

Analisis Tegangan Di Sekitar Lubang Pada Pelat Komposit *Pin-Loaded* Dengan Pendekatan Numerik Dan Eksperimental

Syarif Hidayat¹⁾, Bambang K Hadi²⁾, Hendri Syamsudin²⁾

¹⁾Jurusan Teknik Mesin – Politeknik Negeri Bandung

Jl. Geger Kalong Hilir-Ds.Ciwaruga Bandung

²⁾Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara - Institut Teknologi Bandung

Jl. Ganesha 10 Bandung

syarhidayat@yahoo.com

Abstrak

Sambungan secara mekanik (*mechanical joint*) dengan pengikat seperti baut, pin, sekrup dan paku keling merupakan jenis sambungan yang paling banyak dipakai dalam pemasangan komponen komposit sebagai bagian dari struktur utama. Adanya sambungan pada struktur menyebabkan terjadinya tegangan terpusat dan juga akan menyebabkan menurunnya kekuatan struktur. Modus kegagalannya dari pelat komposit dengan sambungan baut yang mendapat beban tarik pada umumnya akan mengalami kegagalan diantara 4 jenis kegagalan yaitu, *cleavage*, *net-tension*, *shear-out* dan *bearing*.

Diberbagai literatur, beberapa metoda yang digunakan untuk menganalisis kekuatan kegagalan pada kasus sambungan baut/pin ini, diantaranya adalah kriteria Tsai-Wu, Yamada-Sun, Whitney-Nuismer dll. Analisis dilakukan baik dengan cara eksperimental, numerik, maupun analitik.

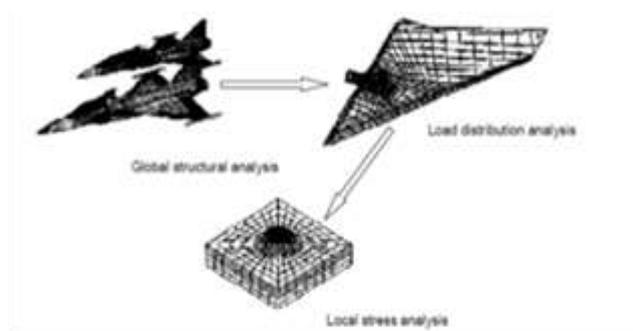
Penelitian ini akan mencoba menemukan metoda/teori baru untuk dapat memperkirakan modulus kegagalan kekuatan pada sambungan baut, dengan melihat berbagai teori yang sudah ada. Tahapan yang akan dilakukan adalah analisis tegangan dilanjutkan dengan analisis kekuatan.

Kata kunci: sambungan pin/baut, modulus kegagalan, kekuatan kegagalan, komposit.

Pendahuluan

Sambungan mekanik seperti dengan baut, pin, sekrup dan paku keling paling banyak digunakan pada sambungan komposit di struktur utama. Sambungan ini menjadi salah satu penyebab terjadinya kegagalan lokal dan timbulnya konsentrasi tegangan, serta sebagai penyebab turunya kekuatan struktur.

Struktur pesawat udara merupakan sebuah gabungan dari beberapa komponen (*skin*, *spar*, *stiffener*, dll) yang digabungkan sehingga akan didapatkan alur distribusi beban. Prosedur perancangan dijelaskan pada Gambar 1. Langkah pertama dalam merancang adalah menentukan besar beban pada sambungan, yang selanjutnya distribusi tegangan di sekitar sambungan dapat diketahui. Langkah akhir adalah memprediksi kekuatan sambungan. Sambungan mekanik sering dipilih dalam perancangan struktur pesawat, karena memberikan beberapa kemudahan seperti sederhana dan kemudahan dalam inspeksi. (Padhi et al, 2002).



Gambar 1. Prosedur perancangan struktur, (Ireman 1998)

Modus kegagalan. Kegagalan akan terjadi pada pelat komposit sambungan baut yang mengalami beban tarik. Pada umumnya ada empat jenis modulus kegagalan, yaitu *cleavage*, *net-tension*, *shear-out* dan *bearing*. (Okutan, B., 2002; Chang, F. K., et al, 1982; Sayman, O., et al, 2007; Pakdil, M., et al, 2007), atau kombinasi dari masing-masing modulus kegagalan tersebut.

