia penampang balok boks glulam terhadap momen inersia penampang balok boks solid
l	= lebar benda uji
L	= longitudinal
L	= panjang bentang
L_1	= jarak beban terpusat ke tumpuan
LR	= longitudinal radial
LT	= longitudinal tangensial
$LVDT$	= <i>Linear Variable Differential Transformer</i>
mg	= miligram
mm	= milimeter
mm^2	= milimeter persegi
mm^3	= milimeter kubik
mm^4	= milimeter pangkat 4
M	= gaya dalam momen
M_i	= benda uji kayu Meranti ke-i
MC	= moisture content
MPa	= mega Pascal
M_{yield}	= momen saat beban P_{yield}
n	= perbandingan modulus elastisitas pada penampang transformasi

N	= newton
μ_{LR}	= rasio poisson arah LR
μ_{LT}	= rasio poisson arah LT
μ_{RL}	= rasio poisson arah RL
μ_{RT}	= rasio poisson arah RT
μ_{TL}	= rasio poisson arah TL
μ_{TR}	= rasio poisson arah TR
P	= beban terpusat
p	= panjang benda uji
P_1	= beban saat lendutan 1/300 bentang menurut analisa penampang transformasi pada hasil uji eksperimental
P_2	= beban batas lendutan 1/300 bentang menurut analisa penampang transformasi pada hasil analisa ANSYS
P_{maks}	= beban runtuh sesuai hasil uji eksperimental
P_{desain}	= beban kritis yang memenuhi syarat konstruksi
PVAc	= <i>polyvinyl acetate</i>
P_{yield}	= beban saat kondisi tegangan leleh tercapai
R	= radial
RT	= radial tangensial
R_{xx}	= perbandingan tegangan lentur arah x dengan tegangan acuan
R_{yy}	= perbandingan tegangan lentur arah y dengan tegangan acuan
R_{zz}	= perbandingan tegangan lentur arah z dengan tegangan acuan
R_{xy}	= perbandingan tegangan geser arah xy dengan tegangan acuan

R_{xz}	= perbandingan tegangan geser arah xz dengan tegangan acuan
R_{yz}	= perbandingan tegangan geser arah yz dengan tegangan acuan
σ_0	= tegangan normal leleh acuan
σ_a	= tegangan normal serat teratas balok pada uji lentur
σ_b	= tegangan normal serat terbawah balok pada uji lentur
σ_{LL}	= tegangan tekan arah longitudinal
σ_{RR}	= tegangan tekan arah radial
σ_{tarik}	= tegangan normal tarik serat terluar penampang
σ_{tekan}	= tegangan normal tekan serat terluar penampang
σ_{TT}	= tegangan tekan arah tangensial
σ_x^Y	= tegangan leleh tekan arah sumbu x
σ_y	= tegangan leleh
σ_{yield}	= tegangan leleh
σ_{yL}	= tegangan leleh tekan sejajar serat
σ_{yR}	= tegangan leleh tekan tegak lurus serat arah radial
σ_{yT}	= tegangan leleh tekan tegak lurus serat arah tangensial
σ_y^Y	= tegangan leleh tekan arah sumbu y
σ_z^Y	= tegangan leleh tekan arah sumbu z
sbb	= sebagai berikut
SG	= <i>specific gravity</i>
SNI	= Standar Nasional Indonesia
$\tau_{Albasia-Albasia}$	= kuat geser perekat kayu Albasia ke Albasia

τ_{LT}	= tegangan geser maksimal arah LT
τ_{LR}	= tegangan geser maksimal arah LR
$\tau_{Meranti-Meranti}$	= kuat geser perekat kayu Meranti ke Meranti
$\tau_{Meranti-Albasia}$	= kuat geser perekat kayu Meranti ke Albasia
τ_{RT}	= tegangan geser arah RT
τ_{xy}^Y	= tegangan leleh geser arah xy
τ_{xz}^Y	= tegangan leleh geser arah xz
τ_{yz}^Y	= tegangan leleh geser arah yz
t	= tebal/tinggi benda uji
T	= tangensial
UTM	= <i>Universal Testing Machine</i>
v	= volume benda uji
w	= berat benda uji
y	= jarak titik berat elemen ke titik berat penampang
y_a	= jarak serat paling atas balok ke titik berat arah sumbu y
y_b	= jarak serat paling bawah balok ke titik berat arah sumbu y
y_{tarik}	= jarak serat tarik terluar balok ke titik berat penampang
y_{tekan}	= jarak serat tekan terluar balok ke titik berat penampang

