

Rasio Modulus Penampang Elastik Balok Kayu Laminasi-Baut

Yosafat Aji Pranata

Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Kristen Maranatha
Jalan Suria Sumantri 65 Bandung 40164, E-mail: yosafat.ap@eng.maranatha.edu

Bambang Suryoatmono

Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Katolik Parahyangan
Jalan Ciumbuleuit 94 Bandung 40141, E-mail: suryoatm@unpar.ac.id

Johannes Adhijoso Tjondro

Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Katolik Parahyangan
Jalan Ciumbuleuit 94 Bandung 40141, E-mail: jatjondro@unpar.ac.id

Abstrak

Balok laminasi dapat menjadi alternatif pengganti kayu utuh, karena memberikan keuntungan yaitu dapat difabrikasi dengan bentang sesuai kebutuhan dan membuat penampang kayu yang lebih besar. Tujuan penelitian ini adalah menemukan persamaan empiris rasio modulus penampang elastik balok kayu laminasi-baut. Rasio modulus penampang elastik yaitu rasio antara modulus penampang elastik balok laminasi terhadap balok utuh. Ruang lingkup penelitian yaitu sistem laminasi secara horisontal, kayu Indonesia dengan berat jenis berkisar 0,4-0,8 yaitu meranti merah (*shorea spp*), keruing (*dipterocarpus spp*), dan akasia mangium, penampang balok prismatis, penelitian dilakukan secara eksperimental di laboratorium dan numerikal metode elemen hingga nonlinier. Parameter yang dibahas adalah jenis kayu, ukuran baut, jumlah baris baut, dan jarak baut. Balok mempunyai bentang 3 meter dan disusun oleh 4 lamina. Model tegangan-regangan kayu untuk simulasi numerikal berdasarkan kriteria plastisitas Hill, model tegangan-regangan baut menggunakan model elasto-plastik. Kesimpulan yang diperoleh yaitu tren kurva hubungan beban-lendutan balok kayu laminasi-baut adalah berbentuk bilinear, persamaan empiris rasio modulus penampang elastik merupakan fungsi dari jenis kayu, diameter baut, dan rasio jumlah baris terhadap jarak baut. Rasio modulus penampang elastik dapat digunakan untuk memprediksi kuat lentur balok laminasi pada beban batas proporsional.

Kata-kata Kunci: Laminasi, baut, metode elemen hingga, modulus penampang elastik.

Abstract

Laminated beam can be an alternative for solid timber, because it provides the advantage that it can be fabricated with a needed-span and a bigger cross section. The purpose of this research is to obtain an empirical equation of the bolt-laminated timber beam elastic section modulus ratio. Elastic section modulus ratio is elastic section modulus ratio between laminated and solid beams. Scope of this research are horizontally laminated system, Indonesian timber with specific gravity ranged 0.4-0.8 which are red meranti (*shorea spp*), keruing (*dipterocarpus spp*), and acacia mangium, prismatic beam section, experimental test in laboratory and numerical simulation using nonlinear finite element method. The parameters discussed are timber type, bolt diameter, number of row, and spacing. Beam has a 3-meter span and arranged by 4 laminae. Timber stress-strain model for numerical simulation based on Hill plasticity, bolt stress-strain model is elasto-plastic. Results obtained are beam load-displacement curve trend is bilinear, the elastic section modulus ratio equation are the function of timber type, bolt diameter, and number of row against bolt spacing ratio. The elastic section modulus ratio can be used to predict the bending strength at the proportional limit.

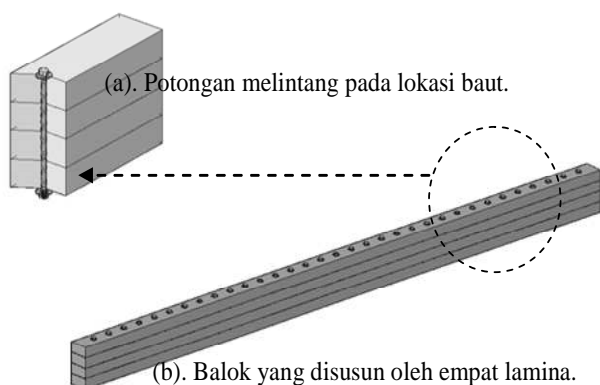
Keywords: Laminated, bolt, finite element method, elastic section modulus.

1. Pendahuluan

Penggunaan kayu sebagai komponen struktur menggantikan material lain yang bersifat produk yang memerlukan banyak energi, dapat memberikan kontribusi (solusi jangka panjang) terhadap permasalahan pemanasan global. Produk rekayasa kayu yang ada pada saat ini antara lain sistem kayu laminasi. Balok laminasi-baut adalah balok yang disusun oleh lebih dari satu lamina kayu membentuk suatu sistem laminasi, dengan baut berfungsi sebagai transfer geser antar lamina (Pranata et.al, 2010; Pranata et.al, 2011). Penelitian mengenai sistem laminasi mekanik baut belum banyak dikembangkan di negara Indonesia. Oleh karena itu, penelitian ini sangat perlu dilakukan, khususnya untuk spesies kayu Indonesia, dengan harapan dapat memberikan sumbangan ilmiah untuk perkembangan konstruksi kayu dan peraturan kayu di Indonesia.

Baut ditinjau dari segi praktis lebih fleksibel dalam hal ukuran diameter baut, panjang baut, dan jarak antar baut. Selain itu, baut merupakan material baja (daktail), sehingga apabila diterapkan pada elemen struktur balok, hal ini dapat meningkatkan kekuatan lentur. Selain itu, apabila pengaruh adanya tegangan normal vertikal penampang diperhitungkan, kekuatan vertikal sistem laminasi-baut diharapkan lebih baik daripada sistem laminasi paku.

Balok laminasi mekanik (**Gambar 1**) tidak menggunakan lem, maka hal ini sangat berbeda dengan balok glulam (*glue-laminated beam*) (TRADA, 2009). Balok laminasi-baut disambung secara mekanik, sehingga berbeda dengan balok glulam yang mana sangat dipengaruhi dan memperhitungkan pengaruh lekatan antara lem (*adhesive*) dengan jenis kayu, serta adanya pengaruh faktor kehilangan tahanan geser pada lem akibat temperatur tinggi. Sistem laminasi umumnya digunakan sebagai alternatif dari kayu solid/utuh karena memberikan beberapa keuntungan yaitu dapat difabrikasi menggunakan kayu dengan bentang pendek menjadi sistem dengan panjang bentang sesuai



Gambar 1. Skematik sistem balok laminasi-baut (Pranata et.al, 2011)

yang dibutuhkan, membuat penampang kayu yang lebih besar, serta kombinasi kayu mutu rendah dan tinggi. Proses laminasi juga dapat meminimalisasikan pengaruh cacat kayu dan kemiringan serat, yang mana menghasilkan elemen struktur dengan kekuatan dan kekakuan dengan variabel sedikit berkurang terhadap elemen solid/utuh.

2. Tujuan Penelitian dan Ruang Lingkup Permasalahan

Penelitian ini bertujuan menemukan persamaan empiris untuk memprediksi nilai rasio modulus penampang elastik sistem balok kayu laminasi-baut. Definisi dari rasio yaitu rasio antara nilai modulus penampang elastik balok laminasi terhadap modulus penampang elastik balok solid (utuh).

Penelitian menggunakan ruang lingkup untuk membatasi permasalahan, yaitu sebagai berikut:

1. Sistem laminasi yang ditinjau adalah secara horisontal.
2. Spesies kayu yang ditinjau adalah kayu Indonesia dengan rentang berat jenis berkisar antara 0,4-0,8 yaitu meranti merah (*shorea spp*), keruing (*dipterocarpus spp*), dan akasia mangium.
3. Bentuk penampang balok prismatis.
4. Penelitian dilakukan secara eksperimental di laboratorium dan secara numerikal metode elemen hingga nonlinier menggunakan perangkat lunak ADINATM.
5. Dalam penelitian numerikal, model tegangan-regangan material kayu yang digunakan adalah berdasarkan kriteria plastisitas Hill (Chen dan Han, 2007), dengan parameter-parameter untuk menentukan nilai pada kondisi leleh dan ultimit diperoleh dari hasil pengujian eksperimental sifat fisik dan sifat mekanis kayu.
6. Dalam penelitian numerikal, model tegangan-regangan baut menggunakan model elasto-plastik, data diperoleh dari pengujian eksperimental sifat mekanis baut.
7. Parameter yang dibahas adalah jenis kayu, variasi ukuran baut, variasi jumlah baris baut, dan variasi jarak baut.
8. Bentang balok 3 meter, dengan jumlah lamina 4 (empat) buah.

3. Dasar Teori

3.1 Modulus penampang elastik

Sistem balok kayu laminasi-baut adalah sistem balok yang disusun oleh lamina-lamina, dengan disambung

menggunakan alat sambung mekanik. Artinya, gelincir horisontal (geser horisontal) antar lamina-lamina ditahan oleh baut (sebagai penghubung geser) pada setiap interval jarak tertentu. Prediksi distribusi regangan yang timbul pada penampang balok diasumsikan seperti terlihat pada **Gambar 2** (terjadi interaksi parsial antar lamina kayu).