Masalah utama pada sambungan baut ini adalah terbentuknya daerah konsentrasi tegangan di sekitar

lubang. Konsentrasi tegangan ini menjadi penyebab terjadinya kegagalan awal sambungan, dengan empat jenis kegagalan tersebut di atas atau gabungan di antara keempatnya, (Kradinov, V., et al, 2007).

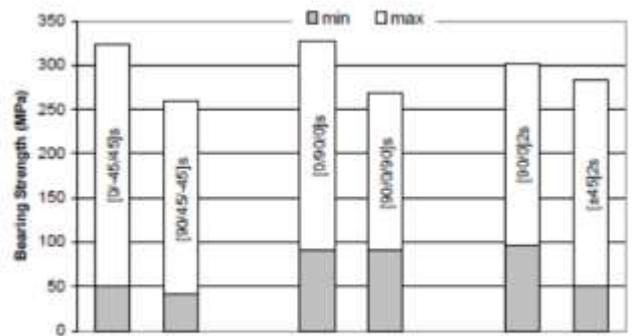
Pengaruh Geometri. Salah satu parameter yang mempengaruhi kekuatan sambungan baut adalah geometri pelat, yaitu nilai perbandingan antara lebar pelat dengan diameter lubang (W/D), dan nilai perbandingan antara jarak tepi pelat dengan diameter lubang (E/D). F Sen dan O Sayman (2009), melakukan penelitian mengenai pengaruh parameter geometri terhadap kegagalan pada pelat komposit dengan sambungan dua baut/pin serial. Mereka menunjukkan bahwa nilai kekuatan *bearing* untuk spesimen [0°/0°/60°/60°]s bertambah besar dengan meningkatnya nilai perbandingan W/D dan E/D.

Goren, Aytac dan Sayman Onur (2010), dalam penelitiannya menunjukkan bahwa jika E/D = 1, modus kegagalannya selalu *shear-out*, dengan parameter apapun. Mereka pun menunjukkan bahwa kekuatan sambungan meningkat dengan meningkatnya perbandingan E/D dan W/D, dengan modus *bearing* atau campuran dengan jenis kegagalan lain terjadi saat E/D ≥ 3, (Emre Ciplak, 2011).

Dalam penelitiannya Emre Ciplak (2011) menunjukkan bahwa makin besar nilai rasio E/D dan W/D mengakibatkan meningkatnya kekuatan *bearing*.

Hasil penelitian Okutan Buket (2001) yang ditulis dalam tesisnya *stress and failure analysis of laminated composite pinned joints*, menunjukkan bahwa kekuatan *bearing* pada sambungan pin satu lubang bergantung pada dua variabel utama yaitu dimensi geometri dan arah serat. Modus kegagalannya berubah dari *bearing* menjadi *net-tension* atau *shear-out* seiring dengan menurunnya perbandingan W/D dan E/D.

Pengaruh arah serat terhadap kekuatan *bearing* dapat dilihat pada Gambar 2. Kekuatan *bearing* untuk laminat [0/±45]s dan [0/90/0]s mendekati 325 MPa. Sedangkan kekuatan *bearing* menurun pada laminat [90/0]2s (berharga 300 MPa). Penurunan berikutnya pada laminat [±45]2s menjadi 280 MPa, dan penurunan berikutnya pada laminat [90/0/90]s dan [90/±45]s berharga 265 MPa.



Gambar 2. Pengaruh arah serat terhadap kekuatan *bearing* (Okutan Buket, 2001)

Pengaruh tekanan (sambungan baut). Penelitian dengan cara eksperimental yang telah dilakukan oleh Yan et al, (1999) memperhitungkan pengaruh tekanan baut pada permukaan pelat terhadap kegagalan pelat komposit sambungan baut. Selain pengaruh geometri terhadap kerusakan pelat, F Sen et al (2009) menunjukkan bahwa modus kegagalannya beban kegagalan maksimum dipengaruhi pula oleh beban momen awal (sambungan baut). F Sen et al (2009), Emre Ciplak et al (2011) dari hasil penelitiannya menunjukkan bahwa harga kekuatan *bearing* pada sambungan baut lebih besar dibandingkan dengan sambungan pin.

Hasil penelitian yang senada didapat oleh Goren Aytac et al (2010) yang menunjukkan bahwa beban momen awal meningkatkan kapasitas beban kegagalan, sehingga hubungan beban kegagalan terhadap beban momen awal tidak linier.