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Boks Glulam	3
Gambar 1.2 Bagan Alir Penelitian	7
Gambar 2.1 Distorsi pada Kayu (Porteous, dkk., 2007)	11
Gambar 2.2 Arah Pemotongan Kayu terhadap Serat (Glass, dkk., 2010)	11
Gambar 2.3 Ortogonalitas Kayu (Thelandersson, dkk., 2003)	12
Gambar 2.4 Sifat Elastis - Inelastis Kayu (Holmberg, dkk., 1998)	15
Gambar 2.5 Kayu Glulam (Porteous, dkk., 2007)	18
Gambar 2.6 Balok dengan Beban Terpusat di Tengah	21
Gambar 2.7 Balok <i>Four-Point Loading</i>	24
Gambar 3.1 <i>Universal Testing Machine</i> (UTM)	29
Gambar 3.2 Pengukur Kadar Air Kayu Lignomat	29
Gambar 3.3 Papan Kayu Albasia dan Meranti dalam Proses Pengeringan	30
Gambar 3.4 Penimbangan Benda Uji untuk <i>Specific Gravity</i>	32
Gambar 3.5 Benda Uji Kuat Tekan Sejajar Serat	37
Gambar 3.6 Grafik Tegangan-Regangan Uji Kuat Tekan Sejajar Serat Kayu Albasia	38
Gambar 3.7 Grafik Tegangan-Regangan Uji Kuat Tekan Sejajar Serat Kayu Meranti	38
Gambar 3.8 Grafik Tegangan-Regangan Uji Kuat Tekan Tegak Lurus Serat Arah Radial Kayu Albasia	40
Gambar 3.9 Grafik Tegangan-Regangan Uji Kuat Tekan Tegak Lurus Serat Arah Radial Kayu Meranti	40
Gambar 3.10 Grafik Tegangan-Regangan Uji Kuat Tekan Tegak Lurus Serat Arah Tangensial Kayu Albasia	42

Gambar 3.11 Grafik Tegangan-Regangan Uji Kuat Tekan	
Tegak Lurus Serat Arah Tangensial Kayu Meranti	42
Gambar 3.12 Benda Uji Kuat Geser Bidang LR, LT, dan RT	43
Gambar 3.13 Benda Uji Kuat Geser Bidang LR Kayu Meranti	43
Gambar 3.14 Grafik Beban-Deformasi Kuat Geser Bidang LT	
Kayu Albasia	44
Gambar 3.15 Grafik Beban-Deformasi Kuat Geser Bidang LR	
Kayu Albasia	45
Gambar 3.16 Grafik Beban-Deformasi Kuat Geser Bidang RT	
Kayu Albasia	46
Gambar 3.17 Grafik Beban-Deformasi Kuat Geser Bidang LT	
Kayu Meranti	47
Gambar 3.18 Grafik Beban-Deformasi Kuat Geser Bidang LR	
Kayu Meranti	48
Gambar 3.19 Grafik Beban-Deformasi Kuat Geser Bidang RT	
Kayu Meranti	49
Gambar 3.20 Uji Lentur Destruktif	53
Gambar 3.21 Pencatatan Hasil Uji Lentur Destruktif	53
Gambar 3.22 Grafik Beban-Deformasi Uji Lentur Destruktif	
Kayu Albasia	54
Gambar 3.23 Grafik Beban-Deformasi Uji Lentur Destruktif	
Kayu Meranti	54
Gambar 3.24 Grafik Regangan-Tegangan Bilinier Hasil Uji	
Destruktif Kayu Albasia dan Kayu Meranti	57
Gambar 3.25 Benda Uji Kuat Geser Perekat Bidang LR-LR dan LR-LT	66
Gambar 3.26 Penampang Balok Boks Glulam	68