Untuk mengetahui besarnya tegangan normal (tegangan lentur) pada bagian serat terluar tarik dan tekan balok laminasi-baut, yang terjadi akibat momen lentur pada rentang beban elastik, maka dipelajari rasio modulus penampang elastik balok laminasi-baut. Besarnya tegangan normal balok laminasi-baut (σ_b) pada serat terluar penampang sebagai berikut,

$$\sigma_b = \frac{M}{S_{eff}} \quad (1)$$

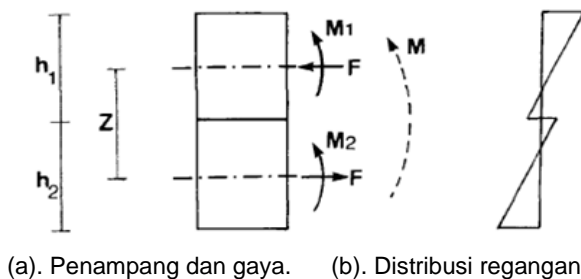
dimana M adalah momen lentur dan S_{eff} adalah modulus penampang elastik efektif balok laminasi-baut. Modulus penampang elastik efektif adalah rasio antara momen inersia efektif penampang laminasi terhadap jarak dari garis netral ke serat terluar (tepi). Rasio modulus penampang elastik balok laminasi terhadap balok penampang solid atau utuh selanjutnya ditulis dalam notasi k_s .

$$S = \frac{I}{y} \quad (\text{balok penampang solid atau utuh}) \quad (2)$$

$$S_{eff} = k_s \cdot S \quad (\text{balok laminasi-baut}) \quad (3)$$

dimana S adalah modulus penampang elastik balok penampang solid, I adalah momen inersia penampang balok solid, dan y adalah jarak dari titik berat penampang ke serat tepi terluar.

Gambar 3.a adalah distribusi tegangan masing-masing penampang lamina untuk sistem laminasi yang dianggap terpisah (tanpa aksi komposit). **Gambar 3.c** adalah distribusi tegangan masing-masing penampang lamina untuk sistem laminasi yang dianggap menyatu (aksi komposit penuh). Sedangkan **Gambar 3.b** adalah distribusi tegangan masing-masing penampang lamina sistem balok laminasi-baut. Prediksi kekuatan sistem balok laminasi mekanik (nilai tegangan lentur)



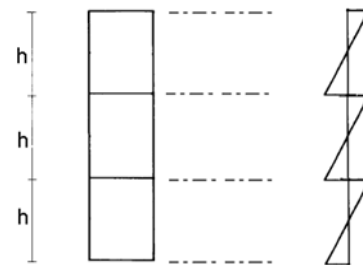
Gambar 2. Penampang yang tersusun oleh dua lamina (Kamiya, 1985)

berada dalam rentang antara model sistem laminasi dengan lamina-lamina yang dianggap terpisah (tanpa friksi atau tidak ada aksi komposit) dan model balok utuh dan juga model sistem laminasi dengan lamina-lamina yang dianggap menyatu (tanpa slip atau terjadi aksi komposit penuh).

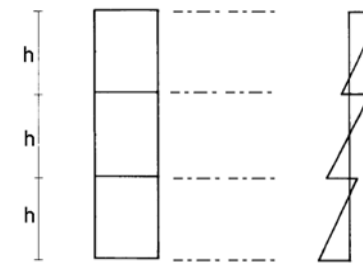
3.2 Material ortotropik

Dalam rentang suatu batasan proposional tertentu, perilaku material dimodelkan sebagai perilaku linier elastik ortotropik. Perilaku konstitutif material linier elastik ortotropik dapat dideskripsikan berdasarkan hukum Hooke. Modulus geser (Karlinasari et.al, 2007) dalam penelitian ini dihitung menggunakan persamaan berikut,

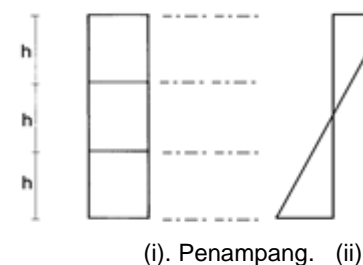
$$G_{LR} = \frac{E_L \cdot E_R}{E_L \cdot (1 + \nu_{LR}) + E_R \cdot (1 + \nu_{RL})} \quad (4)$$



(a). Lamina dianggap terpisah, tidak ada interaksi antar lamina (Kamiya, 1985).



(b). Sistem laminasi mekanik, terjadi interaksi parsial antar lamina



(c). Lamina dianggap menyatu, aksi komposit penuh

Gambar 3. Sistem balok laminasi (3 lamina) dengan properti kayu sejenis

$$G_{LT} = \frac{E_L \cdot E_T}{E_L \cdot (1 + \nu_{LT}) + E_T \cdot (1 + \nu_{TL})} \quad (5)$$

$$G_{RT} = \frac{E_R \cdot E_T}{E_R \cdot (1 + \nu_{RT}) + E_T \cdot (1 + \nu_{RT})} \quad (6)$$

Dimana G_{LR} , G_{LT} , G_{RT} adalah modulus geser berkaitan dengan tiga arah utama, E_L , E_R , E_T adalah modulus elastisitas arah longitudinal, radial, dan tangensial, dan ν_{LR} , ν_{LT} , ν_{RT} adalah rasio poisson berkaitan dengan tiga arah utama material.

3.3 Kriteria plastisitas hill

Beberapa penelitian dan publikasi ilmiah berkaitan dengan perilaku leleh material ortotropik antara lain telah diteliti oleh van der Put (Van der Put, 2009) dan Hill (Chen dan Han, 2007). Model material plastik ortotropik berdasarkan kriteria leleh Hill (**Gambar 4**) menggunakan kondisi sebagai berikut, dimana a, b, c adalah arah utama material, dan F, G, H, L, M, N adalah konstanta material. X, Y, Z adalah tegangan leleh material pada arah a, b, c dan Y_{ab} , Y_{ac} , Y_{bc} adalah tegangan leleh untuk geser murni pada bidang (a,b), (a,c), dan (b,c). Kriteria leleh Hill merupakan perluasan dari kriteria leleh von Mises. Asumsi bahwa respons material adalah sama dalam hal tarik dan tekan, serta tegangan hidrostatik tidak mempengaruhi leleh. Parameter material dapat ditentukan dari tiga tes tarik/tekan pada arah sumbu utama (sejajar serat dan tegak lurus serat), serta tiga tes geser pada bidang simetri. Tiga kekuatan tarik/tekan tersebut untuk mendapatkan parameter X, Y, Z, dan tiga kekuatan geser untuk mendapatkan parameter Y_{ab} , Y_{ac} , dan Y_{bc} .

$$f(\sigma_{ij}) = F(\sigma_{bb} - \sigma_{cc})^2 + G(\sigma_{cc} - \sigma_{aa})^2 + H(\sigma_{aa} - \sigma_{bb})^2 + 2L\sigma_{ab}^2 + 2M\sigma_{ac}^2 + 2N\sigma_{bc}^2 - 1 = 0 \quad (7)$$

$$F = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{Y^2} + \frac{1}{Z^2} - \frac{1}{X^2} \right) \quad (8)$$

$$G = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{Z^2} + \frac{1}{X^2} - \frac{1}{Y^2} \right) \quad (9)$$

$$H = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{X^2} + \frac{1}{Y^2} - \frac{1}{Z^2} \right) \quad (10)$$

$$L = \frac{1}{2Y_{ab}^2} \quad (11)$$

$$M = \frac{1}{2Y_{ac}^2} \quad (12)$$

$$N = \frac{1}{2Y_{bc}^2} \quad (13)$$

3.4 Metode elemen hingga nonlinier

Metode elemen hingga adalah prosedur numerik untuk memecahkan masalah mekanika kontinum dengan tingkat ketelitian yang dapat diterima. Elemen solid 3D

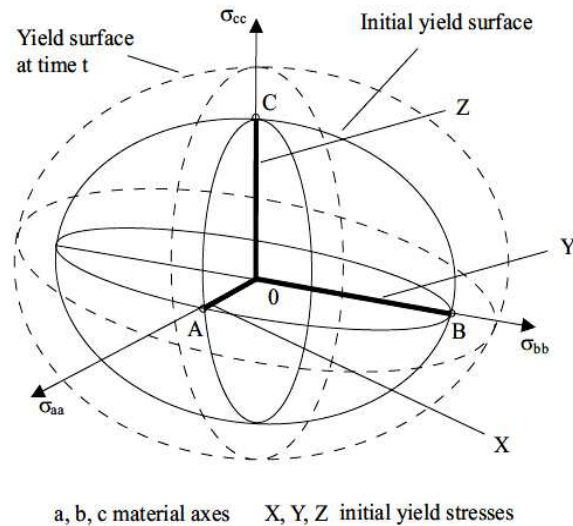
merupakan model solid tiga dimensi yang tidak terbatas pada bentuk shape, pembebanan, properti material, dan kondisi batas. Konsekuensinya terdapat kemungkinan enam nilai tegangan (tiga tegangan normal dan tiga tegangan geser), dan peralihan yang terjadi tiga arah yaitu u, v, dan w (Model elemen diilustrasikan pada **Gambar 5**).