Modus kegagalan & Kriteria. Ketika mengevaluasi kekuatan komposit sambungan pin, terlebih dahulu harus dievaluasi besarnya distribusi tegangan di sekitar lubang. Kondisi kegagalan dapat diprediksi dengan bantuan kriteria kegagalan yang sesuai. Ivana Ilić et al (2011) menggunakan kriteria kegagalan Tsai-Wu untuk menganalisis. Kriteria kegagalan ini dirumuskan dengan:

$$(F.I) = F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + F_6\sigma_6 + F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\sigma_6^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2, \dots\dots\dots(1)$$

$$F_1 = \frac{1}{X_t} + \frac{1}{X_c}, \quad F_{11} = -\frac{1}{X_t X_c},$$

$$F_2 = \frac{1}{Y_t} + \frac{1}{Y_c}, \quad F_{22} = -\frac{1}{Y_t Y_c},$$

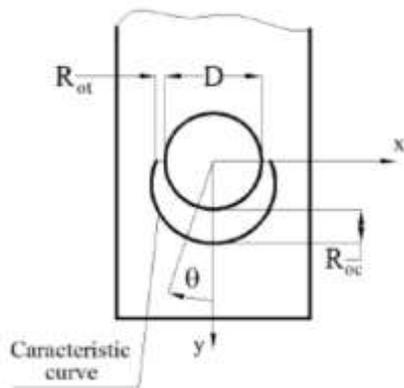
$$F_6 = 0, \quad F_{66} = \frac{1}{S^2}, \quad F_{12} = 0,$$

Dimana *FI* adalah indeks kegagalan, σ_i ($i = 1, 2, 6$) adalah komponen tegangan berdasarkan arah sumbu prinsipal material, dan X_{tc} , Y_{tc} adalah kekuatan tarik/tekan lamina ke arah longitudinal dan transversal, dan *S* adalah kekuatan geser lamina. Pada pemodelan ini diharapkan kegagalan akan terjadi pada saat *FI* lebih besar atau sama dengan 1.

Kurva karakteristik merupakan kurva artifisial yang dibentuk oleh panjang karakteristik kompresi dan panjang karakteristik tarik (Whitney and Nuismer, 1974), seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Ketika panjang karakteristik untuk kompresi dan tarik diketahui, modulus kegagalan dapat dievaluasi pada kurva karakteristik tersebut. Metoda yang populer untuk membuat kurva karakteristik disampaikan oleh Chang et al(1982). kurva karakteristik, dituliskan sebagai berikut :

$$r_c(\theta) = D/2 + R_{ot} + (R_{oc} - R_{ot})\cos\theta, \dots\dots\dots(2)$$

Dimana R_{oc} dan R_{ot} adalah panjang karakteristik dari kompresi dan tarik. Sudut θ diukur berlawanan arah jarum jam atau searah jarum jam dari arah gaya ke sisi lubang sambungan seperti terlihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Diagram Skematik kurva karakteristik(Whitney and Nuismer,1974)

Metodologi Penelitian

Tahap-tahap yang direncanakan akan dilkauan pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Analisis Tegangan

Pada tahap ini akan dilakukan pemodelan dengan analisis numerik menggunakan FEM (*Finite Element Method* /Metode elemen hingga). Untuk mengukur kebenaran hasil dari analisis numerik ini, akan dilakukan analisis percobaan/eksperimen. Analisis eksperimen ini akan dilakukan pengujian tarik dengan analisis DIC (*Digital Image Correlation*/Korelasi Citra Digital)).

Langkah berikutnya pada tahap ini adalah membandingkan hasil numerik dengan eksperimen. Jika hasilnya mendekati (perbedaan maksimal 10%), maka analisis numerik dianggap valid.