Gambar 3.27 Aplikasi Perekat PVAc pada Elemen-elemen Balok	71
Gambar 3.28 Penge- <i>press</i> -an Komponen-komponen Balok	71
Gambar 3.29 Proses Pembuatan Balok Boks Glulam	72
Gambar 3.30 Balok-balok Boks Glulam Siap Diuji	74
Gambar 3.31 Sketsa Pembebanan Uji Lentur Balok	75
Gambar 3.32 Pengujian Balok BA1	76
Gambar 3.33 Pengujian Balok BA2	76
Gambar 3.34 Pengujian Balok BA3	76
Gambar 3.35 Pengujian Balok BM1	77
Gambar 3.36 Pengujian Balok BM2	77
Gambar 3.37 Pengujian Balok BM3	77
Gambar 3.38 Grafik Beban-Lendutan Balok BA1	78
Gambar 3.39 Sketsa Pola Keruntuhan Balok BA1	78
Gambar 3.40 Pola Keruntuhan pada Balok BA1	79
Gambar 3.41 Grafik Beban-Lendutan Balok BA2	80
Gambar 3.42 Sketsa Pola Keruntuhan Balok BA2	80
Gambar 3.43 Pola Keruntuhan pada Balok BA2	81
Gambar 3.44 Grafik Beban-Lendutan Balok BA3	82
Gambar 3.45 Sketsa Pola Keruntuhan Balok BA3	82
Gambar 3.46 Pola Keruntuhan pada Balok BA3	83
Gambar 3.47 Grafik Beban-Lendutan Balok BM1	84
Gambar 3.48 Sketsa Pola Keruntuhan Balok BM1	84
Gambar 3.49 Pola Keruntuhan pada Balok BM1	85
Gambar 3.50 Grafik Beban-Lendutan Balok BM2	86
Gambar 3.51 Sketsa Pola Keruntuhan Balok BM2	86
Gambar 3.52 Pola Keruntuhan pada Balok BM2	87

Gambar 3.53 Grafik Beban-Lendutan Balok BM3	88
Gambar 3.54 Sketsa Pola Keruntuhan Balok BM3	88
Gambar 3.55 Pola Keruntuhan pada Balok BM3	89
Gambar 3.56 Penampang Transformasi Balok BA1	91
Gambar 3.57 Grafik Tegangan-Regangan Bilinier Kayu Albasia dan Meranti dari Hasil Uji Lentur Bahan dan Uji Lentur Balok Boks Glulam	96
Gambar 4.1 <i>ANSYS Workbench</i>	97
Gambar 4.2 <i>Module Static Structural</i> dalam <i>ANSYS Workbench</i>	98
Gambar 4.3 Input Data Material	99
Gambar 4.4 Penampang Balok Boks Glulam	100
Gambar 4.5 Balok Boks Glulam Secara Perspektif	100
Gambar 4.6 <i>Model ANSYS</i>	101
Gambar 4.7 Pemilihan Jenis Kayu untuk Elemen	103
Gambar 4.8 <i>Commands APDL</i> Sifat Ortotropik Kayu	103
Gambar 4.9 <i>Construction Geometry</i>	104
Gambar 4.10 <i>Meshing</i> pada Balok Boks Glulam	105
Gambar 4.11 <i>Analysis Setting</i> pada Balok Boks Glulam	106
Gambar 4.12 Tumpuan Rol pada Balok Boks Glulam	107
Gambar 4.13 Tumpuan Sendi pada Balok Boks Glulam	107
Gambar 4.14 Beban pada Balok Boks Glulam	108
Gambar 4.15 Tegangan Normal Arah Sumbu Z	108
Gambar 4.16 Tegangan Geser Bidang YZ	109
Gambar 4.17 Lendutan Arah Sumbu Y	109
Gambar 4.18 Konvergensi pada Lendutan	109
Gambar 4.19 Lendutan pada <i>Path</i> Arah Sumbu Y	110

Gambar 4.20 Grafik Beban versus Lendutan Tengah Bentang	110
Gambar 4.21 Grafik Beban-Lendutan Balok BA1	111
Gambar 4.22 Grafik Beban-Lendutan Balok BA2	111
Gambar 4.23 Grafik Beban-Lendutan Balok BA3	112
Gambar 4.24 Grafik Beban-Lendutan Balok BM1	112
Gambar 4.25 Grafik Beban-Lendutan Balok BM2	113
Gambar 4.26 Grafik Beban-Lendutan Balok BM3	113