Metode pengukuran tegangan dan regangan material (ADINA, 2009) untuk model *small strain* didefinisikan untuk regangan dengan nilai kurang dari 2%. Asumsi model *small displacement/small strain* menggunakan anggapan bahwa data input adalah model kurva hubungan *engineering stress* dan *engineering strain*, kemudian data hasil output adalah model kurva hubungan *Cauchy stress* dan *engineering strain*. Sedangkan model *large displacement/large strain* menggunakan anggapan data hasil output adalah model kurva hubungan *Kirchhoff stress* dan *left Hencky strains* atau *Jaumann strains*.

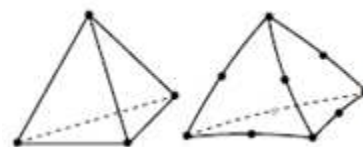
$$\sigma = \frac{F}{A_o} \quad (\text{engineering stress}) \quad (14)$$

$$\epsilon = \frac{\Delta - \Delta_o}{\Delta_o} \quad (\text{engineering strain}) \quad (15)$$

Dalam permasalahan sistem balok laminasi mekanik penelitian ini, terdapat tinjauan khusus yaitu adanya kontak permukaan antar lamina-lamina kayu yang menyusun sistem balok laminasi dan kontak permukaan baut (alat sambung mekanik) dengan



Gambar 4. Permukaan leleh ortotropik (ADINA, 2009)



Gambar 5. Elemen tetrahedral 4 dan 10 titik nodal

permukaan lubang kayu (**Gambar 1**). Dalam pemodelan numerik, terdapat beberapa aspek penting yang harus diperhatikan. Antara lain adanya pengaruh geometri nonlinier akibat meningkatnya gelincir kontak antara baut dengan lubang kayu. Pemodelan material tekan konstitutif berbasis plastisitas perlu dikembangkan untuk memprediksi perilaku kayu terutama pada daerah kontak.

Metode *The Load-Displacement-Control* atau LDC (metode *arc-length*) digunakan untuk menyelesaikan persamaan nonlinier model sampai mencapai kondisi keruntuhan (*collapse*). Untuk memodelkan geometri nonlinier akibat adanya peningkatan area kontak antara baut dengan lubang baut, maka digunakan model algoritma pengali Lagrange (*the Lagrange multipliers algorithm*), metode ini telah digunakan untuk memodelkan kontak antara baut dengan lubang kayu (Kharouf et.al, 2005) dengan hasil pemodelan numerik yang sangat baik terhadap hasil uji eksperimental (empiris), artinya perbedaan hasil yang terjadi tidak signifikan. Asumsi kondisi awal geometri adalah tidak terjadi overlap material antara baut dengan lubang kayu (dua *body* yang mengalami akan kontak). Selama proses iterasi, geometri tersebut digunakan untuk menentukan dan menghilangkan overlap tersebut. Sebagai konsekuensinya, maka gaya kontak dikembangkan untuk bekerja pada area kontak, dimana baut menjadi target kontak dan lubang kayu menjadi kontaktor. Hal penting yang harus diperhatikan adalah tidak ada material overlap pada titik nodal kontaktor, sedangkan titik nodal pada target kontak dapat melakukan overlap terhadap kontaktor.

Kayu adalah material dengan sifat visko-elastik, namun demikian dalam penelitian ini dapat diabaikan, dengan pertimbangan bahwa sifat pembebanan adalah jangka pendek dan beban statik. Oleh karena itu diasumsikan kayu berada pada kondisi kadar air yang seragam dan konstan disepanjang bentang balok. Demikian pula pemodelan arah serat, diasumsikan arah serat kayu (arah longitudinal) berimpit dengan sumbu global-x, dan arah radial dan tangensial masing-masing tegak lurus terhadap arah longitudinal atau berimpit terhadap arah sumbu global-y dan sumbu global-z.

Grup kontak dan kontak *surface* harus didefinisikan terlebih dahulu sebagai inisial area pada kontak atau

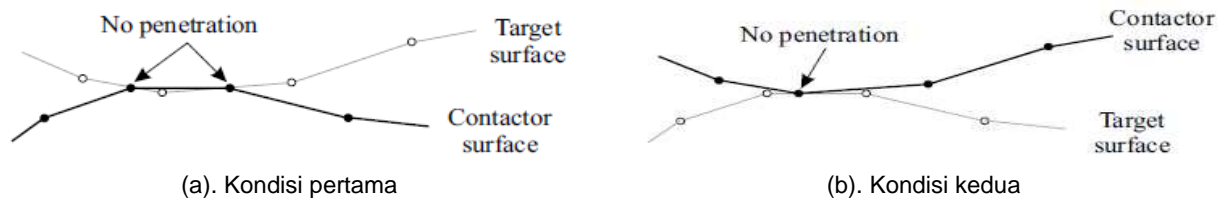
pada area yang diantisipasi akan terjadi kontak selama proses analisis (Ilustrasi ditampilkan pada **Gambar 6**). Dalam penelitian ini, model kontak disusun sebagai model *surface* 3D yang terdiri dari segmen-segmen 3D kontak elemen solid. Pasangan kontak terdiri dari dua kontak *surface* yang mungkin terjadi selama analisis, yang pertama diasumsikan sebagai *contactor surface* dan yang kedua diasumsikan sebagai *target surface*. Didalam pasangan kontak, titik nodal dari *contactor surface* dicegah dari penetrasi segmen *target surface*, demikian pula sebaliknya.

3.5 Sifat fisik dan mekanis kayu dan sifat mekanis baut

Properti material kayu dalam penelitian ini menggunakan data primer (Pranata et.al, 2011). Pengujian sifat fisik dan mekanis kayu yaitu *specific gravity*, kadar air, kuat tarik sejajar dan tegak lurus serat kayu, kuat tekan sejajar dan tegak lurus serat kayu, kuat geser sejajar serat kayu, kuat lentur, dan kuat tumpu sejajar serat kayu (**Tabel 1**). Model tegangan-regangan sejajar serat kayu (tekan dan tarik), sebagai contoh hasil pengujian empiris dan idealisasi untuk jenis kayu Meranti Merah selengkapnya ditampilkan pada **Gambar 7**. Sedangkan untuk properti material baut yaitu kuat tarik diperoleh dari data primer (**Tabel 2**) dan gambar pengujian ditampilkan pada **Gambar 8**.

Tabel 1. Sifat Mekanis Kayu (Pranata et.al, 2011)

Sifat Mekanis	Spesies		
	Meranti Merah	Keruing	Akasia Mangium
$F_{cy//}$ (MPa)	33,67	55,01	26,41
$F_{cu//}$ (MPa)	39,79	73,58	36,57
E_{sb} (MPa)	11506,77	15514,97	11780,90
$E_{cy//}$ (MPa)	8261,46	10426,90	4582,90
$E_{p//}$ (MPa)	2804,83	7673,20	3211,98
$\epsilon_{cy//}$	0,0041	0,0053	0,00595
$\epsilon_{cu//}$	0,0064	0,0077	0,00930
$F_{cy\perp}$ (MPa)	6,96	12,55	6,61
$E_{e\perp}$ (MPa)	688,783	1050,95	425,57
$E_{p\perp}$ (MPa)	62,61	171,35	79,78
$\epsilon_{cy\perp}$	0,0108	0,0120	0,016
$F_{t//}$ (MPa)	87,58	121,02	97,57
$\epsilon_{u//}$	0,0117	0,0059	0,008
$F_{t\perp}$ (MPa)	3,71	4,62	4,01



Gambar 6. Target surface dan contactor surface (ADINA, 2009)

$F_{cy//}$ adalah kuat tekan sejajar serat kayu pada kondisi beban batas proporsional (pertama leleh), $F_{cu//}$ adalah kuat tekan sejajar serat kayu pada kondisi beban batas ultimit, E_{sb} adalah modulus elastisitas kayu yang diperoleh dari hasil pengujian lentur balok, $E_{cy//}$ adalah modulus elastisitas arah sejajar serat kayu yang diperoleh dari hasil pengujian tekan (*clear specimen tests*), $E_{p//}$ adalah modulus plastisitas arah sejajar serat kayu yang diperoleh dari hasil pengujian tekan, $\epsilon_{cy//}$ dan $\epsilon_{cu//}$ adalah regangan pada masing-masing kondisi beban batas proporsional dan ultimit.

F_{cy} adalah kuat tekan tegaklurus serat kayu pada kondisi beban batas proporsional (pertama leleh), E_e adalah modulus elastisitas arah tegaklurus serat kayu yang diperoleh dari hasil pengujian tekan (*clear specimen tests*), E_p adalah modulus plastisitas arah tegaklurus serat kayu yang diperoleh dari hasil pengujian tekan, ϵ_{\perp} adalah regangan kondisi beban batas ultimit, dan $F_{t\perp}$ adalah kuat tarik kayu arah tegaklurus serat kayu.

