

Hubungan Diameter Pasak, Lubang Sambungan Dan Ketebalan Plat Terhadap Distribusi Tegangan Sisa

Ari Wahjudi, Anindito Purnowidodo, Wijil Pambudi

Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang

Jl. MT.Haryono 167 Malang 65145 Jatim

[E-Mail: Anindito@ub.ac.id](mailto:Anindito@ub.ac.id)

Abstract

The discontinuities on the structures or members are often to be encountered such as, rivet and bolt holes as well as notches. These discontinuities are agents for stress raiser and it can initiate cracks in the vicinity of holes or in the notch roots. It is well known that most of the fatigue failure is caused by cracks growth initiated from the discontinuities. To reduce possibility the initiation of crack in those stress raisers, the compressive residual stress, in general, is imposed to the region in which the stress concentrates. In the present study, using expansion hole technique carried out by aid of computer simulation, the effect of mandrel diameter and thickness of the blank to the residual stress in the vicinity of the hole is investigated. The result shows that the magnitude of the residual stress in the vicinity of the hole varies depending on the magnitude of the expansion and the thickness of blank. In addition, in the certain distance from the hole, the tensile residual stress develops, hence, it may endanger a component because it causes the crack growth rate increase, as consequent, the life time of a component is shorter.

Keyword: mandrell diameter, hole diameter, thickness, residual stress distribution

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Sambungan tidak permanen atau sambungan semi permanen, masing-masing, yang sering digunakan adalah sambungan dengan menggunakan kombinasi mur-baut dan sambungan dengan menggunakan paku keling (*rivet*). Untuk menggunakan jenis sambungan ini, maka pada bagian komponen yang akan disambung harus dilubangi sedemikian rupa sehingga proses penyambungan dapat dilakukan. Meskipun jenis sambungan ini mempunyai keuntungan untuk dibongkar dan dipasang relatif mudah, akan tetapi dapat menimbulkan potensi masalah baru, yaitu lubang dimana tempat penyambungan mur-baut ataupun keling dilakukan menimbulkan konsentrasi tegangan, sehingga kekuatan material yang dipilih untuk jenis sambungan ini harus mempertimbangkan juga besar tegangan yang terkonsentrasi di daerah sekitar lubang [1].

Pada proses perencanaan suatu struktur atau komponen, pada umumnya

konsentrasi tegangan yang terjadi pada bagian komponen dihindari sebisa mungkin, atau jika tidak dapat dihindari maka perlu berbagai pertimbangan agar supaya komponen tersebut aman dan tidak mengalami kegagalan [1]. Kegagalan yang disebabkan oleh konsentrasi tegangan akibat beban statik atau monotonik jarang terjadi, karena cara untuk menganalisa tegangan pada berbagai bentuk struktur sudah berkembang dengan baik [2]. Akan tetapi, dari hasil studi yang dilakukan oleh Nishida menunjukkan bahwa 70% kasus kegagalan pada komponen terjadi akibat beban berulang atau dinamis [2]. Kegagalan pada beban berulang tidak hanya dipengaruhi oleh besar beban atau kondisi pembebanan tetapi juga dipengaruhi oleh kondisi material [2-10]. Kegagalan yang terjadi dengan mekanisme ini bahkan dapat mengakibatkan suatu material mengalami *fracture* atau patah, dan ini disebut dengan patah *fatigue* atau patah lelah. Patahan jenis ini diawali dengan retak yang terinisiasi pada daerah yang mengalami deformasi plastis secara lokal, dan ini terjadi pada daerah yang mempunyai konsentrasi

tegangan. Jika besar konsentrasi tegangan tersebut melebihi tegangan luluh bahan, maka deformasi plastis akan terjadi [1].