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Nilai Desain dan Modulus Elastisitas Acuan (SNI 7973-2013)	10
Tabel 2.2 Rasio Modulus Elastisitas dan Modulus Geser terhadap Modulus Elastisitas Longitudinal (Kretschmann, dkk., 2010)	14
Tabel 2.3 Faktor Koreksi Luas Penampang Geser (Cook, dkk., 1999)	22
Tabel 3.1. Hasil Uji <i>Specific Gravity</i> dan <i>Moisture Content</i>	33
Tabel 3.2 Hasil Uji Kuat Tekan Sejajar Serat Kayu Albasia	37
Tabel 3.3 Hasil Uji Kuat Tekan Sejajar Serat Kayu Meranti	37
Tabel 3.4 Hasil Uji Kuat Tekan Tegak Lurus Serat Arah Radial Kayu Albasia	39
Tabel 3.5 Hasil Uji Kuat Tekan Tegak Lurus Serat Arah Radial Kayu Meranti	39
Tabel 3.6 Hasil Uji Kuat Tekan Tegak Lurus Serat Arah Tangensial Kayu Albasia	41
Tabel 3.7 Hasil Uji Kuat Tekan Tegak Lurus Serat Arah Tangensial Kayu Meranti	41
Tabel 3.8 Hasil Uji Kuat Geser Bidang LT Kayu Albasia	44
Tabel 3.9 Hasil Uji Kuat Geser Bidang LR Kayu Albasia	45
Tabel 3.10 Hasil Uji Kuat Geser Bidang RT Kayu Albasia	46
Tabel 3.11 Hasil Uji Kuat Geser Bidang LT Kayu Meranti	47
Tabel 3.12 Hasil Uji Kuat Geser Bidang LR Kayu Meranti	48
Tabel 3.13 Hasil Uji Kuat Geser Bidang RT Kayu Meranti	49

Tabel 3.14 Sifat Elastis Ortotropik Kayu Albasia	50
Tabel 3.15 Sifat Elastis Ortotropik Kayu Meranti	50
Tabel 3.16 Kriteria Hill Kayu Albasia	51
Tabel 3.17 Kriteria Hill Kayu Meranti	51
Tabel 3.18 Ukuran Kayu Albasia Untuk Uji Lentur Destruktif	52
Tabel 3.19 Ukuran Kayu Meranti Untuk Uji Lentur Destruktif	52
Tabel 3.20 Analisis Hasil Uji Lentur Destruktif Kayu Albasia	55
Tabel 3.21 Analisis Hasil Uji Lentur Destruktif Kayu Meranti	56
Tabel 3.22 Perilaku Bilinier Kayu Albasia dan Kayu Meranti dengan Tegangan Desain Acuan dari SNI 7973-2013	57
Tabel 3.23 Hasil dan Analisis Uji Lentur non-Destruktif Elemen-elemen Balok Boks Glulam	59
Tabel 3.24 Sifat Elastis Ortotropik Elemen-elemen Balok Boks Glulam	62
Tabel 3.25 Perilaku Bilinier Elemen-elemen Balok Boks Glulam	64
Tabel 3.26 Hasil Uji Kuat Geser Perekat pada Albasia LR-Albasia LR	66
Tabel 3.27 Hasil Uji Kuat Geser Perekat pada Meranti LR-Meranti LR	66
Tabel 3.28 Hasil Uji Kuat Geser Perekat pada Albasia LR-Albasia LT	66
Tabel 3.29 Hasil Uji Kuat Geser Perekat pada Meranti LR-Albasia LT	67
Tabel 3.30 Komposisi Elemen Balok BA1	69
Tabel 3.31 Komposisi Elemen Balok BA2	69
Tabel 3.32 Komposisi Elemen Balok BA3	69
Tabel 3.33 Komposisi Elemen balok BM1	70
Tabel 3.34 Komposisi Elemen balok BM2	70
Tabel 3.35 Komposisi Elemen balok BM3	70
Tabel 3.36 Dimensi Elemen-elemen Balok-balok Boks Glulam	73