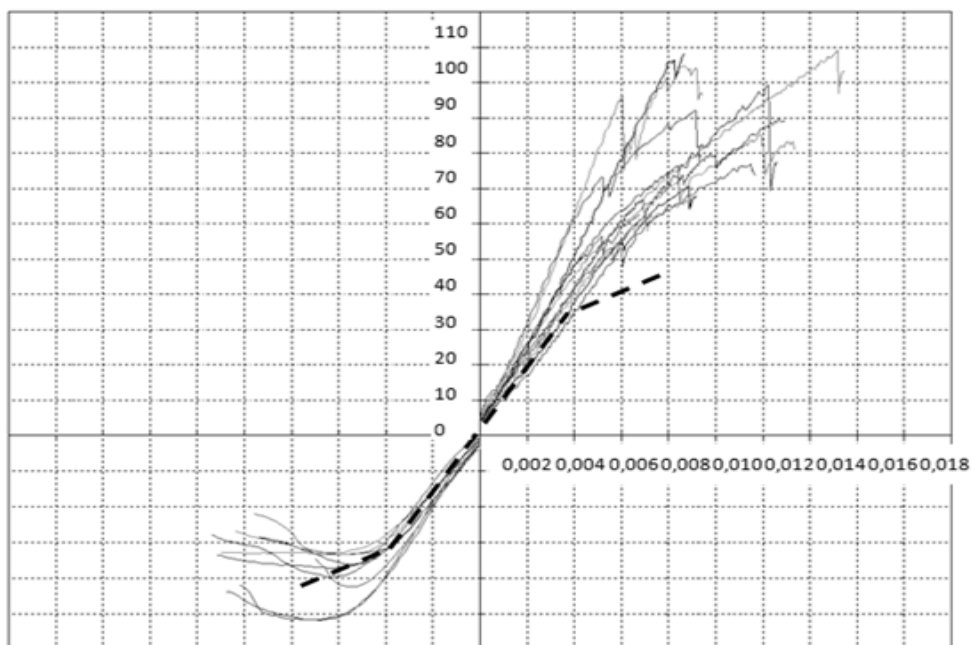
Secara umum, **Tabel 2** memperlihatkan bahwa rata-rata kuat tarik baut (F_y) diameter 8 mm sebesar 716,60 MPa, baut diameter 10 mm sebesar 529,62 MPa, dan baut diameter 12 mm sebesar 445,41 MPa. **Gambar 8** memperlihatkan pengujian kuat tarik baut diameter 10 mm dengan UTM.



Gambar 8. Pengujian kuat tarik baut diameter 10 mm

4. Simulasi Numerikal Metode Elemen Hingga Nonlinier

Pada pemodelan numerik metode elemen hingga nonlinier, baut dimodelkan sebagai elemen kaku dengan tipe material isotropik elasto-plastik. Sedangkan kayu dimodelkan sebagai material plastik ortotropik. Modulus elastisitas yang ditinjau yaitu arah sejajar (E_L) dan tegaklurus serat (E_R dan E_T), rasio poisson (ν_{LR} , ν_{LT} , dan ν_{RT}), modulus geser (G_{LR} , G_{LT} , dan G_{RT}). Kriteria leleh menggunakan kriteria leleh Hill (Chen dan Han, 2007). Tegangan leleh ada 6



Gambar 7. Hasil pengujian empiris dan model idealisasi kurva hubungan tegangan-regangan sejajar serat kayu Meranti Merah

Tabel 2. Hasil uji tarik baut (F_y)

Baut	Jumlah sampel	Kisaran nilai (MPa)	Rata-rata (MPa)	Deviasi Standar	C.O.V (%)
8 mm	3	686,80-756,75	716,60	36,11	5,04
10 mm	7	501,50-551,23	529,62	16,01	3,05
12 mm	3	439,52-449,57	445,41	5,24	1,18

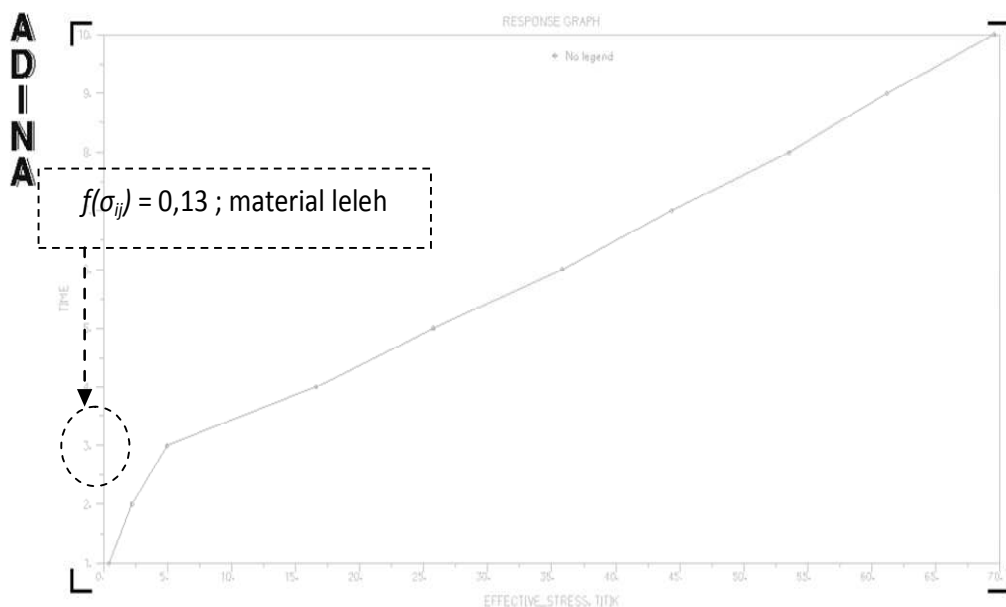
(enam), yaitu 3 (tiga) tegangan normal dan 3 (tiga) tegangan geser. Tegangan leleh arah sejajar serat diambil dari nilai terkecil antara kuat tekan (leleh) dan kuat tarik sejajar serat (maka model kurva tegangan-regangan bagian tarik dan tekan diasumsikan sama). Tegangan leleh arah tegaklurus serat diambil dari nilai terkecil antara kuat tekan (leleh) dan kuat tarik tegaklurus serat (bagian tarik dan tekan diasumsikan sama). Tegangan geser diambil dari nilai kuat geser sejajar serat kayu.

Pemodelan lamina kayu dan baut menggunakan tipe elemen solid 3D (elemen tetrahedral 10 titik nodal ditampilkan pada. Sistem laminasi mekanik menggunakan baut sebagai alat sambung mekanik, sehingga dalam hal ini terjadi kontak elemen, yaitu antara permukaan baut dengan lubang kayu, serta terdapat pula kontak antar lamina-lamina kayu. Sistem kontak dimodelkan pada satu permukaan (*single side*). Pemodelan daerah lubang kayu (yaitu tepi terluar serat tertarik dan tertekan) dan ujung-ujung baut dimodelkan dengan fitur *constraint*, yaitu translasi titik nodal pada tepi lubang kayu harus sama dengan translasi titik nodal pada permukaan ujung baut. Pemodelan *constraint* diterapkan pada titik nodal lubang kayu dan permukaan baut. Idealisasi model tumpuan digunakan sendi dan rol, menyerupai tipe tumpuan yang sebenarnya pada pengujian di laboratorium.

Dalam penelitian numerikal, digunakan beberapa variasi parameter yaitu rasio ukuran lamina atau lebar terhadap tebal lamina (rasio l_b / d_b), diameter baut (d_b), jarak antar baut (s), dan jumlah baris baut (n_r). Detail variasi selengkapnya ditampilkan pada **Tabel 3**.

Gambar 9 memperlihatkan hasil simulasi numerik, sebagai contoh studi kasus balok kayu laminasi-baut kayu Keruing, dengan jarak baut 100 mm, diameter baut 12 mm, jumlah baris baut 1 baris, bentang bersih 3 meter, jumlah lamina 4, dan ukuran balok aktual 110x200 mm (balok K-100-12-1). **Gambar 9** memperlihatkan kurva hubungan tegangan efektif (berdasarkan kriteria leleh Hill, dihitung berdasarkan **Persamaan 5.a**) versus waktu pembebanan. Pada tahap *time* ke-3 (beban $2P = 30000$ N), dapat diketahui bahwa material telah mengalami kelelahan, detail riwayat waktu pembebanan terhadap tegangan efektif selengkapnya ditampilkan pada **Tabel 4**. pada tahap *time* ke-11 (beban $2P = 110000$ N) balok mengalami kegagalan (*failure*).

Gambar 10 memperlihatkan hasil simulasi numerik dan pengujian eksperimental, sebagai contoh studi kasus balok K-100-12-1, yaitu kurva hubungan beban-lendutan balok ditinjau pada lokasi tengah bentang. **Gambar 11.a** memperlihatkan (skematik) elemen-elemen kayu yang mengalami plastifikasi pada kondisi beban batas proporsional (batas leleh), sedangkan **Gambar 11.b** pada kondisi beban batas ultimit.