Ada berbagai cara untuk memperlambat perambatan retak. *Stoping hole*, adalah cara yang relatif mudah dan praktis, karena cara ini dapat dilakukan tanpa membongkar komponen. *Stoping hole* dilakukan dengan cara membuat lubang disekitar ujung retak. Tujuannya adalah untuk menurunkan konsentrasi tegangan pada ujung retak [11]. Cara lain adalah dengan teknik pengelasan (*welding*). Teknik ini dilakukan dengan cara mengerinda bagian yang retak dan selanjutnya dilakukan pengelasan dengan memberi masukan logam (*filler*). Cara ini adalah sesuai untuk logam yang mempunyai mampu las yang baik. Jika teknik pengelasan dilakukan pada logam yang tidak mempunyai sifat mampu las yang baik maka dapat merusak sifat mekanik dari material, dan ini dapat membahayakan integritas suatu struktur [1]. Perambatan retak dapat juga mengalami perlambatan dan umur suatu komponen menjadi lebih panjang, jika di depan ujung retak terdapat tegangan sisa tekan [12-17]. Hal ini dapat dilakukan dengan melepas atau membongkar komponen dan kemudian diperlakukan sedemikian rupa sehingga tegangan sisa tekan terbentuk di depan ujung retak.

Cara-cara untuk memperlambat atau bahkan menghentikan perambatan retak, pada umumnya adalah dilakukan setelah terjadi retak pada komponen [18]. Hal ini kurang menguntungkan, karena harus menghentikan operasi dan harus melepas komponen dari struktur. Telah dibuktikan dari berbagai penelitian bahwa tegangan sisa kompresi pada struktur dapat mencegah terjadinya inisiasi retak dan dapat juga memperlambat perambatan retak [12-17]. Salah satu cara untuk mencegah inisiasi retak dan merambatnya retak dari lubang mur-baut atau keling adalah dengan cara yang dikenal dengan *cold expansion hole technique* [11]. Teknik ini dilakukan dengan menekan bola logam pada permukaan lubang, dan penekanan dilakukan sampai terjadi deformasi plastis, sehingga menyebabkan terjadinya tegangan sisa tekan disekitar permukaan lubang.

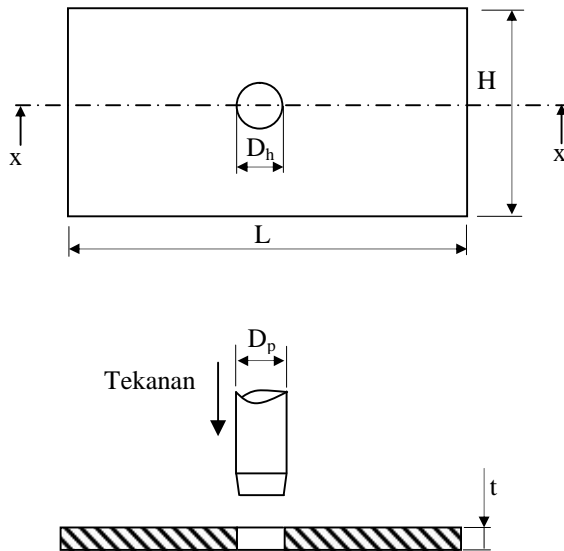
Kelemahan teknik ini adalah tegangan sisa tekan terjadi pada daerah permukaan saja. Telah dibuktikan bahwa kondisi tegangan sisa di depan ujung retak pada daerah di bawah permukaannya juga mempengaruhi perambatan retak [16,17]. Oleh karena itu, untuk memperbaiki teknik *cold expansion hole*, maka dalam studi ini dengan mengganti bola logam dengan pasak (*pin*) akan diteliti bagaimana hubungan rasio diameter pasak dan diameter lubang sambungan terhadap distribusi tegangan sisa tekan disekitar logam pada ketebalan plat yang bervariasi. Digunakan pasak karena dapat melakukan ekspansi sepanjang lubang, sehingga diharapkan tegangan sisa tekan yang terbentuk tidak terjadi pada daerah permukaan saja.

METODE PENELITIAN

Pada studi ini difokuskan pada distribusi tegangan sisa yang terjadi pada daerah sekitar lubang untuk sambungan tidak permanen, dalam hal ini lubang untuk sambungan keling atau mur-baut. Metode yang digunakan adalah simulasi numerik dengan menggunakan bantuan *software* berbasis metode elemen hingga. Simulasi komputer ini dilakukan dengan menggunakan prosedur sesuai dengan kode standar *software* ANSYS.