Tabel 3.37 Hasil Pengujian Lentur Balok-balok Boks Glulam	90
Tabel 3.38 Analisis Balok BA1 dengan Penampang Transformasi	92
Tabel 3.39 Analisis Balok-balok Uji dari Data Hasil Eksperimental dengan Metode Penampang Transformasi	93
Tabel 3.40 Tegangan-tegangan Normal Balok-balok Uji dari Data Hasil Eksperimental pada Serat-serat Terluar pada Beban P_1	94
Tabel 3.41 Peningkatan Kinerja Lentur Balok karena Jenis Kayu Berbeda pada Beban P_1	94
Tabel 3.42 Daktilitas Balok-balok Uji akibat Beban Lentur	94
Tabel 3.43 Perilaku Bilinier pada Serat Terluar Balok Boks Glulam ⁹⁵	
Tabel 4.1 Analisis Balok-balok Uji dari Hasil ANSYS	114
Tabel 4.2 Tegangan-tegangan Normal Balok-balok Uji dari Hasil ANSYS pada Serat-serat Terluar pada Beban P_1	115
Tabel 4.3 Perbandingan Faktor Koreksi, k	115
Tabel 4.4 Perbandingan Momen Inersia Penampang Transformasi	116
Tabel 4.5 Perbandingan Tegangan-tegangan Normal pada Serat Terluar pada Beban P_1 menurut Metode Penampang Transformasi	116
Tabel 4.6 Perbandingan P_{desain} Hasil Uji Eksperimental dan ANSYS	117
Tabel 4.7 Perbandingan P_{desain} Rata-rata Hasil Uji Eksperimental dan ANSYS	117
Tabel 4.8 Peningkatan Kinerja Lentur Balok karena Jenis Kayu Berbeda pada Beban P_2	118
Tabel 4.9 Tegangan-tegangan pada P_{maks} menurut ANSYS	119

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kayu telah digunakan sebagai bahan bangunan sejak ribuan tahun yang lalu. Kayu dan batu adalah bahan-bahan dari alam yang pertama kali dipergunakan manusia sebagai bahan-bahan pembuat bangunan.

Kayu sebagai bahan bangunan memberi beberapa keuntungan, yaitu :

- Rasio kekuatan dan berat sendiri yang cukup tinggi dibandingkan dengan material beton atau baja
- Pengerjaan yang mudah, termasuk apabila ada perbaikan
- Memberikan aspek arsitektural yang baik.

Kayu adalah bahan organik yang berasal dari alam dan dapat diperbaharui. Kayu bersifat non-homogen dan terbentuk dari sel-sel memanjang. Sel-sel pembentuk kayu ini tersusun secara teratur dan terikat satu sama lain membentuk satu kesatuan yang solid.

Kekuatan kayu sangat dipengaruhi oleh umur kayu, kadar air, dan jenis pohon asalnya. Semakin tua umur tumbuhan, semakin kuat kayu yang dihasilkannya. Semakin rendah kadar airnya, semakin kuat kayu tersebut. Jenis pohon yang ribuan macamnya akan menghasilkan jenis-jenis dan sifat-sifat kayu yang berbeda.

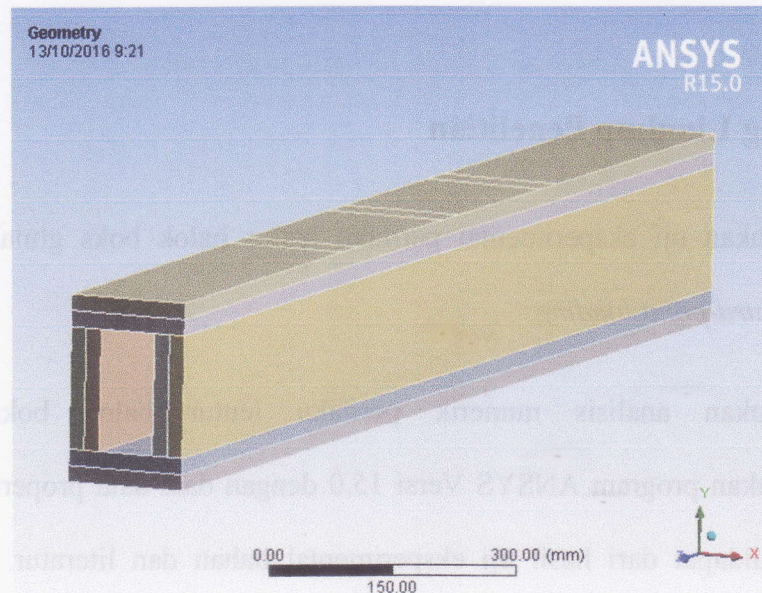
Kekuatan kayu tergantung pada umur masing-masing bagian dari pohon asalnya. Kekuatan dan sifat kayu pada suatu potongan tidak akan sama di tiap-tiap lokasi. Sifat material kayu seperti ini disebut non-homogen.