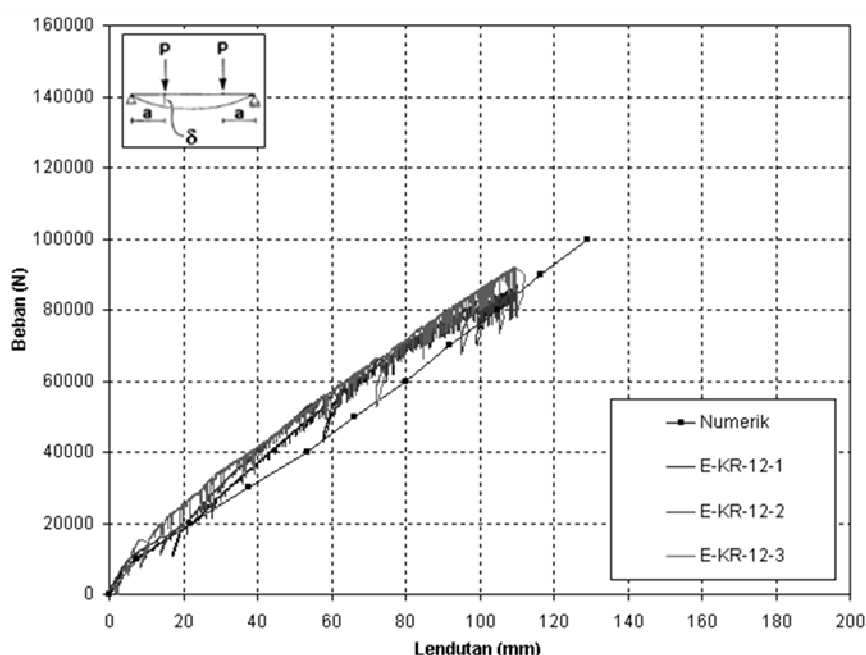
Gambar 9. Hasil simulasi numerik kurva tegangan efektif vs waktu pembebanan

Tabel 3. Parameter yang ditinjau pada penelitian numerikal

Kayu	Rasio h_l / b	d_b (mm)	rasio l_b / d_b	s (mm)	n_r (baris baut)
Meranti Merah, Keruing, Akasia Mangium	0,5	8, 10, dan 12	25, 20, dan 16,67	100, 150, 200, 250, dan 300	1, 2, dan 3 baris

Tabel 4. Kriteria leleh balok K-100-12-1

Time	Load (N)	σ_{xx} (MPa)	σ_{yy} (MPa)	σ_{zz} (MPa)	σ_{xy} (MPa)	σ_{xz} (MPa)	σ_{yz} (MPa)	Effective Stress	$f(\sigma_{ij})$
1	10000	-0,39	0,00	0,08	-0,01	0,03	-0,02	0,44	-0,99
2	20000	2,13	-0,01	-0,15	0,00	-0,04	0,05	2,22	-0,78
3	30000	4,91	0,01	-0,15	-0,04	-0,04	0,03	4,98	0,13
4	40000	16,61	0,15	-0,13	-0,22	0,15	-0,07	16,61	11,74
5	50000	25,85	0,27	-0,10	-0,35	0,25	-0,16	25,78	29,77
6	60000	35,90	0,33	-0,13	-0,27	0,17	-0,17	35,81	58,51
7	70000	44,55	0,43	-0,08	-0,32	0,15	-0,23	44,38	90,50
8	80000	53,70	0,49	-0,11	-0,27	0,09	-0,24	53,51	132,10
9	90000	61,39	0,58	-0,10	-0,28	0,06	-0,28	61,16	172,90
10	100000	69,80	0,64	-0,12	-0,26	0,02	-0,30	69,55	223,92
11	110000	76,94	0,71	-0,11	-0,28	-0,01	-0,33	76,65	272,22



Gambar 10. Kurva beban-lendutan numerik dan eksperimental balok kayu Keruing K-100-12-1

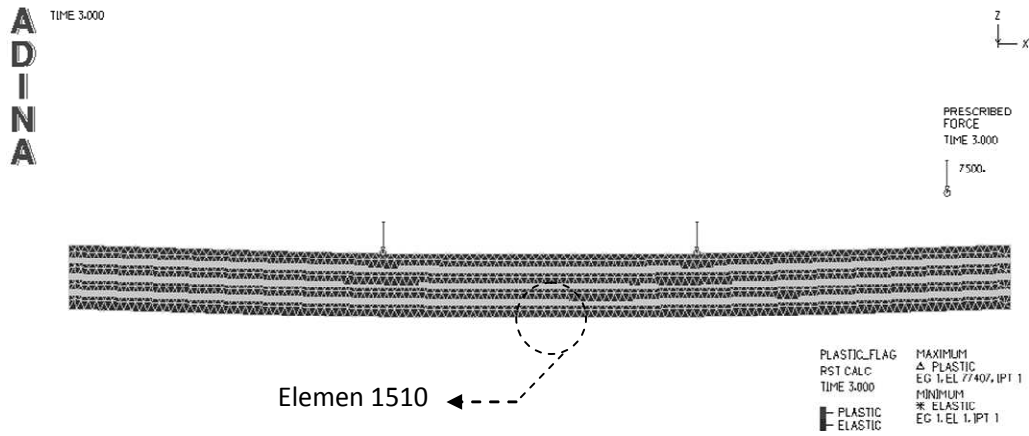
5. Pengujian Eksperimental Balok Laminasi-Baut

Pengujian eksperimental bertujuan untuk mendapatkan data dan fakta empiris, sekaligus bertujuan untuk validasi hasil penelitian numerikal. Benda uji balok laminasi dipilih untuk tipe tertentu, dengan jumlah variasi lebih sedikit dibandingkan model numerik, selengkapnya ditampilkan pada Tabel 5.

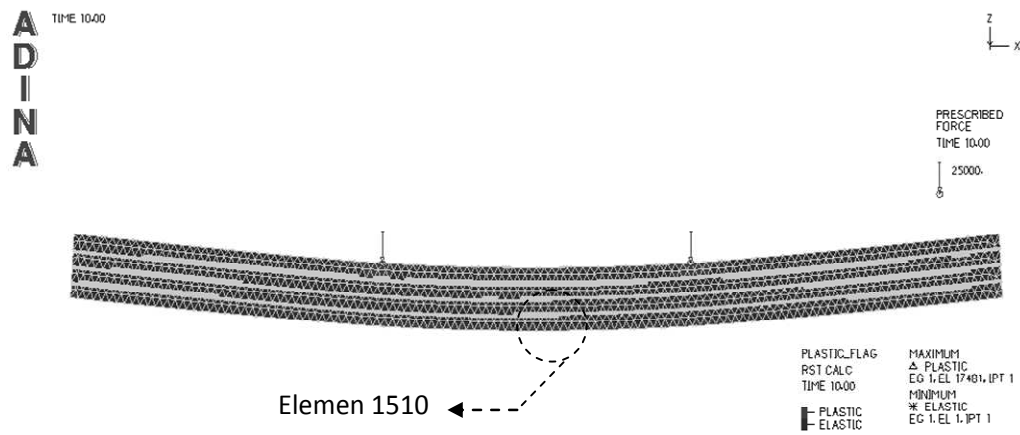
Gambar 12 memperlihatkan benda uji balok kayu Keruing K-100-12-1. Pada tiap benda uji ditempatkan *strain gauges*, yaitu pada masing-masing serat tepi terluar, posisi ditengah bentang balok, dengan tujuan untuk mendapatkan data regangan normal. Kemudian pada salah satu baut pada posisi paling ujung (daerah tumpuan) juga dipasang *strain gauges*, dengan tujuan untuk mendapatkan data regangan normal yang terjadi pada baut.

Tabel 5. Parameter yang ditinjau pada penelitian eksperimental

Kayu	Rasio h_1 / b	d_b (mm)	rasio l_b / d_b	s (mm)	n_r (baris baut)
Meranti Merah, Keruing, Akasia Mangium	0,5	8, 10, dan 12	25, 20, dan 16,67	100 dan 300	2 baris

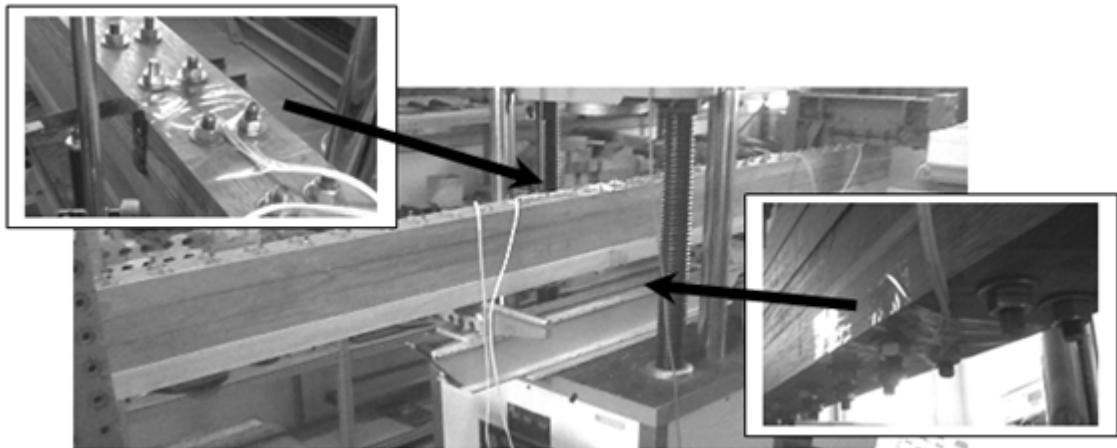


(a) Kondisi saat beban batas proporsional



(b) Kondisi beban ultimit

Gambar 11. Elemen-elemen yang mengalami plastifikasi balok kayu Keruing K-100-12-1



