

## DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR .....	v
DAFTAR ISI.....	vi
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR GAMBAR .....	xi
DAFTAR LAMBANG .....	xiv
INTISARI.....	xvi
<i>ABSTRACT</i> .....	xvii
BAB 1 PENDAHULUAN .....	1
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Rumusan Masalah .....	2
1.3. Tujuan Penelitian.....	2
1.4. Manfaat Penelitian.....	2
1.5. Batasan Masalah.....	3
1.6. Keaslian Penelitian .....	3
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA .....	4
2.1. LVL Sengon .....	4
2.2. Kegagalan Lentur Kayu.....	5
2.3. Model Konstitutif Kayu.....	6
2.4. Model Plastis Kayu .....	8
2.5. Eksperimen Balok Non-Prismatis .....	9
2.6. Pemodelan Numerik Balok Non-Prismatis .....	12
BAB 3.LANDASAN TEORI.....	14
3.1. Material Orthotropik.....	14

3.2.	Analisis Elemen Hingga .....	17
3.3.	Elemen <i>Isoparametrik Quadrilateral</i> .....	17
3.4.	<i>Strain Matrix</i> .....	20
3.5.	Matriks kekakuan elemen ( <i>Stiffness matrix</i> ) .....	21
3.6.	Integrasi <i>Gauss Quadratur</i> .....	21
3.7.	<i>Element Force Vector</i> .....	22
3.8.	<i>Yield Function</i> dan <i>Flow Rule</i> .....	23
3.9.	<i>Hill's Yield Function</i> .....	23
3.10.	Hubungan tegangan regangan inkremental.....	25
3.11.	Ekstrapolasi tegangan dan regangan.....	28
3.12.	<i>Tsai Hill Failure Criterion</i> .....	29
BAB 4 METODE PENELITIAN.....		31
4.1	Umum.....	31
4.2	Tahapan Penelitian .....	32
4.3	Peralatan Penelitian .....	33
4.4	Pemodelan Material LVL Sengon .....	33
4.5	Tes Konvergensi <i>Meshing</i> .....	37
4.6	Pemodelan Geometri Balok LVL Non-Prismatis.....	39
4.7	Inkrementasi Beban dan Regangan .....	41
4.8	Penyelesaian Persamaan Kesetimbangan .....	42
4.9	Diagram Alir Pemrograman .....	43
BAB 5 HASIL DAN PEMBAHASAN.....		65
5.1	Deformasi Model.....	65
5.2	Respon Beban-Regangan .....	68
5.3	Respon Beban-Perpindahan.....	66

5.4	Kontur Tegangan dan Regangan .....	69
5.5	Distribusi Tegangan dan Regangan Penampang .....	72
BAB 6 KESIMPULAN DAN SARAN .....		78
6.1.	Kesimpulan.....	78
6.2.	Saran .....	78
DAFTAR PUSTAKA .....		80
LAMPIRAN.....		84
Lampiran 1 Validasi Perhitungan Manual .....		84
Lampiran 2 Listing Main Program (Q4_PLANE_STRESS.m).....		90
Lampiran 3 Listing Program (Input.m).....		93
Lampiran 4 Listing Program (Q4_mesh.m) .....		94
Lampiran 5 Listing Program (boundary_condition.m ) .....		96
Lampiran 6 Listing Program (count_free_DOF.m ) .....		96
Lampiran 7 Listing Program (bodyforce.m) .....		96
Lampiran 8 Listing Program (stiffness_matrix.m).....		98
Lampiran 9 Listing Program (stress_strain_gauss_point.m) .....		99
Lampiran 10 Listing Program (nodal_average.m).....		100
Lampiran 11 Listing Program (tsai_hill_criterion.m).....		100
Lampiran 12 Listing Program (adjust_material_data.m).....		101
Lampiran 13 Listing Program (strain_limit.m).....		101
Lampiran 14 Listing Program (stress_limit.m).....		102
Lampiran 15 Listing Program (elem_q4.m).....		103
Lampiran 16 Listing Program (extrapolation.m) .....		103
Lampiran 17 Listing Program (fmlin.m).....		103
Lampiran 18 Listing Program (form_bf.m) .....		104



Lampiran 19 Listing Program (form_kk.m).....	104
Lampiran 20 Listing Program (formbee.m) .....	104
Lampiran 21 Listing Program (formdee_orto.m).....	105
Lampiran 22 Listing Program (formdep_orto.m) .....	106
Lampiran 23 Listing Program (gauss.m) .....	107
Lampiran 24 Listing Program (gp_position.m) .....	107

## DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Gauss Point dan Faktor Bobot <i>Gauss Quadratur</i> (Khennane, 2013) ...	22
Tabel 3.2 Koordinat Natural Elemen dan <i>Gauss Point</i> (Cook, et al., 1989).....	29
Tabel 4.1 Data Mekanik Material LVL Sengon.....	34
Tabel 4.2 Data Uji Tarik Sejajar Serat LVL Sengon .....	35
Tabel 4.3 Hasil Uji Desak Sejajar Serat (Astuti, 2015) .....	36
Tabel 4.4 Hasil Tes Konvergensi Elemen.....	38
Tabel 4.5 Parameter Input Geometrik pada Program Numerik .....	41
Tabel 5.1 Perbandingan Nilai Beban-Lendutan Numerik dan Eksperimen.....	68
Tabel 5.2 <i>Stress State</i> Pada Serat Desak Terluar .....	74
Tabel 5.3 Tegangan dan regangan maksimum pada penampang.....	75

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Pengujian tekan tegak lurus serat LVL Sengon (Awaludin, 2012).....	4
Gambar 2.2. Kurva tegangan-regangan bilinear (Buchanan, 1990) .....	5
Gambar 2.3. Mode kegagalan balok (Buchanan, 1990).....	5
Gambar 2.4 Kegagalan daktail balok (a) dan kegagalan getas balok (b).....	6
Gambar 2.5 Konfigurasi pengujian lentur 4 titik (Aswadi, 2015) .....	10
Gambar 2.6 Grafik beban-lendutan pengujian lentur LVL Sengon.....	10
Gambar 2.7 Tipikal pola kegagalan pada pengujian lentur LVL Sengon.....	11
Gambar 2.8 Konfigurasi uji lentur LVL Sengon non-prismatis .....	11
Gambar 2.9 Kurva beban-regangan uji lentur LVL Sengon .....	12
Gambar 2.10 Pemodelan balok LVL non-prismatis .....	12
Gambar 2.11 Grafik perbandingan hasil eksperimen dan numerik.....	13
Gambar 3.1 Sumbu material kayu (Kaw, 2006) .....	14
Gambar 3.2 Orientasi tegangan (a), regangan geser (b) dan regangan normal (c)	16
Gambar 3.3 Sistem koordinat kartesian (a) dan sistem koordinat natural (b).....	18
Gambar 3.4 Permukaan bidang leleh kriteria Hill .....	24
Gambar 3.5 Pemodelan <i>plane stress</i> balok non-prismatis .....	25
Gambar 3.6 Titik referensi ekstrapolasi dalam koordinat natural.....	28
Gambar 3.7 Diagram keruntuhan Tsai Hill (Voyiadjis dan Kattan, 2005) .....	30
Gambar 4.1 Grafik pengujian lentur LVL Sengon non-prismatis .....	31
Gambar 4.2 Setting pengujian lentur LVL (Eratodi dan Awaludin, 2016).....	31
Gambar 4.3 Kesepakatan sistem koordinat.....	33
Gambar 4.4 Spesimen uji tarik sejajar serat LVL Sengon .....	35
Gambar 4.5 Grafik tegangan regangan LVL Sengon (arah sumbu 1 lokal) .....	37
Gambar 4.6 Model tegangan regangan elastoplastik LVL Sengon.....	37
Gambar 4.7 <i>Meshing</i> elemen <i>quadrilateral</i> balok LVL non-prismatis.....	38
Gambar 4.8 Kurva konvergensi elemen.....	39
Gambar 4.9 Penggunaan plat sebagai perata beban .....	40
Gambar 4.10 Idealisasi plat tumpuan dan plat beban .....	40
Gambar 4.11 Ilustrasi inkremen beban dan penyesuaian kekakuan .....	41
Gambar 4.12 Bagan alir solver <i>mldivide</i> (MathWorks, Inc., 2016).....	44

Gambar 4.13 Diagram alir <i>main program</i> .....	45
Gambar 4.14 Diagram alir sub-program <i>meshing Q4_mesh</i> .....	47
Gambar 4.15 Diagram alir sub-program perhitungan DOF bebas .....	49
Gambar 4.16 Diagram alir sub-program perhitungan <i>body force</i> .....	50
Gambar 4.17 Diagram alir perhitungan <i>nodal load</i> .....	51
Gambar 4.18 Diagram alir <i>stiffness_matrix</i> .....	52
Gambar 4.19 Diagram alir perhitungan tegangan dan regangan di <i>gauss point</i> ...	54
Gambar 4.20 Diagram alir sub-program <i>stress extrapolation</i> .....	56
Gambar 4.21 Diagram alir sub-program <i>Tsai Hill Criterion</i> .....	56
Gambar 4.22 Diagram alir sub-program <i>nodal average</i> .....	57
Gambar 4.23 Diagram alir sub-program <i>fmlin</i> .....	58
Gambar 4.24 Diagram alir <i>formdee_orto</i> .....	58
Gambar 4.25 Diagram alir <i>formdep_orto</i> .....	59
Gambar 4.26 Diagram alir <i>samp</i> .....	60
Gambar 4.27 Diagram alir <i>formkk</i> .....	61
Gambar 4.28 Diagram alir <i>failure check strain limit</i> .....	62
Gambar 4.29 Diagram alir <i>failure check stress limit</i> .....	63
Gambar 4.30 Diagram alir penyesuaian data material .....	64
Gambar 5.1 Deformasi numerik balok LVL non-prismatis.....	65
Gambar 5.2 Kontur perpindahan ( <i>displacement</i> ) model balok LVL. ....	66
Gambar 5.3 Perbandingan respon beban-lendutan.....	67
Gambar 5.4 Letak pemasangan <i>strain gauge</i> .....	68
Gambar 5.5 Perbandingan kurva beban-regangan numerik dan eksperimen.....	69
Gambar 5.6 Kontur tegangan dan regangan arah X-X.....	70
Gambar 5.7 Kontur tegangan dan regangan arah Y-Y.....	71
Gambar 5.8 Kontur tegangan dan regangan geser arah X-Y .....	72
Gambar 5.9 Tegangan dan regangan penampang pada bentang 1/3L .....	73
Gambar 5.10 Tegangan dan regangan penampang pada bentang 1/2L .....	73
Gambar 5.11 Tegangan dan regangan penampang pada bentang 2/3L .....	74
Gambar 5.12 Nilai rasio kegagalan serat tarik terluar balok.....	76
Gambar 5.13 Rasio kegagalan serat desak terluar balok.....	76