Material kayu tersusun dari serat-serat ke satu arah memanjang. Sifat material kayu akan berbeda untuk masing-masing arah dibandingkan dengan sifat arah memanjangnya. Sifat material kayu seperti ini disebut anisotropik.

Sifatnya yang non-homogen dan anisotropik menjadikan material kayu sulit diprediksi kekuatannya sebagai bahan bangunan secara akurat. Desain kekuatan material kayu lebih banyak dilakukan dengan berbagai penyederhanaan dan pendekatan pada sifat materialnya.

Dimensi dan penampang material kayu yang tersedia di pasaran tergantung dari jenis dan umur pohon asalnya. Ukuran-ukuran penampang solid material kayu menjadi terbatas. Kebutuhan ukuran penampang kayu yang lebih besar dapat direkayasa dengan teknik perekatan antar material kayu yang disebut kayu glulam (*glue laminated timber*). Untuk menghasilkan penampang kayu yang lebih efisien dapat juga dengan membuat penampang tersusun seperti I, Box, T, dll.

Tesis ini akan membahas penampang boks yang tersusun dari kayu glulam 2 lapis ditinjau terhadap perilaku lenturnya, seperti terlihat pada gambar 1.1. Hasil uji eksperimental penampang boks ini akan dibandingkan dengan analisis numerikal dengan mempergunakan program ANSYS. Sifat material kayu dalam analisis numerik penelitian ini disederhanakan menjadi homogen, ortotropik, dan bilinier.



Gambar 1.1 Boks Glulam

1.2 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan :

- Menganalisis perilaku lentur balok boks glulam dengan metode uji *third point loading*.
- Meninjau pengaruh dari penggantian serat teratas dan serat terbawah (*flange/sayap*) balok boks glulam dengan kayu bermutu berbeda terhadap perilaku lentur. Dalam penelitian ini serat teratas dan serat terbawah balok boks glulam dibandingkan antara kayu Albasia dan kayu Meranti.
- Membandingkan hasil uji eksperimental perilaku lentur balok boks glulam dengan analisis numerikal mempergunakan program ANSYS.

1.3 Ruang Lingkup Penelitian

Melakukan uji eksperimental perilaku lentur balok boks glulam dengan metode uji *third-point loading*.

Melakukan analisis numerik perilaku lentur balok boks glulam mempergunakan program ANSYS Versi 15.0 dengan data-data properti mekanis kayu yang didapat dari hasil uji eksperimental bahan dan literatur. Data-data properti mekanis kayu yang dipergunakan disederhanakan menjadi homogen, ortotropik, dan grafik tegangan-regangannya diasumsikan bilinear.

Melakukan perbandingan hasil analisis perilaku lentur balok boks glulam metode uji *third point loading* program ANSYS dengan hasil uji eksperimentalnya.

1.4 Pembatasan Masalah

Studi ini mempunyai beberapa pembatasan, yaitu :

1. Sifat elastis ortotropik kayu didapat dari uji tekan sejajar serat dengan benda uji berukuran *secondary method* (ASTM D143-09), yang menghasilkan besaran modulus elastisitas E_L yang berbeda dengan modulus elastisitas yang didapat dari hasil uji lentur.
2. Data modulus elastisitas longitudinal, E_L , masing-masing kayu disamakan dengan modulus elastisitas dari uji lentur, E_{SB} , yang diuji dengan analisis

- balok sederhana dengan beban terpusat di tengah dan dianalisis secara isotropik.
3. Kayu dianggap sebagai material yang homogen dan bersifat ortotropik.
 4. Kurva tegangan-regangan material kayu diasumsikan bilinear.
 5. Arah serat kayu dianggap ortogonal terhadap arah radial dan tangensialnya.
 6. Perekat kayu diasumsikan tidak slip selama perilaku lentur balok masih elastis.
 7. Tidak ada *lateral torsional buckling* karena bentuk penampang boks yang seimbang antara tinggi dan lebarnya, yaitu 230mm x 150mm.
 8. Tidak ada *web buckling* karena *web*/ badan boks dibuat tebal, yaitu 40mm sampai 50mm dengan tinggi 150mm.
 9. Sampel uji masing-masing kombinasi balok boks glulam berjumlah 3.