Gambar 12. Pengujian balok kayu laminasi-baut

Tabel 6. Pembahasan tegangan normal pada beban batas proporsional

Balok	Beban Batas Proporsional (N)	Tegangan serat tertarik			Tegangan serat tertekan		
		numerik	eksp.	%-beda	numerik	eksp.	%-beda
A-100-10-2-1	6597,23	5,55	7,16	29,11	-5,55	-7,45	34,21
A-100-10-2-2	6636,47	5,58	7,07	26,68	-5,58	-7,35	31,72
A-100-10-2-3	5572,08	4,69	6,03	28,69	-4,69	-7,16	52,80
M-100-10-2-1	7308,45	6,11	8,42	37,95	-6,11	-7,58	24,09
M-100-10-2-2	8412,08	7,03	11,78	67,66	-7,03	-9,14	30,03
M-300-10-2-1	2835,99	5,24	4,71	-10,17	-5,24	-	-
M-100-12-2-1	7715,57	6,06	6,86	13,18	-6,06	-	-
K-100-8-2-1	8590,00	7,56	9,93	31,26	-7,56	-8,19	8,29
K-100-8-2-2	8590,00	7,56	11,05	46,03	-7,56	-9,31	23,06
K-100-8-2-3	4125,11	3,63	3,90	7,35	-3,63	-4,10	12,86
K-100-10-2-1	16789,82	13,71	16,88	23,11	-13,71	-19,24	40,30
K-100-12-2-1	12237,98	9,40	12,41	32,08	-9,40	-12,54	33,40
K-100-12-2-2	9093,87	6,98	7,32	4,87	-6,98	-6,08	-12,90
K-100-12-2-3	8333,60	6,40	9,68	51,29	-6,40	-8,81	37,71

Hasil penelitian eksperimental dan numerikal balok kayu Akasium (selanjutnya ditulis dengan notasi A), Meranti Merah (M), dan Keruing (K) selengkapnya ditampilkan pada **Tabel 6**, yaitu beban batas proporsional balok laminasi-baut (P_{Y-lam}), tegangan normal (lentur) yang terjadi pada masing-masing serat tepi terluar bagian tertekan dan tertarik.

Hasil memperlihatkan bahwa pada saat beban batas proporsional tercapai, tegangan yang terjadi belum melampaui tegangan leleh. Tegangan hasil numerik diperoleh dari simulasi komputer, hasil eksperimental diperoleh dari bacaan regangan normal *strain gauges* terpasang. Kemudian perhitungan empiris menggunakan prediksi rasio modulus penampang elastik (k_s) pada **Persamaan 8** dan **Persamaan 9**.

$$\sigma_{empiris} = \frac{M_{Y-lam}}{S_{eff}} \tag{16}$$

$$\sigma_{empiris} = \frac{(P_{Y-lam} \cdot L/3)}{k_s \cdot S} \tag{17}$$

Rasio modulus penampang elastik balok laminasi-baut (k_s) atau disebut rasio antara modulus penampang elastik balok laminasi-baut terhadap modulus penampang elastik balok utuh merupakan fungsi dari (3) tiga peubah, yaitu SG , diameter baut (d_b), dan rasio jumlah baris baut terhadap jarak baut (n_r/s). **Persamaan 10** berlaku untuk balok laminasi-baut dengan jumlah lamina 4 (empat) lamina, panjang bentang 3 meter. Nilai k_s berada pada rentang nilai 0,25 -1,00.

$$k_s = 6,546 \cdot SG^{0,048} \cdot d_b^{0,338} \cdot \left(\frac{n_r}{s}\right)^{0,723} ; R^2 = 0,901 \tag{18}$$

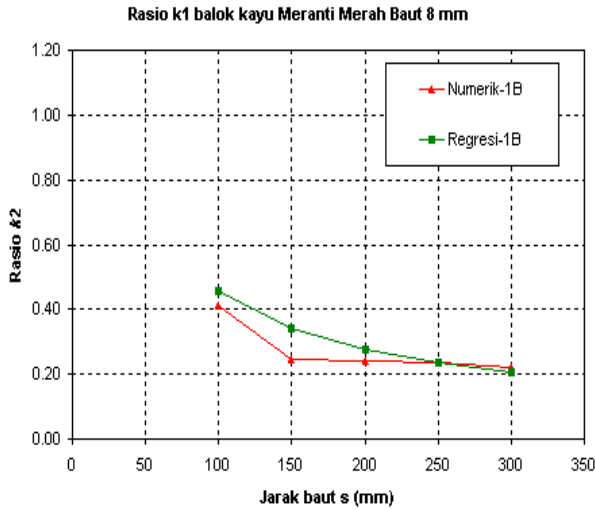
Hasil plot kurva regresi Rasio modulus penampang elastik balok laminasi-baut (k_s) selengkapnya ditampilkan pada **Gambar 13** sampai dengan **Gambar 21**. Secara umum hasil penelitian numerikal dan eksperimental balok laminasi dengan menggunakan konfigurasi 2 (dua) baris baut dan berbagai variasi jarak antar baut, rasio modulus penampang elastik berkisar antara 0,38 – 0,91. Baut dengan jarak 100 mm menghasilkan rasio modulus penampang elastik 0,91, artinya nilai modulus penampang elastik balok laminasi hampir mendekati modulus penampang elastik balok utuh.

Secara umum, parameter *specific gravity*, diameter baut, dan rasio jumlah baris per jarak baut memberikan kontribusi terhadap besarnya rasio modulus penampang elastik balok laminasi-baut.

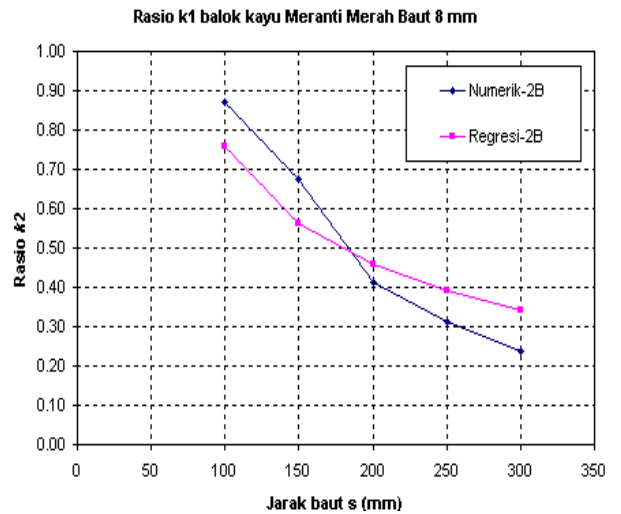
6. Kesimpulan

Kesimpulan yang diperoleh dari hasil penelitian ini yaitu sebagai berikut:

1. Tren kurva hubungan beban-lendutan balok kayu laminasi-baut adalah berbentuk bilinear.
2. Persamaan empiris rasio modulus penampang elastik yang dihasilkan merupakan fungsi dari diameter baut, rasio jumlah baris terhadap jarak baut, dan jenis kayu.
3. Rasio modulus penampang elastik dapat digunakan untuk keperluan desain praktis, yaitu memprediksi kuat lentur balok kayu laminasi-baut pada beban batas proporsional.

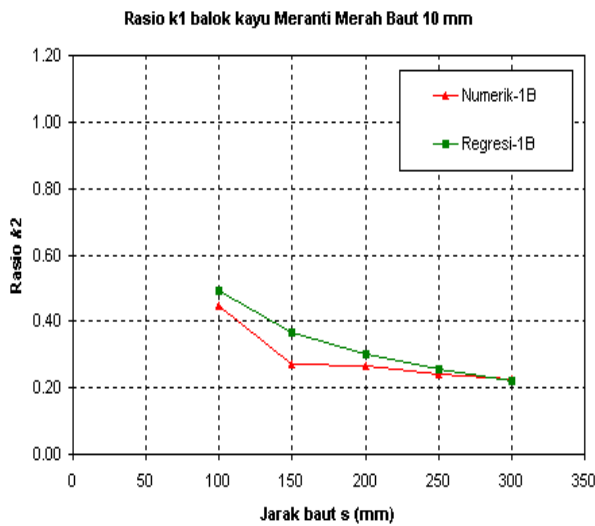


(a). Satu baris baut

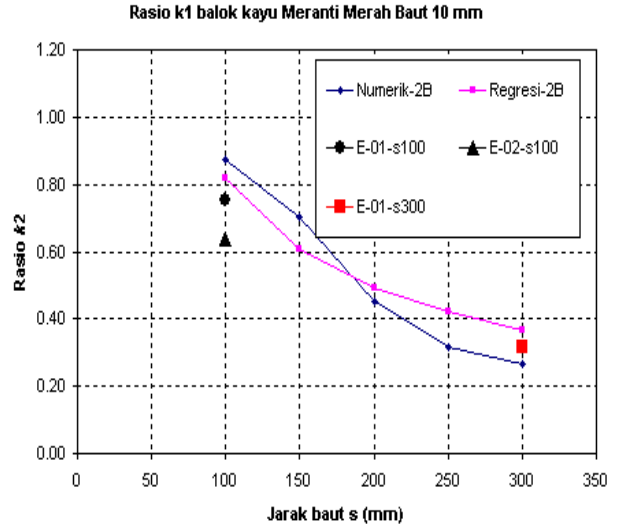


(b). Dua baris baut.