Dalam simulasi ini model material yang digunakan adalah identik dengan Aluminium komersial seri 1000, yang mempunyai spesifikasi sebagai berikut : *Density* (ρ) 2,705 g/cm³, *Poisson's Ratio* (ν) 0,33, *Elastic Modulus* (E) 69 Gpa., *Tensile Strength* (σ_u) 110 Mpa., *Yield Strength* (σ_y) 103 MPa., *Elongation* (e) 10 %, *Hardness* 30 HB.

Gambar 1. berikut ini menggambarkan secara skematik bagaimana proses *cold expansion hole* dilakukan.



Potongan x-x

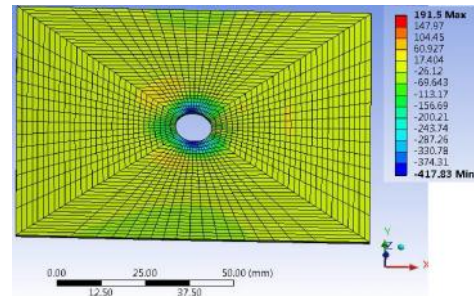
Gambar 1. Proses *cold expansion hold*

Gambar 1. menunjukkan suatu lubang sambungan dengan diameter D_h pada suatu plat dengan ketebalan t , diekspansi dengan cara memberi tekanan pada lubang tersebut dengan pasak berdiameter D_p . Karena $D_p > D_h$, maka pada keliling lubang akan terdeformasi sehingga $D_p = D_h$, maka mengakibatkan terbentuk tegangan sisa disekitar lubang. Dalam studi ini akan diteliti distribusi tegangan sisa pada ketebalan plat t yang berbeda dan besar D_p yang bervariasi.

Hasil

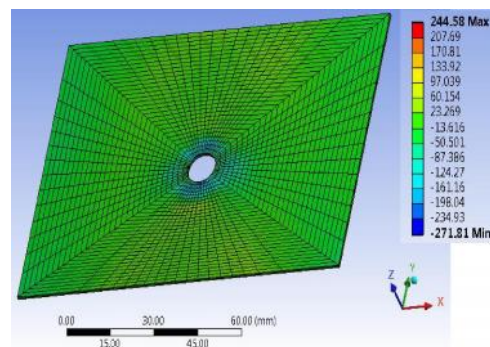
Gambar 2 menunjukkan contoh *contour* distribusi tegangan sisa (MPa.) pada plat dengan ketebalan $t = 1$ dan telah diekspansi dengan pasak dengan diameter $D_p = 8.4$ mm. Dari gambar tersebut menunjukkan bahwa terdapat tegangan sisa disekitar lubang yang mana kondisinya bervariasi tergantung dari jarak terhadap sisi lubang. Karena umumnya plat pada suatu konstruksi hanya menerima beban axial saja atau satu arah, maka pada pada gambar tersebut hanya menunjukkan untuk satu arah

orientasi saja, dalam hal ini arahnya paralel dengan sumbu x .



Gambar 2. Contoh distribusi tegangan sisa pada sekitar lubang dengan $t = 1$ mm dan $D_p = 8.4$ mm.

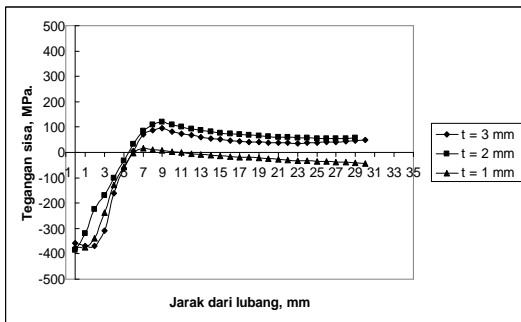
Gambar 3. adalah contoh *contour* distribusi tegangan sisa untuk plat dengan ketebalan $t = 1$ mm setelah diekspansi dengan pasak dengan diameter $D_p = 8.2$ mm.



