

## DAFTAR ISI

|   | Halaman |
|---|---------|
| HALAMAN JUDUL.....  | i       |
| KATA PENGANTAR .....  | v       |
| DAFTAR ISI.....   | vi      |
| DAFTAR GAMBAR .....   | ix      |
| DAFTAR TABEL.....   | xiv     |
| INTISARI.....   | xv      |
| ABSTRACT.....   | xvi     |
| BAB I .....   | 1       |
| 1.1 Latar Belakang .....  | 1       |
| 1.2 Perumusan Masalah .....   | 4       |
| 1.3 Tujuan Penelitian .....   | 5       |
| 1.4 Manfaat Penelitian .....  | 5       |
| 1.5 Batasan Masalah .....   | 5       |
| 1.6 Keaslian Penelitian.....  | 6       |
| BAB II.....   | 8       |
| 2.1 Sifat Mekanika Bambu .....  | 8       |
| 2.2 Karakteristik Mekanik dari Kolom Bambu Laminasi dalam<br>Pembebanan Tekan Aksial..... | 10      |
| 2.3 Kuat Tekan dan Angka <i>Poisson</i> Bambu Petung Laminasi .....                       | 15      |
| BAB III.....  | 18      |
| 3.1 Sifat-Sifat Bahan.....  | 18      |
| 3.1.1 Kontinum Material dan Arah Sumbu.....   | 18      |
| 3.1.2 Tegangan.....   | 19      |
| 3.1.3 Regangan .....  | 21      |
| 3.1.4 Modulus Elastisitas & Hubungan Tegangan-Regangan .....                              | 21      |
| 3.1.5 Angka Poisson ( <i>Poisson Ratio</i> ) .....  | 23      |
| 3.1.6 Modulus Geser, Tegangan dan Regangan Geser .....                                    | 23      |
| 3.1.7 <i>Strain Energy</i> .....  | 25      |
| 3.2 Hooke <i>Law</i> untuk Berbagai Tipe Material.....                                    | 25      |

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 3.3    | Material <i>Anisotropic</i> .....  | 27 |
| 3.3.1  | Material <i>Monoclinic</i> .....   | 27 |
| 3.3.2  | Material <i>Orthotropic (Orthogonally Anisotropic)</i> .....                                   | 30 |
| 3.3.3  | <i>Tranversly Isotropic</i> Material .....   | 32 |
| 3.3.4  | Material <i>Isotropic</i> .....  | 33 |
| 3.4    | Batang Tekan (Kolom) .....   | 34 |
| 3.4.1  | Stabilitas Batang Tekan .....  | 34 |
| 3.4.2  | Teori Tekuk pada Kolom .....   | 36 |
| 3.4.3  | Modifikasi Rumus Euler untuk Kolom dengan Berbagai<br>Kondisi Ujung.....                       | 38 |
| 3.4.4  | Tekuk Plastis pada Kolom .....   | 41 |
| 3.5    | Metode Elemen Hingga .....   | 45 |
| 3.6    | Model Konstitutif Bambu Laminasi Non Linear Material<br><i>Elastoplastic Orthotropic</i> ..... | 48 |
| 3.6.1  | Tresca dan Von Mises <i>Criteria</i> .....   | 48 |
| 3.6.2  | Tsai-Hill <i>Yield Criteria</i> .....  | 50 |
| 3.6.3  | <i>Orthotropic Associated Flow Rule</i> .....  | 51 |
| BAB IV | .....  | 54 |
| 4.1    | Umum .....   | 54 |
| 4.2    | Peralatan Penelitian.....  | 54 |
| 4.3    | Tahapan Penelitian.....  | 54 |
| 4.4    | Pemodelan Spesimen .....   | 56 |
| 4.5    | <i>Flowchart Subroutine Orthotropic Elastoplastic Material</i> .....                           | 58 |
| 4.6    | <i>Three Dimensional Solid Element Model</i> .....   | 60 |
| 4.6.1  | <i>Strain Displacement Equations (3D)</i> .....  | 60 |
| 4.6.2  | <i>Compatibility Equations</i> .....   | 63 |
| 4.6.3  | <i>Stress Strain Equations</i> .....   | 64 |
| 4.7    | Penyusun Matriks Kekakuan .....  | 67 |
| 4.7.1  | Modulus Elastisitas Longitudinal ( $E_L$ ) dan Poisson <i>Ratio</i> .....                      | 69 |
| 4.7.2  | Modulus Elastisitas Radial ( $E_R$ ) dan Tangensial ( $E_T$ ).....                             | 72 |
| 4.7.3  | Modulus Geser ( $G_{RT}$ , $G_{LT}$ , dan $G_{LR}$ ).....                                      | 75 |