Gambar 13. Kurva regresi k_s balok laminasi-baut kayu Meranti Merah baut 8 mm

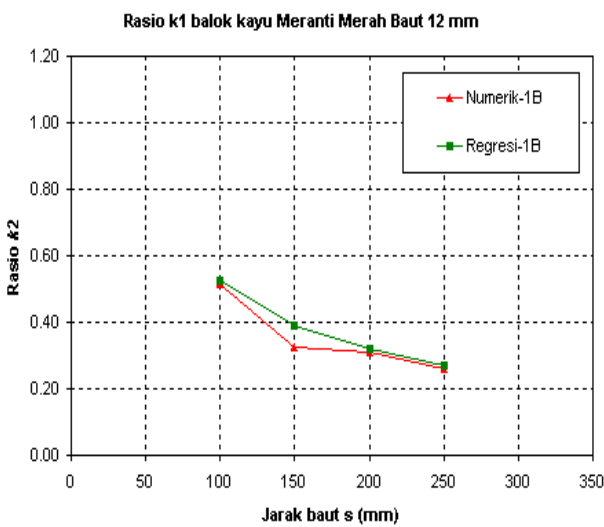


(a). Satu baris baut.

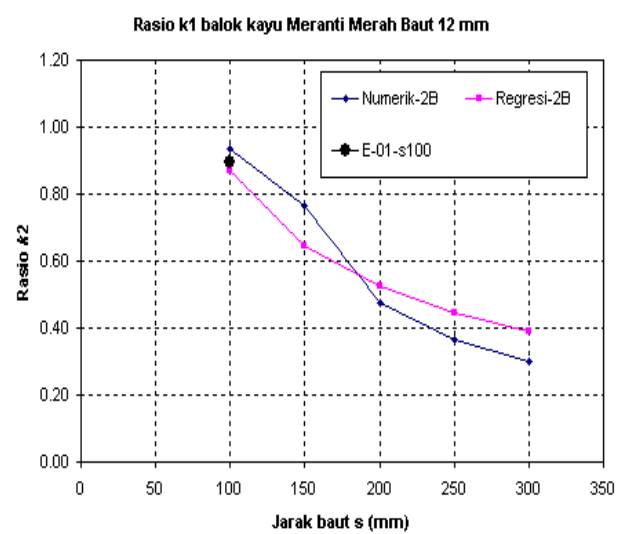


(b). Dua baris baut.

Gambar 14. Kurva regresi k_s balok laminasi-baut kayu Meranti Merah baut 10 mm

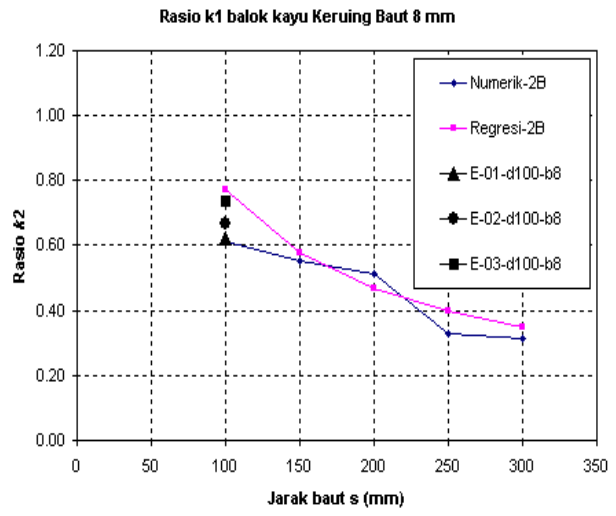
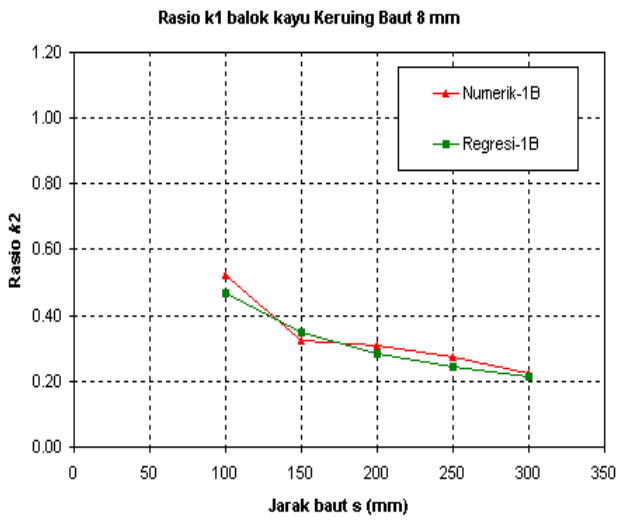


(a). Satu baris baut



(b). Dua baris baut

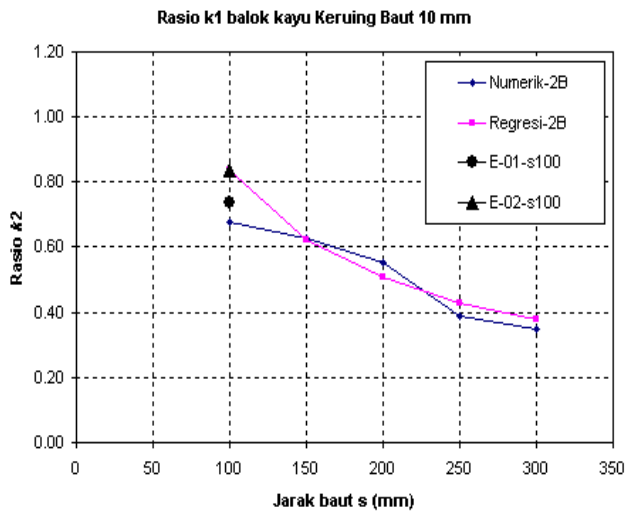
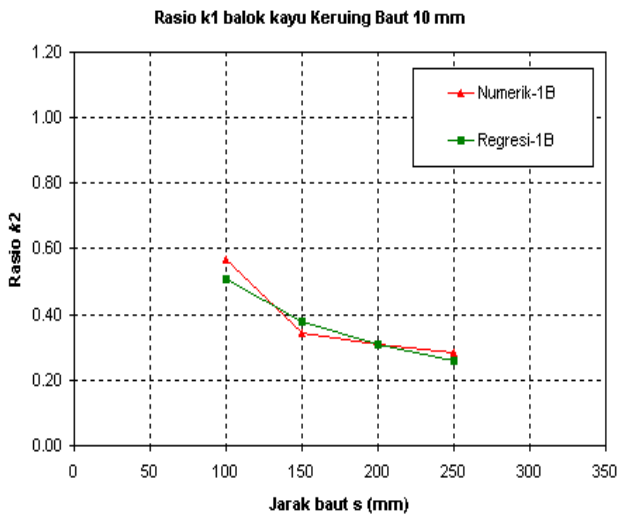
Gambar 15. Kurva regresi k_s laminasi-baut kayu Meranti Merah baut 12 mm



(a). Satu baris baut

(b). Dua baris baut.

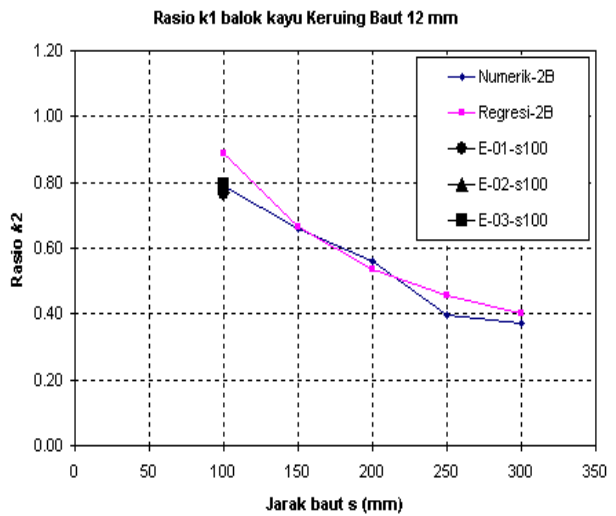
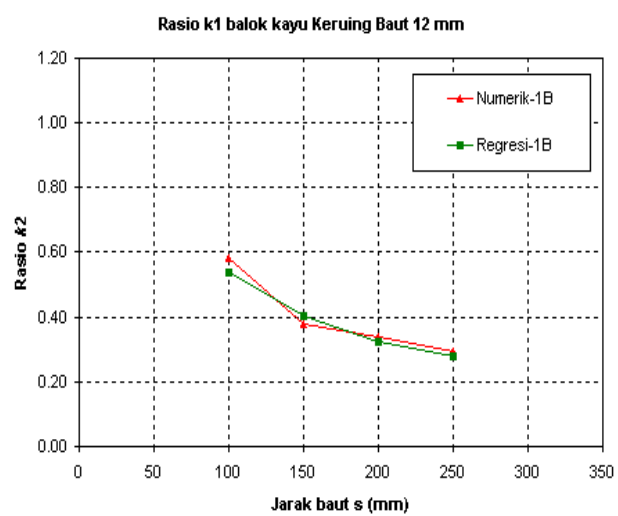
Gambar 16. Kurva regresi k_s balok laminasi-baut kayu Keruing baut 8 mm