Gambar 3. Contoh distribusi tegangan sisa pada sekitar lubang dengan $t = 1$ mm dan $D_p = 8.2$ mm.

Gambar 2 dan 3 menunjukkan bahwa pada daerah sekitar lubang setelah diekspansi oleh pasak didominasi *contour* dengan warna biru yang mengindikasikan bahwa pada daerah tersebut masih mengalami tegangan tekan meskipun tidak terdapat tekanan dari pasak, maka hal ini dapat dikatakan bahwa pada daerah tersebut terdapat tegangan sisa tekan. Secara gradual warna biru akan berubah menjadi merah yang mengindikasikan tegangan dalam kondisi tarik, jika jaraknya semakin jauh dari sisi lubang.

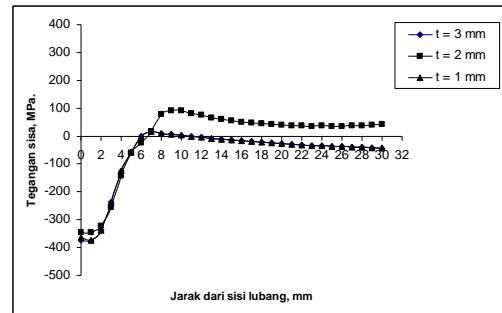
Gambar 4. adalah rangkuman dari besar dan kondisi tegangan sisa disekitar lubang setelah proses ekspansi dengan besar diameter pasak $D_p = 8.4$ mm yang dinyatakan dengan hubungan besar tegangan sisa dan jarak dari sisi lubang. Dari gambar tersebut terlihat bahwa besar tegangan sisa bervariasi tergantung jarak dari sisi lubang. Di samping itu juga kondisi tegangan sisa juga berubah. Mulai dari sisi lubang atau 0 mm sampai dengan sekitar 6 mm dari sisi lubang, kondisi tegangan sisa adalah tekan yang ditunjukkan dengan harga negatif, dan setelah jarak lebih besar 6 mm dari sisi lubang secara gradual tegangan sisa akan berubah menjadi tegangan sisa tarik yang ditunjukkan dengan harga positif. Setelah mencapai titik maksimumnya, besar tegangan sisa tarik secara gradual menurun, meskipun kondisinya masih tarik kecuali pada plat dengan ketebalan $t = 1$ mm. Dari analisa tegangan pada kasus ini diketahui bahwa setelah proses ekspansi tidak hanya tegangan sisa tekan saja yang terbentuk, tetapi juga tegangan sisa tarik. Tegangan sisa tarik dapat membahayakan kekuatan dari suatu komponen pada suatu struktur.



Gambar 4. Hubungan jarak dari lubang dan besar tegangan sisa. $D_p = 8.4$ mm

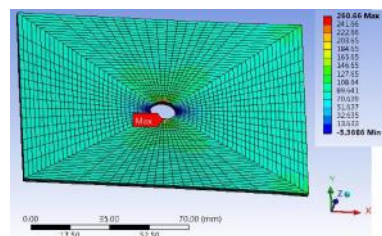
Gambar 5. adalah seperti halnya pada Gbr.4, tetapi pada gambar ini untuk diameter pada $D_p = 8.2$ mm. Dari gambar ini juga diketahui bahwa transisi dari tegangan sisa tekan menjadi tarik terjadi pada jarak sekitar 6 mm dari sisi lubang atau 0.6 dari diameter lubang ($0.6 D$) sebelum diekspansi, selanjutnya jarak tersebut disebut sebagai titik transisi. Tidak seperti pada $D_p = 8.4$ mm, pada kasus $D_p = 8.2$ mm tegangan sisa tarik

yang terbentuk setelah titik transisi hanya terjadi pada $t = 2$ mm. Dari kedua fenomena ini, maka dapat dikatakan bahwa setelah jarak lebih dari $0.6D$ dapat terbentuk tegangan sisa tarik. Ini harus mendapat perhatian dalam rancang bangun suatu komponen yang berhubungan dengan ekspansi lubang.