|                |  |        |
|----------------|--|--------|
| 4.7.4          | Kuat Geser Sejajar Serat .....   | 76     |
| 4.7.5          | Tegangan Leleh Tekan.....  | 78     |
| 4.8            | Tahapan Pemodelan Material .....   | 80     |
| 4.8.1          | <i>One Dimensional Uniaxial</i> .....  | 80     |
| 4.9.2          | <i>3D Isotropic Elastic</i> .....  | 82     |
| 4.9.3          | <i>3D Isotropic Elastoplastic</i> .....  | 86     |
| 4.9.4          | <i>3D Orthotropic Elastic</i> .....  | 91     |
| 4.9.5          | <i>3D Orthotropic Elastoplastic</i> .....  | 98     |
| BAB V          | .....  | 103    |
| 5.1            | Pemodelan <i>Finite Element</i> .....  | 103    |
| 5.2            | Uji Konvergensi .....  | 104    |
| 5.3            | Hasil Pemodelan dan Validasi .....   | 107    |
| BAB VI         | .....  | 117    |
| 6.1            | Kesimpulan .....   | 117    |
| 6.2            | Saran .....  | 117    |
| DAFTAR PUSTAKA | .....  | 119    |
| LAMPIRAN A     | : Tahapan dan Asumsi Pemodelan pada Abaqus.....                                      | xvii   |
| LAMPIRAN B     | : Output $\sigma_1$ , $\sigma_2$ , dan $\sigma_3$ pada Setiap Tahapan Material ..... | xxviii |
| LAMPIRAN C     | : UMAT <i>Subroutine for Orthotropic Elastoplastic Material</i> .....                | xxxv   |

## DAFTAR GAMBAR

|  | Halaman |
|--|---------|
| Gambar 2. 1 Diagram tegangan-regangan bambu dan baja (Morisco, 2006)   | 9       |
| Gambar 2. 2 Kolom bambu laminasi (Li, 2015). .....   | 10      |
| Gambar 2. 3 Skema pengujian tekan (Li, 2015).....  | 11      |
| Gambar 2. 4 Tipe keruntuhan pada spesimen 500-2 (Li, 2015).....  | 11      |
| Gambar 2. 5 Tipe keruntuhan pada spesimen 900-1 (Li, 2015).....  | 11      |
| Gambar 2. 6 a) Kurva beban-regangan longitudinal spesimen 500-2;<br>b) Kurva beban-regangan longitudinal spesimen 900-1<br>(Li, 2015). .....   | 12      |
| Gambar 2. 7 Kurva beban – defleksi lateral di tengah bentang dengan<br>variasi rasio kelangsingan (Li, 2015). .....                            | 13      |
| Gambar 2. 8 a) Kurva beban ultimit - rasio kelangsingan; b) Kurva<br>defleksi lateral tengah bentang – rasio kelangsingan<br>(Li, 2015). ..... | 13      |
| Gambar 2. 9 a) Kurva regangan lateral – rasio kelangsingan; b) Kurva<br>regangan longitudinal – rasio kelangsingan (Li, 2015). .....           | 14      |
| Gambar 2. 10 Kurva beban – rata-rata regangan longitudinal pada tengah bentang<br>(Li, 2015). .....  | 15      |
| Gambar 2. 11 Gambar penampang bambu utuh dan dimensi bambu laminasi<br>(Setyo, 2013). .....  | 16      |
| Gambar 2. 12 Grafik Beban-Deformasi hasil pengujian tekan (Setyo, 2013)  | 16      |
| <br>   |         |
| Gambar 3. 1 <i>General states of 3D stress on an infinitesimal cuboid</i><br>(Kaw, 2005) .....   | 18      |
| Gambar 3. 2 Sistem sumbu koordinat material <i>orthotropic</i> (Kaw, 2005)   | 19      |
| Gambar 3. 3 Deformasi batang akibat beban aksial dan tegangan normal<br>pada pot. normal (Triwiyono, 2013).....                                | 19      |
| Gambar 3. 4 Tegangan geser dan normal pada sembarang sudut $\theta$ .....  | 20      |
| Gambar 3. 5 Macam diagram tegangan-regangan (Triwiyono, 2013). ....  | 22      |