(a). Satu baris baut

(b). Dua baris baut

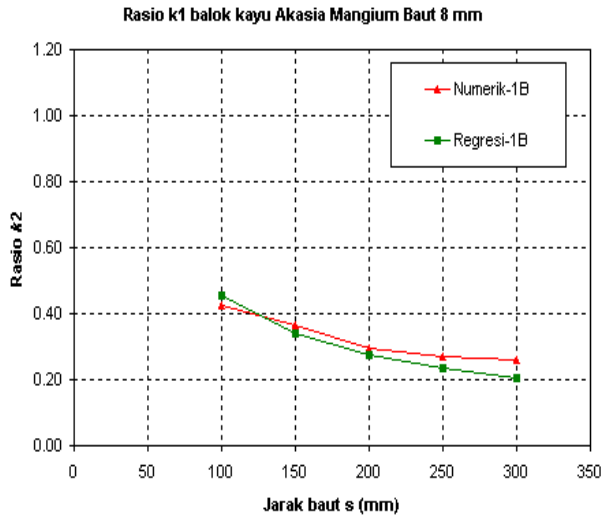
Gambar 17. Kurva regresi k_s balok laminasi-baut kayu Keruing baut 10 mm



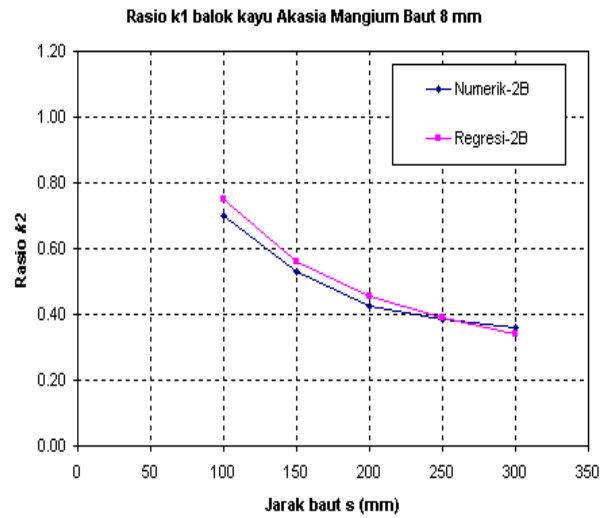
(a). Satu baris baut

(b). Dua baris baut

Gambar 18. Kurva regresi k_s balok laminasi-baut kayu Keruing baut 12 mm

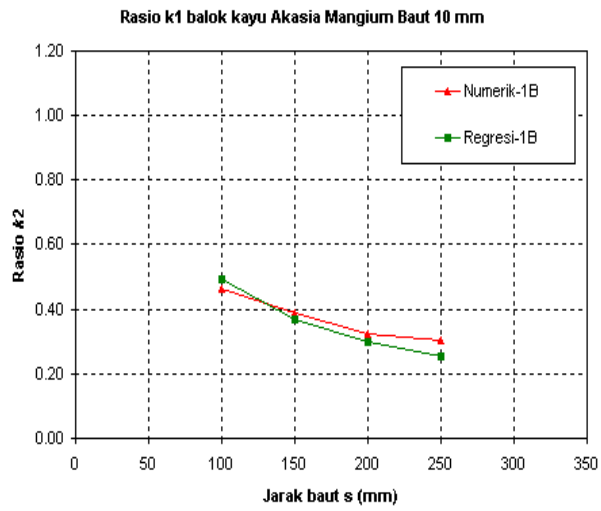


(a). Satu baris baut.

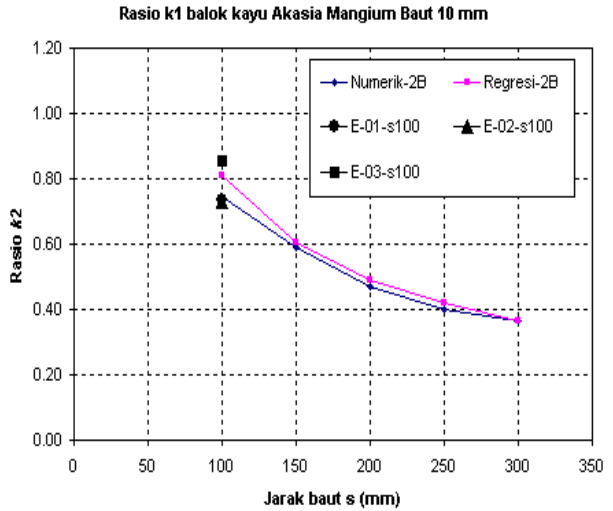


(b). Dua baris baut.

Gambar 19. Kurva regresi k_s balok laminasi-baut kayu Akasia Mangium baut 8 mm

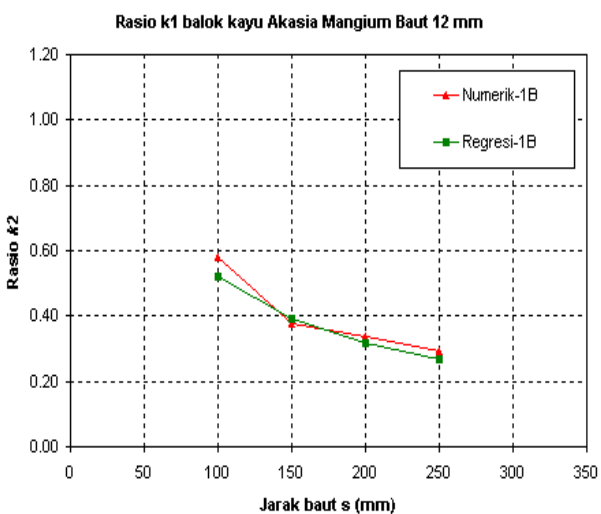


(a). Satu baris baut

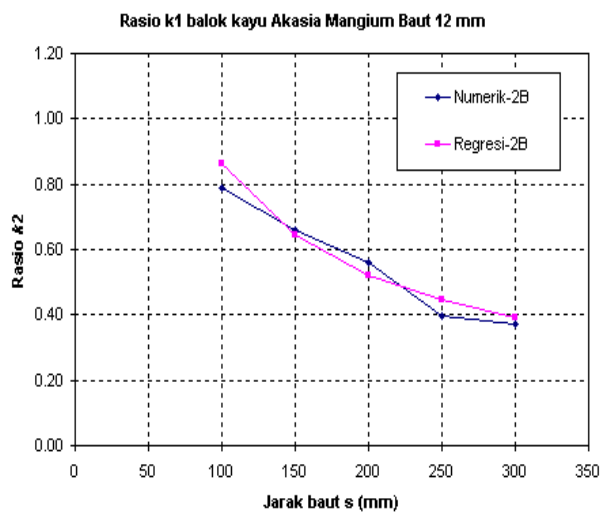


(b). Dua baris baut

Gambar 20. Kurva regresi k_s laminasi-baut kayu Akasia Mangium baut 10 mm



(a). Satu baris baut



(b). Dua baris baut

Gambar 21. Kurva regresi k_s balok laminasi-baut kayu Akasia Mangium baut 12 mm

7. Ucapan Terima Kasih

Penelitian eksperimental ini dapat terlaksana dengan dana penelitian dari Yayasan Perguruan Tinggi Kristen Maranatha. Kegiatan penelitian eksperimental dilakukan di Laboratorium Teknik Struktur Universitas Katolik Parahyangan. Sifat lisensi ADINA™ adalah atas nama Universitas Katolik Parahyangan. Oleh karena itu penulis mengucapkan terima kasih secara tulus kepada kedua institusi tersebut. Penulis mengucapkan terima kasih pula kepada Jhony, ST, dan pak Cuncun, atas segala bantuannya sehingga penelitian ini dapat dilaksanakan dengan baik. Semoga Tuhan membalas budi baik semuanya.

Daftar Pustaka

- ADINA R&D, Inc., 2009, *ADINA version 8.6.2 Theory and Modelling Guide Volume 1*, USA: ADINA R&D, Inc., 71 Elton Ave., Watertown, MA 02472.
- Chen, W.F., Han, D.J., 2007, *Plasticity for Structural Engineers*, J.Ross Publishing.
- Kamiya, F., 1985, Analytical Studies on The Nonlinear Bending Behavior of Nailed Layered Components: Part I. Nailed Layered Beams, *Journal of Wood and Fiber Science*, Volume 17 No 1 page 117-131.
- Karlinasari, L., Surjokusumo, S., Nugroho, N., Hadi, Y.S., Suryoatmono, B., 2007, *Bending Strength Prediction of Wood Beam Constructed from Small Specimens*, USA: 15th International Symposium Non-destructive of Wood, 10-12 September, Duluth, Minnesota.
- Kharouf, N., McClure, G., Smith, I., 2005, Postelastic Behavior of Single- and Double-Bolt Timber Connections, *ASCE Journal of Structural Engineering*, Volume 131 Number 1, Januari 1.
- Pranata, Y.A., Suryoatmono, B., dan Tjondro, J.A., 2010, Flexural Behavior of Bolt-Laminated Beams: Experimental and Numerical Analyses, Bali, Indonesia: *Prosiding The 2nd International Conference IWoRS*, 12-13 November.
- Pranata, Y.A., Suryoatmono, B., dan Tjondro, J.A., 2011, The Flexural Rigidity Ratio of Indonesian Timber Bolt-Laminated Beam, Indonesia: *Prosiding The 3rd European Asian Civil Engineering Forum*, Universitas Atma Jaya Yogyakarta, 20-22 September.
- TRADA Technology Ltd., 2009, *Dowel Laminated Hardwood Beams for Bridges*, TRADA Technology Ltd.
- Van der Put, T.A.C.M., 2009, A Continuum Failure Criterion Applicable to Wood, *Journal of Wood Science*, Volume 55, July.