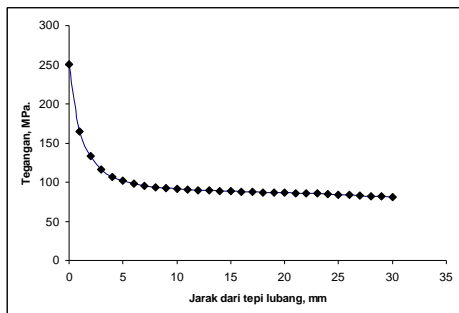


Gambar 5. Hubungan jarak dari lubang dan besar tegangan sisa. $D_p = 8.2$ mm

Karena pada umumnya konstruksi plat hanya mendapat satu arah pembebanan saja atau ke arah tertentu saja, dalam hal ini adalah paralel terhadap sumbu x , maka pengaruh tegangan sisa yang terbentuk di sekitar lubang setelah diekspansi dengan pasak terhadap besar konsentrasi tegangan yang disebabkan oleh tegangan aksial dipelajari dalam penelitian ini. Gambar 6. menunjukkan *contour* konsentrasi tegangan pada daerah sekitar lubang yang disebabkan oleh tegangan aksial searah sumbu x dan diasumsikan besar tegangan aksial tersebut adalah 85 MPa. atau sekitar sepertiga dari kekuatan material plat. Dari gambar tersebut terlihat konsentrasi tegangan terjadi tepat pada sisi lubang yang diindikasikan dengan warna merah, dan besar konsentrasi tegangan yang terjadi adalah 3 kali lebih besar dari besar tegangan aksialnya.



Gambar 6. *Contour* konsentrasi tegangan pada daerah lubang. Unit: MPa.



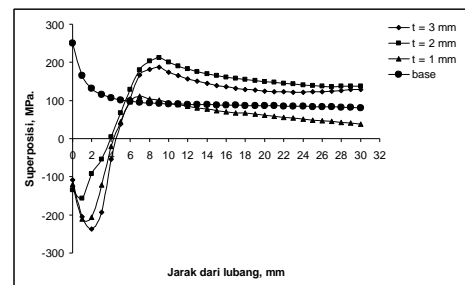
Gambar 7. Variasi tegangan pada daerah sekitar lubang. Beban aksial 85 MPa.

Gambar 7. adalah ringkasan besar distribusi konsentrasi tegangan sesuai dengan jarak dari lubang. Dari gambar tersebut diketahui bahwa besar tegangan bervariasi. Pada daerah ditepi lubang (atau pada jarak 0 mm) tegangan akan terkonsentrasi sekitar 3 kali dari tegangan yang bekerja pada plat. Semakin jauh dari tepi lubang, besar tegangan secara gradual mempunyai besar yang sama dengan tegangan kerja. Karena konsentrasi tegangan inilah maka, berbagai usaha dilakukan untuk menurunkan konsentrasi tegangan. Dalam studi ini, cara yang digunakan adalah dengan memberikan tegangan sisa disekitar lubang. Meskipun cara ini sudah dikenalkan oleh peneliti lain, namun umumnya mereka tidak menguji bagaimana pengaruh ketebalan plat.

Selanjutnya untuk mengetahui bagaimana pengaruh tegangan sisa disekitar lubang terhadap konsentrasi tegangan, maka untuk mengetahui hal tersebut tiap kondisi tegangan sisa yang dihasilkan dengan ekspansi disuperposisikan dengan kondisi tegangan disekitar lubang ketika diberi beban aksial paralel sumbu *x* untuk masing-masing kondisi, atau grafik pada Gambar 4 dan 5, masing-masing disuperposisikan dengan grafik pada Gambar 7.