|              |   |    |
|--------------|---|----|
| Gambar 3. 6  | Deformasi batang yang diberi beban aksial tarik<br>(Triwiyono, 2013).....   | 23 |
| Gambar 3. 7  | Tegangan dan deformasi geser murni (Triwiyono, 2013)...   | 24 |
| Gambar 3. 8  | Transformasi koordinat sumbu untuk bidang 1-2 simetris<br>pada material <i>monoclinic</i> (Kaw, 2005). ....       | 28 |
| Gambar 3. 9  | Suatu elemen kubus material <i>monoclinic</i> menerima beban<br>tarik aksial pada arah sumbu 3 (Kaw, 2005). ....  | 29 |
| Gambar 3. 10 | Deformasi elemen kubus yang terbuat dari suatu material<br><i>monoclinic</i> (Kaw, 2005). ....                    | 29 |
| Gambar 3. 11 | Suatu elemen kubus material <i>orthotropic</i> menerima beban<br>tarik aksial pada arah sumbu 3 (Kaw, 2005). .... | 31 |
| Gambar 3. 12 | Deformasi elemen kubus yang terbuat dari suatu material<br><i>orthotropic</i> (Kaw, 2005).....                    | 32 |
| Gambar 3. 13 | Stabilitas benda di atas berbagai permukaan<br>(Triwiyono, 2013).....   | 35 |
| Gambar 3. 14 | Batang yang dibebani tekan (Triwiyono, 2013). ....  | 35 |
| Gambar 3. 15 | Kolom dengan ujung bebas berputar dibebani gaya tekan<br>(Triwiyono, 2013).....                                   | 36 |
| Gambar 3. 16 | Bentuk kelengkungan dan beban kritis kolom dengan kedua<br>ujungnya bebas berputar (Triwiyono, 2013). ....        | 38 |
| Gambar 3. 17 | Kolom dengan ujung-ujung jepit dan rol (Triwiyono, 2013).   | 38 |
| Gambar 3. 18 | Faktor tekuk kolom dengan berbagai macam pengekang<br>ujung (Triwiyono, 2013). ....                               | 40 |
| Gambar 3. 19 | Hubungan tegangan-regangan (Chen, 1976).....  | 42 |
| Gambar 3. 20 | Kurva tegangan kritis – rasio kelangsingan kolom struktural   | 44 |
| Gambar 3. 21 | Meshing pada balok (Cook, 1989). ....   | 45 |
| Gambar 3. 22 | Rectangular Solid Element (RS-8) (Suhendro, 2000) .....   | 45 |
| Gambar 3. 23 | Tresca dan Von Mises <i>Criteria</i> pada <i>plane stress</i><br>(Kelly, 2008).....                               | 49 |
| Gambar 3. 24 | Tresca dan Von Mises <i>Criterion</i> pada ruang <i>principal stress</i>  | 49 |
| Gambar 3. 25 | <i>Orthotropic yield surface</i> (ADINA). ....  | 51 |