Gambar 5.14 Distribusi regangan pada $1/3L$ .....	77
Gambar 8.1 Hasil bacaan <i>displacement</i> nodal 2 dan 4.....	88
Gambar 8.2 Pola distribusi <i>displacement</i> 1 elemen validasi.....	88
Gambar 8.3 Bacaan tegangan pada elemen.....	88
Gambar 8.4 Pola distribusi tegangan normal X dan Y.....	89
Gambar 8.5 Pola distribusi tegangan geser XY .....	89
Gambar 8.6 Pembacaan regangan elemen .....	89

## DAFTAR LAMBANG

Lambang	Arti	Dimensi
$\xi$	Sumbu koordinat natural (arah longitudinal)	-
$\eta$	Sumbu koordinat natural (arah transversal)	-
$E_1$	Modulus elastisitas pada sumbu 1-1	$ML^{-1}T^{-2}$
$E_2$	Modulus elastisitas pada sumbu 2-2	$ML^{-1}T^{-2}$
$G_{12}$	Modulus geser pada sumbu 1-2	$ML^{-1}T^{-2}$
$\nu_{12}$	<i>Poisson ratio</i> pada sumbu 1-2	-
$\nu_{21}$	<i>Poisson ratio</i> pada sumbu 2-1	-
$\varepsilon_1$	Regangan normal pada arah sumbu 1-1	-
$\varepsilon_2$	Regangan normal pada arah sumbu 2-2	-
$\gamma_{12}$	Regangan geser pada arah sumbu 1-2	-
$\sigma_1$	Tegangan normal pada arah sumbu 1-1	$ML^{-1}T^{-2}$
$\sigma_2$	Tegangan normal pada arah sumbu 2-2	$ML^{-1}T^{-2}$
$\tau_{12}$	Tegangan geser pada arah sumbu 1-2	$ML^{-1}T^{-2}$
$\sigma_{1\text{ ult}}$	Tegangan ultimit bahan pada arah sumbu 1-1	$ML^{-1}T^{-2}$
$\sigma_{2\text{ ult}}$	Tegangan ultimit bahan pada arah sumbu 2-2	$ML^{-1}T^{-2}$
$\tau_{12\text{ ult}}$	Tegangan ultimit bahan arah sumbu 1-2	$ML^{-1}T^{-2}$
$\sigma_{1y}$	Tegangan leleh bahan pada arah sumbu 1-1	$ML^{-1}T^{-2}$
$\sigma_{2y}$	Tegangan leleh bahan pada arah sumbu 2-2	$ML^{-1}T^{-2}$
$\sigma_{\text{eff}}$	Tegangan efektif kriteria leleh	$ML^{-1}T^{-2}$
$\frac{\partial g}{\partial \sigma}$	<i>Plastic potential</i>	$ML^{-1}T^{-2}$
$W_i$	Faktor bobot <i>gauss quadrature</i> pada arah $i$	-
$d\varepsilon$	Pertambahan regangan total	-
$d\varepsilon_e$	Pertambahan regangan elastik	-
$d\varepsilon_p$	Pertambahan regangan plastik	-
$[N]$	Matriks <i>shape function</i>	-
$[B]$	<i>Strain matrix</i>	-



<u>Lambang</u>	<u>Arti</u>	<u>Dimensi</u>
[ <i>D</i> ]	<i>Stiffness matrix</i>	-
[ <i>C</i> ]	<i>Compliance matrix</i>	-
[ <i>K</i> ]	<i>Structure stiffnes matrix</i>	-
[ <i>f</i> ]	Matriks <i>force vector</i>	-
[ <i>d</i> ]	Matriks <i>displacement</i>	-