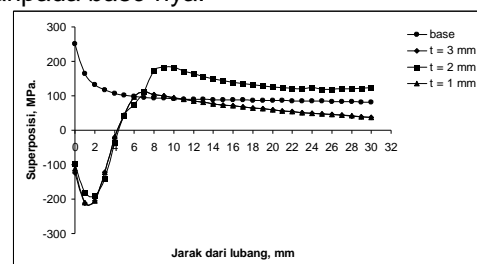
Gambar 8. adalah hasil superposisi Gambar 4 dan 7 yang mana ekspansi menggunakan diameter pasak *Dp* = 8.4 mm. Base adalah plat dengan lubang tanpa mengalami ekspansi, sedangkan *t* = 1, 2 dan 3 mm adalah superposisi antara base dan lubang yang telah diekspansi yang mana terdapat tegangan sisa disekitar lubang. Dari gambar ini terlihat walau diberi

beban aksial sebesar 85 MPa. pada plat dengan lubang yang telah diekspansi, konsentrasi tegangan tarik tidak terjadi pada daerah sekitar lubang, bahkan tegangan pada sekitar lubang masih dalam kondisi tekan pada jarak dibawah sekitar 4 mm untuk semua ketebalan plat atau $0.4D$. Pada daerah ini, karena masih dalam kondisi tekan, sehingga meskipun diberi beban aksial kondisi tegangan masih minimum, akan tetapi jika lebih dari $0.4D$ mempunyai tegangan tarik bahkan dapat lebih besar dari kondisi base jika lebih dari $0.6D$, tentunya hal ini sangat membahayakan struktur, kecuali pada *t* = 1 mm.



Gambar 8. Hasil superposisi Gbr.4 dan 7

Untuk superposisi dengan *Dp* = 8.2 ditunjukkan pada Gambar 9. Dari gambar ini juga diketahui, bahwa transisi tegangan sisa tekan menjadi tarik juga terjadi pada sekitar $0.4D$. Dari sini juga diketahui bahwa hanya pada *t* = 2 mm , setelah sekitar $0.6D$ mempunyai tegangan yang lebih tinggi daripada base-nya.

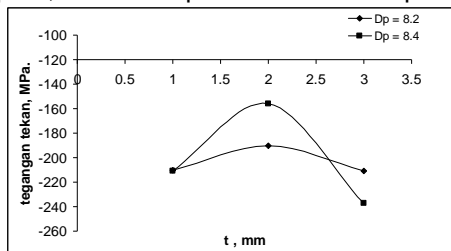


Gambar 9. Hasil superposisi Gbr.5 dan 7

Dari Gambar 8 dan 9 dapat kita ketahui bahwa metode ekspansi lubang untuk menimbulkan tegangan sisa tekan disekitar lubang ternyata mempunyai efek lain yaitu berupa tegangan sisi tarik, terutama setelah jarak dari lubang lebih besar dari $0.6D$. Sehingga jika diberi beban, maka pada

daerah tersebut dalam kondisi dibawah tegangan lebih besar daripada lubang tanpa ekspansi atau tanpa tegangan sisa (base). Meskipun demikian pada jarak kurang dari $0.4D$ dari sisi lubang masih dalam kondisi tekan. Hal ini tentunya dapat meningkatkan kekuatan suatu komponen, karena kondisi ini mempersulit terjadinya inisiasi retak, terutama yang disebabkan oleh beban dinamis (*fatigue*).

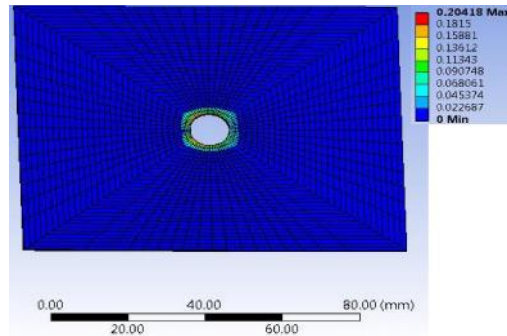
Gambar 10. menunjukkan hubungan antara tebal plat dan tegangan sisa tekan minimum untuk masing-masing diameter pasak setelah disuperposisi. Garis kontinyu adalah garis dugaan atau harapan yang menunjukkan hubungan pengaruh ketebalan plat terhadap tegangan sisa tekan minimum. Dari gambar ini dapat diketahui bahwa besar tegangan sisa tekan yang terbentuk pada daerah sekitar lubang tidak berbanding lurus dengan tebal plat. Walaupun masih dalam kondisi tekan pada kasus di studi ini, tetapi hasil ini memberikan petunjuk bahwa metode ekspansi pada lubang harus memperhatikan parameter-parameter seperti, ketebalan plat dan besar ekspansi.