1.5 Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan dalam penulisan tesis ini, adalah :

1. Melakukan studi pustaka, melakukan studi awal, menentukan kombinasi kayu penampang balok boks glulam yang akan diuji.
2. Melakukan pengujian bahan untuk mendapatkan properti mekanis kayu, digabung dengan data-data dari literatur.
3. Mempersiapkan benda uji balok boks glulam dengan bahan kayu Albasia-Albasia dan kombinasi kayu Albasia-Meranti.
4. Melakukan pengujian lentur balok boks glulam dengan metode uji *third point loading* dan mencatat hasil ujinya.

5. Melakukan analisis numerikal dengan data-data hasil uji bahan dan literatur.
6. Membandingkan hasil uji eksperimental dan hasil analisis numerikal.
7. Membuat kesimpulan dan saran.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan terdiri dari 5 bab, yaitu :

BAB 1 Pendahuluan

Menjelaskan latar belakang penulisan tesis, tujuan penelitian, ruang lingkup penelitian, pembatasan masalah, metode penelitian, dan sistematika penulisan.

BAB 2 Studi Pustaka

Menjabarkan teori-teori yang mendukung tesis ini.

BAB 3 Uji Eksperimental

Menjelaskan persiapan benda-benda uji, pelaksanaan pengujian, menganalisis hasil-hasil uji bahan dan uji lentur balok boks glulam.

BAB 4 Studi Numerikal dan Perbandingan Hasil Uji

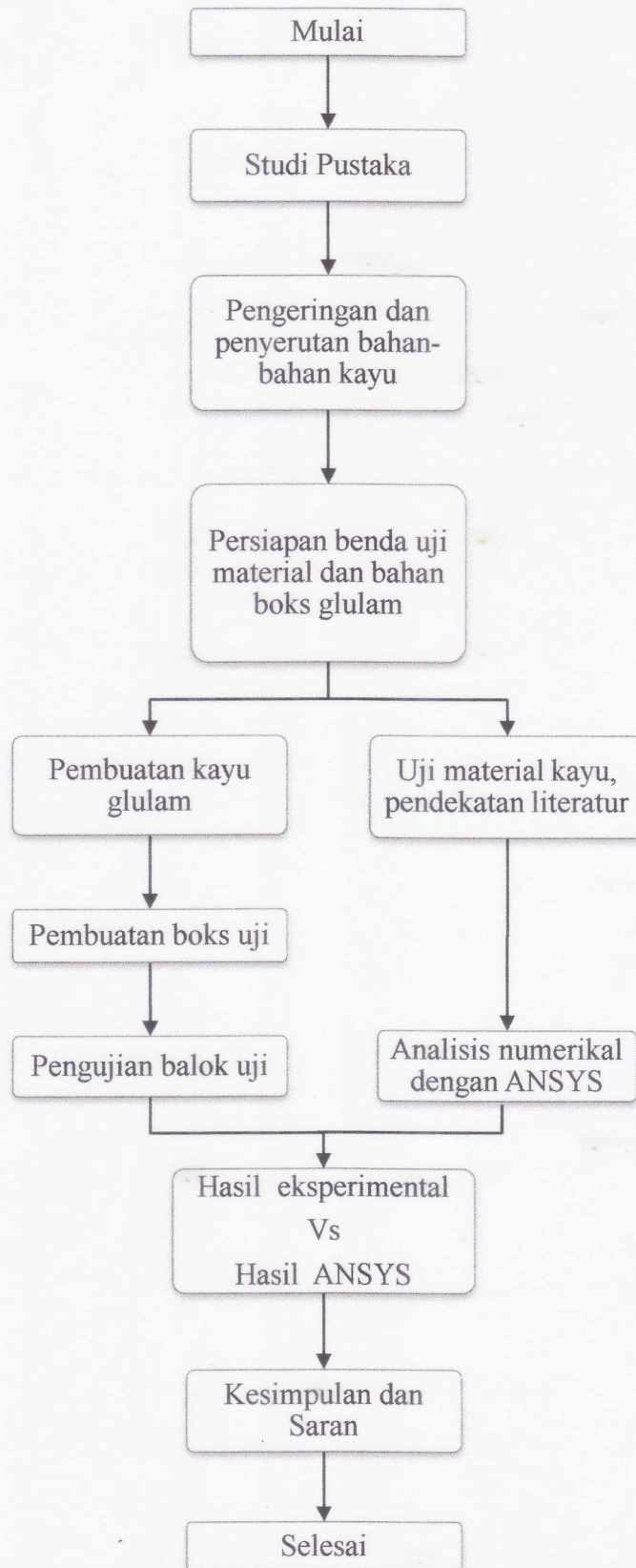
Menjelaskan proses input program ANSYS untuk analisis balok boks glulam.