|              |  |    |
|--------------|--|----|
| Gambar 3. 26 | Leleh permukaan (Kelly, 2008).....   | 53 |
| Gambar 4. 1  | Bagan alir penelitian.....   | 55 |
| Gambar 4. 2  | Skema langkah <i>main program</i> Abaqus. ....   | 57 |
| Gambar 4. 3  | Pemodelan spesimen uji tekan sejajar serat pada Abaqus... ..   | 58 |
| Gambar 4. 4  | <i>Flowchart</i> pada <i>subroutine</i> UMAT tekan elastis-plastis.....  | 59 |
| Gambar 4. 5  | <i>Deformation of 3-Dimensional body</i> (Suhendro, 2000). ....  | 60 |
| Gambar 4. 6  | Dimensi spesimen uji tekan sejajar serat (ASTM D143-94). ..  | 69 |
| Gambar 4. 7  | Konfigurasi uji tekan sejajar serat arah longitudinal<br>(Eratodi, 2014).....  | 69 |
| Gambar 4. 8  | Hubungan tegangan-regangan uji tekan sejajar serat<br>(longitudinal)(Eratodi, 2014).....   | 72 |
| Gambar 4. 9  | Dimensi spesimen uji tekan tegak lurus serat arah radial....   | 73 |
| Gambar 4. 10 | Dimensi spesimen uji tekan tegak lurus serat arah tangensial   | 73 |
| Gambar 4. 11 | Konfigurasi uji tekan tegak lurus serat arah radial dan<br>tangensial (Eratodi, 2014). ....  | 74 |
| Gambar 4. 12 | Hubungan beban-deformasi uji tekan tegak lurus serat<br>(Eratodi, 2014).....   | 75 |
| Gambar 4. 13 | Dimensi spesimen (ASTM D143-94): (a) uji kuat geser<br>sejajar serat arah longitudinal-radial; (b) uji kuat geser<br>sejajar serat arah longitudinal-tangensial; (c) uji kuat geser<br>sejajar serat arah radial-tangensial..... | 76 |
| Gambar 4. 14 | Konfigurasi uji geser sejajar serat (Eratodi, 2014).....   | 77 |
| Gambar 4. 15 | Hubungan tegangan-regangan uji kuat tarik dan tekan bambu<br>laminasi pada sejajar (longitudinal) dan tegak lurus serat<br>(radial dan tangensial) (Eratodi, 2014).....  | 78 |
| Gambar 4. 16 | Kurva tegangan-regangan arah radial dan tangensial.....  | 79 |
| Gambar 4. 17 | <i>One dimensional uniaxial</i> pada struktur tekan .....  | 80 |
| Gambar 4. 18 | <i>Input material behaviors isotropis elastic model</i> (Abaqus). ..   | 82 |
| Gambar 4. 19 | <i>Input isotropic elastic properties</i> (Abaqus).....  | 82 |
| Gambar 4. 20 | <i>Input load isotropic elastic model</i> (Abaqus). ....   | 84 |

|              |  |     |
|--------------|--|-----|
| Gambar 4. 21 | Grafik tegangan-regangan pada isotropis elastis model.....   | 85  |
| Gambar 4. 22 | Visualisasi distribusi tegangan, S11(longitudinal) isotropis elastis model (Abaqus). .....   | 86  |
| Gambar 4. 23 | Tresca dan Von Mises <i>Criterion</i> pada ruang <i>principal stress</i> .....   | 87  |
| Gambar 4. 24 | <i>Input material behaviors isotropic elastoplastic model</i> (Abaqus). .....  | 88  |
| Gambar 4. 25 | <i>Input isotropic plastic properties</i> (Abaqus). .....  | 88  |
| Gambar 4. 26 | <i>Input load isotropic elastoplastic model</i> (Abaqus). .....  | 89  |
| Gambar 4. 27 | Grafik tegangan-regangan pada isotropis elastoplastis model dengan Von Mises <i>Yield Criteria</i> . .....                                   | 90  |
| Gambar 4. 28 | Visualisasi distribusi tegangan, S11(arah longitudinal) isotropis elastoplastis model dengan Von Mises <i>Yield Criteria</i> (Abaqus). ..... | 91  |
| Gambar 4. 29 | <i>Input material behaviors orthotropic elastic model</i> (Abaqus). .....  | 92  |
| Gambar 4. 30 | <i>Input orthotropic elastic properties</i> (Abaqus). .....  | 92  |
| Gambar 4. 31 | <i>Input load orthotropic elastic model</i> (Abaqus). .....  | 93  |
| Gambar 4. 32 | Hubungan tegangan-regangan uji tekan sejajar arah serat (Longitudinal) bambu laminasi .....  | 93  |
| Gambar 4. 33 | Grafik perbandingan tegangan-regangan pada isotropis elastis dan orthotropis elastis model.....  | 94  |
| Gambar 4. 34 | Grafik tegangan-regangan pada orthotropis elastis model. .   | 96  |
| Gambar 4. 35 | Visualisasi distribusi tegangan, S11(arah longitudinal) orthotropis elastis model (Abaqus). .....  | 97  |
| Gambar 4. 36 | <i>Orthotropic yield surface</i> (ADINA). .....  | 100 |
| Gambar 4. 37 | <i>Input material behaviors orthotropic elastic model</i> (Abaqus). .....  | 100 |
| Gambar 4. 38 | <i>Input command</i> iterasi Depvar (Abaqus). .....  | 101 |
| Gambar 4. 39 | <i>Input orthotropic elastoplastic user material properties</i> (Abaqus). .....  | 101 |
| Gambar 4. 40 | <i>Input load orthotropic elastoplastic model</i> (Abaqus). .....  | 101 |