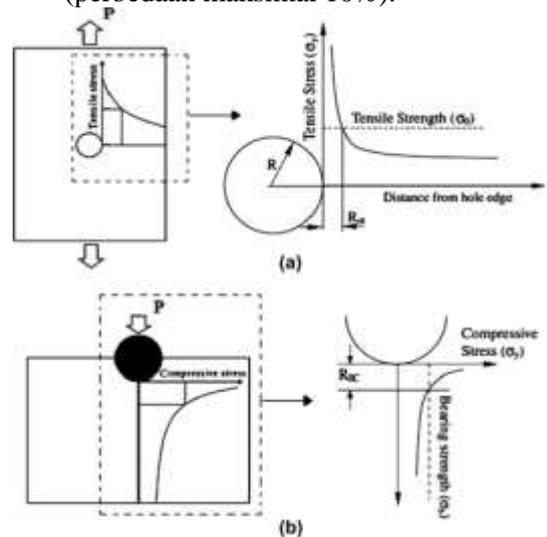
2. Analisis Kekuatan

Pada tahap ini ada beberapa langkah yang akan dilakukan :

- Penentuan kurva karakteristik. Untuk

mendapatkan kurva karakteristik harus dilakukan pengujian tarik maupun tekan (Gambar 4). Proses pengujian ini harus mengikuti prosedur dan aturan yang terdapat pada standar ASTM.

- Langkah berikutnya pada tahap ini adalah analisis numerik dengan FEM. Analisis numerik yang akan dilakukan adalah analisis dengan teori Yamada-Sun dan Kegagalan Progresif.
- Hasil pengujian tarik dan tekan, dibandingkan dengan analisis numerik FEM, harus memberikan hasil yang sama (perbedaan maksimal 10%).

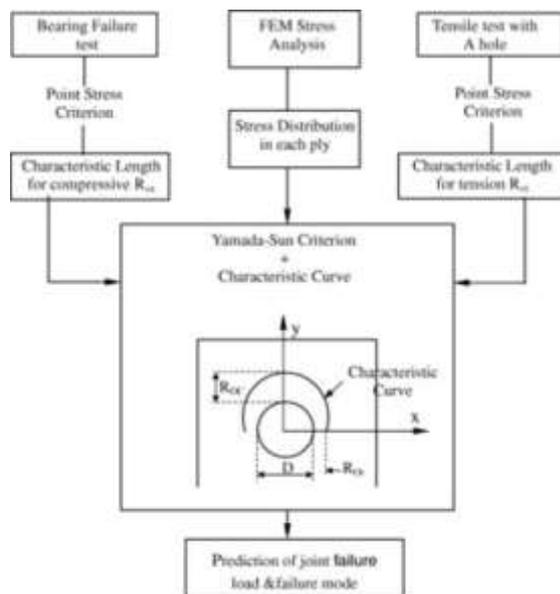


<http://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S0261306911006868-gr6.jpg>

Gambar 4. Panjang karakteristik (a) tarik, R_{ot} dan (b) kompresi, R_{oc}

- Jika hasil analisis pengujian dan numerik sama, maka dapat disimpulkan bahwa prediksi modulus kegagalandan kekuatan kegagalan dapat dilakukan dengan metoda baru yaitu gabungan antara teori kegagalan progresif, kurva karakteristik, dan Yamada-Sun.

Secara umum prosedur analisis modulus kegagalandan beban kegagalan dapat digambarkan pada diagram alurseperti terlihat pada Gambar 5.



<http://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S026382230800319X-gr6.jpg>

Gambar 5. Alur proses analisis beban kegagalan dan kekuatan kegagalan

Hasil dan Pembahasan

F Sen et al (2009), Emre Ciplak et al (2011) dari hasil penelitiannya mengatakan bahwa harga kekuatan *bearing* pada sambungan baut lebih besar dibandingkan dengan sambungan pin. F Sen et al (2009), mereka menyatakan bahwa beban momen awal yang diberikan pada sambungan baut adalah 3 Nm. Nilai kekuatan *bearing* pada pelat komposit pada umumnya lebih besar saat diaplikasikan beban momen awal 3 Nm dibandingkan dengan jika beban momen awalyang diberikan sebesar 2, 4, dan 5 Nm. Dengan kata lain jika pemberian beban momen awal lebih besar dari 3 Nm dapat menimbulkan kerusakan pada serat dan atau matrik komposit, sehingga akan terjadi kerusakan yang tidak diinginkan sebelum pengujian tarik dilakukan, yang berakibat turunya kekuatan *bearing* pada penerapan beban momen awal 4 dan 5 Nm.

Kekuatan *bearing* bisa jadi tergantung pada keberadaannya lapisan serat 0° pada laminat $\pm 45^\circ$. jika terdapat lapisan serat 0° pada laminat $\pm 45^\circ$ maka kekuatan *bearing*meningkat dari 280 MPa menjadi 325 MPa. Ketidak-beradaan lapisan serat 0° tidak hanya menyebabkan turunya kekuatan *bearing* tetapi juga berubahnya modus kegagalan, (dapat dilihat pada Gambar 2.)