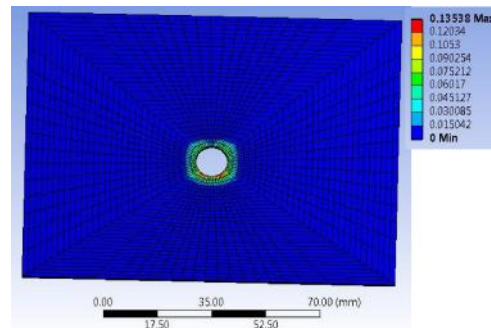
Gambar 10. Hubungan antara tebal plat, t dan tegangan sisa tekan minimum untuk masing-masing diameter pasak, Dp .

Pembahasan

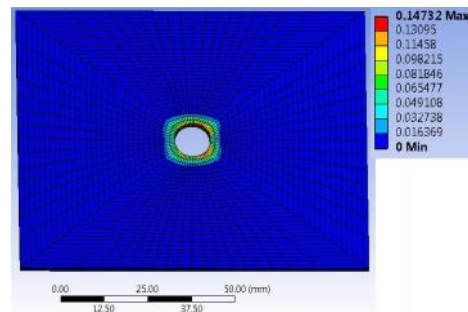
Untuk mengetahui penyebab distribusi tegangan sisa disekitar lubang yang telah diekspansi, maka Gambar 11. menunjukkan contoh *contour* distribusi regangan plastis pada sekitar lubang dengan $Dp = 8.4$ mm. Dari gambar ini diketahui bahwa regangan plastis terjadi pada daerah sebagian kecil disekeliling lubang, sedangkan pada umumnya pada daerah lain didominasi warna biru yang mengindikasikan bahwa regangan plastis tidak terjadi.



a) $t = 1$ mm



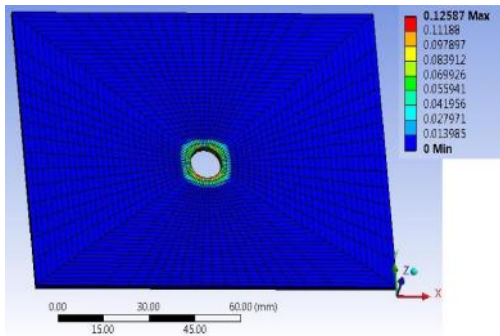
b) $t = 2$ mm



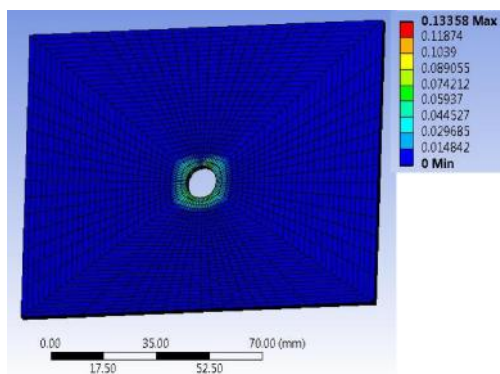
c.) $t = 3$ mm

Gambar 11. contoh *contour* distribusi regangan plastis, $Dp = 8.4$ mm

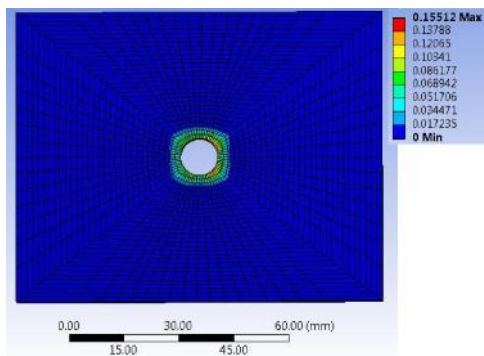
Selanjutnya pada Gambar 12. adalah contoh *contour* regangan plastis pada daerah sekitar lubang untuk $Dp = 8.2$ mm. Dari sini terlihat bahwa regangan plastis juga terjadi sama seperti pada kondisi ekspansi dengan pasak $Dp = 8.4$ mm.