Membandingkan hasil analisis numerikal ANSYS dengan hasil uji eksperimental.

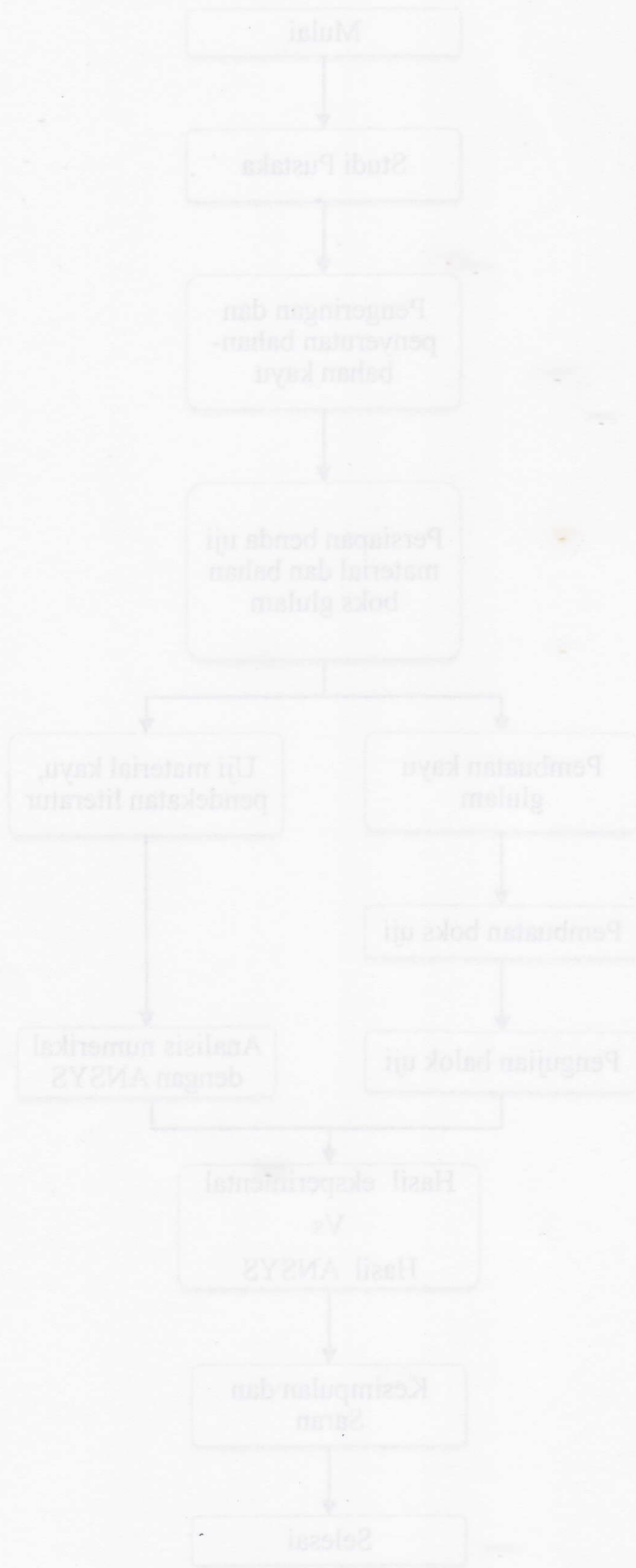
BAB 5 Kesimpulan dan Saran

Membuat kesimpulan atas hasil penelitian tesis. Memberi saran-saran.

Alir penelitian dari tesis dituangkan pada gambar 1.2 berikut :



Gambar 1.2 Bagan Alir Penelitian



Gambar 1.3 Bagan Alir Penelitian