|             |   |     |
|-------------|---|-----|
| Gambar 5. 1 | Pemodelan spesimen uji tekan sejajar serat (ASTM D143-94)<br>(Abaqus) .....   | 104 |
| Gambar 5. 2 | Uji konvergensi untuk tegangan leleh dan <i>ultimate</i> - jumlah<br>elemen <i>meshing</i> . .....  | 106 |
| Gambar 5. 3 | Uji konvergensi lendutan maksimum arah longitudinal-<br>jumlah elemen <i>meshing</i> . .....  | 106 |
| Gambar 5. 4 | Grafik tegangan-regangan pada <i>orthotropic elastoplastic</i><br><i>model</i> untuk berbagai ukuran dan jumlah elemen <i>meshing</i> . ..... | 109 |
| Gambar 5. 5 | Grafik beban-lendutan maksimum pada orthotropis elastoplastis<br>model untuk berbagai ukuran dan jumlah elemen <i>meshing</i> .....           | 112 |
| Gambar 5. 6 | Distribusi tegangan S11 (longitudinal), S22 (radial), dan S33<br>(tangensial) pada <i>orthotropic elastoplastic model</i> (Abaqus). .....     | 113 |
| Gambar 5. 7 | Potongan distribusi tegangan S11 (Longitudinal) pada<br>orthotropis elastoplastis model .....   | 116 |

## DAFTAR TABEL

|   | Halaman |
|---|---------|
| Tabel 2. 1 Sifat mekanika Bambu Petung (Irawati dan Saputra, 2012) ....   | 9       |
| Tabel 2. 2 Sifat mekanika Bambu Petung (Setyo, 2013) .....  | 17      |
| Tabel 2. 3 Sifat mekanika Bambu Petung (Setyo, 2013) .....  | 17      |
| <br>  |         |
| Tabel 4. 1 Hasil uji tekan sejajar arah Longitudinal dan Poisson rasio<br>(Eratodi, 2014). .....                                    | 70      |
| Tabel 4. 2 Hasil uji tekan tegak lurus arah radial (Eratodi, 2014). .....   | 74      |
| Tabel 4. 3 Hasil uji tekan tegak lurus arah tangensial (Eratodi, 2014). ....  | 74      |
| Tabel 4. 4 Hasil uji kuat geser sejajar serat arah longitudinal-radial<br>(Eratodi, 2014). .....                                    | 77      |
| Tabel 4. 5 Hasil uji kuat geser sejajar serat arah longitudinal-tangensial<br>(Eratodi, 2014). .....                                | 77      |
| Tabel 4. 6 Hasil uji kuat geser sejajar serat arah radial-tangensial<br>(Eratodi, 2014). .....                                      | 78      |
| Tabel 4. 7 Data hubungan tegangan-regangan dan nilai modulus elastisitas.   | 95      |
| <br>  |         |
| Tabel 5. 1 Rekapitulasi <i>material properties</i> penyusun persamaan<br>konstitutif model. ....                                    | 104     |
| Tabel 5. 2 Ukuran elemen, jumlah elemen, dan jumlah nodal model .....   | 105     |
| Tabel 5. 3 Data uji konvergensi untuk tegangan leleh di tengah bentang –<br>berbagai ukuran dan jumlah elemen meshing. ....         | 105     |
| Tabel 5. 4 Data uji konvergensi untuk lendutan maksimum arah<br>longitudinal – berbagai ukuran dan jumlah elemen <i>meshing</i> ... | 106     |
| Tabel 5. 5 Data tegangan regangan step 1-24 pada model C//5 .....   | 107     |
| Tabel 5. 6 Data tegangan regangan step 1-24 pada model C//2,5 .....   | 107     |
| Tabel 5. 7 Data tegangan regangan step 1-24 pada model C//1,25 .....  | 108     |
| Tabel 5. 8 Perbandingan tegangan dan regangan hasil eksperimental dengan<br>hasil pemodelan.....                                    | 109     |
| Tabel 5. 9 Data beban-Lendutan maksimum pada berbagai model .....   | 111     |