Kekuatan kegagalandan modus kegagalan pada kasus sambungan baut/pin dipengaruhi banyak faktor : faktor geometri pelat, metoda manufaktur spesimen, dll. Faktor geometri yang paling banyak diamati oleh para peneliti adalah rasio lebar pelat dengan diameter lubang W/D dan jarak tepi pelat dengan diameter

lubang E/D.

Analisis yang dipakai oleh para peneliti diantaranya menggunakan metoda Yamada-Sun yang diaplikasikan pada kurva karakteristik (metoda Whitney-Nuismer). Adapula yang menggunakan metoda Tsai-Wu yang diaplikasikan pada kurva karakteristik.

Cara lain yang dilakukan, yaitu metoda kegagalan progresif dengan aplikasi kriteria kegagalan Tsai-Wu.

Kesimpulan

Dari uraian di atas, yang paling banyak dilakukan dalam menganalisis kekuatan kegagalan dan modus kegagalan adalah gabungan kriteria kegagalan Yamada-Sun dengan kurva karakteristik dan gabungan kriteria kegagalan Tsai-Wu dengan kurva karakteristik.

Dari hasil kajian pustaka belum ada yang melakukan analisis gabungan tersebut di atas dilanjutkan dengan analisis tahap berikutnya berupa kegagalan progresif sebagai pembandingan hasil analisis gabungan tersebut. Metoda analisis kegagalan progresif ini diperlukan sebagai pembandingan hasil analisis gabungan tersebut, maka dalam penelitian ini akan dilakukan analisis gabungan dari kriteria kegagalan Yamada-Sun, kurva karakteristik dan kegagalan progresif. Dipilihnya kriteria kegagalan Yamada-Sun dengan anggapan lebih sesuai dengan percobaan dibanding dengan kriteria kegagalan lain. Sedangkan dipilihnya kegagalan progresif, karena metoda ini memungkinkan diprediksinya kerusakan bertahap setiap lapisan, sehingga kurva beban-deformasi dapat diprediksi.

Referensi

Chang, F. K., Scott, R. A., and Springer, G. S. . 1982, *Strength of mechanically fastened composite joints* J. Compos. Mater., 16, 470–494.

Chang, F.K and Richard A Scott, 1984, *failure of composite laminates containing pin loaded holes-methode of solution*, journal of composite materials, vol.18

Emre Ciplak and Onur Sayman, 2011, *Failure Load Of Mechanically Fastened Immersed Composite Laminated Plate Under A Preload Moment*, polymer & polymer composite, vol.19, no.1

F Sen and O Sayman, 2009, *The Influence Of Geometrical Parameter On Failure Response Of Two Serial Pinned/Bolted Composite Joints*, Proc.ImechE Vol.223 Part L: J.Materials: design and Applications.

- Jones, R.M., 1975, "*Mechanical of Composite Materials*", Mc.Graw-Hill Co.
- Okutan Buket, 2001, *Stress and failure analysis of laminated composite pinned joints*, thesis of the degree of doctor, School of Natural and Applied Science of Dokuz Eylül University.
- Okutan, B., 2002, *The effects of geometric parameters on the failure strength for pin-loaded multi-directional fiberglass reinforced epoxy laminate*. Compos. Part B: Eng., 33, 567–578.
- Padhi, G S, McCarthy, M A and Mc Carthy, C T, 'BOLJAT – BOLJAT-A 2002, *tool for designing composite bolted joints using three-dimensional finite element analysis*', Composites Part A, vol. 33, no. 11, pp.1573-1584
- Pakdil, M., Sen, F., Sayman, O., and Benli, S. 2007, *The effect of preload on failure response of glass-epoxy laminated composite bolted-joints with clearance*. J. Reinf. Plas. Compos., 26, 1239–1252
- Roskam, J, 1986, *Airplane design, Part III: Layout design of cockpit, fuselage wing and empennage: cutaways and inboard profiles*, Roskam aviation and engineering corporation, Kansas, USA.
- Yamada SE, Sun CT. 1978, *Analysis of laminate strength and its distribution*, J Compos Mater, 12:275–84.