a). $t = 1$ mm



b). $t = 2$ mm

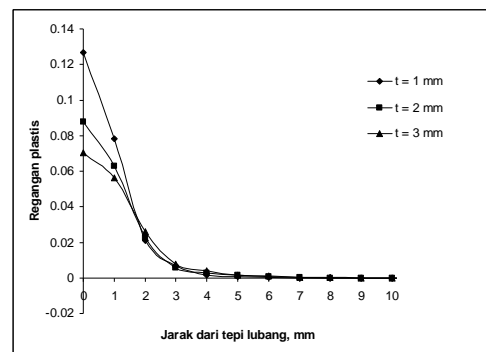


c). $t = 3$ mm

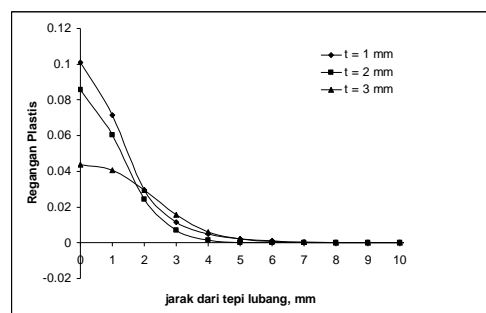
Gambar 12. Contoh *contour* distribusi regangan plastis, $Dp = 8.2$ mm

Untuk mengetahui distribusi regangan plastis pada masing-masing kondisi maka Gambar 13. menunjukkan rangkuman distribusi regangan tersebut untuk $Dp = 8.4$ mm . Dari gambar ini dapat diketahui bahwa

setelah jarak mencapai lebih besar daripada 4 mm dari sisi lubang atau $0.4D$, regangan plastis tidak terjadi. Dari sini juga menunjukkan bahwa regangan plastis terbesar terjadi pada plat dengan ketebalan $t = 1$ mm, hal inilah yang menyebabkan tegangan sisa tekan terjadi pada $t = 1$ mm seperti, dan selanjutnya berturut-turut diikuti oleh ketebalan 2 dan 3 mm. Deformasi plastis inilah yang menyebabkan tegangan sisa tekan yang terjadi pada jarak kurang dari $0.4D$ besarnya melebihi tegangan *yeild*-nya yang mana mempunyai tegangan yeild sebesar 260 MPa. Selanjutnya tegangan sisa tekan tarik yang terjadi pada jarak lebih besar daripada $0.4D$ penyebabnya adalah regangan elastis, hal ini diindikasikan bahwa regangan plastis pada daerah tersebut adalah nol, hal ini disebabkan adanya kontraksi di daerah plastis (kurang dari $0.4D$).



Gambar 13. Distribusi regangan plastis pada kasus $Dp = 8.4$ mm



Gambar 14. Distribusi regangan plastis pada kasus $Dp = 8.2$ mm

Gambar 14. menunjukkan regangan plastis sekitar lubang untuk $Dp = 8.2$ mm. Dari gambar tersebut menunjukkan hal yang sama, yang mana regangan plastik terbesar terjadi

pada $t = 1$ mm. Dari Gambar 13 dan 14 menunjukkan bahwa tegangan sisa yang terjadi setelah jarak lebih besar dari $0.4D$ adalah tegangan sisa tarik elastis, terutama pada $t = 2$ dan 3 mm.

KESIMPULAN

Dari hasil simulasi diketahui bahwa:

1. Besar tegangan sisa tekan disekitar sisi lubang adalah tergantung dari ketebalan dan diameter pasak yang digunakan unruk mengekspansi lubang.
2. Tegangan sisa tekan terjadi pada sekeliling lubang dalam daerah kurang dari $0.4D$ (diameter lubang) dari sisi lubang. Jika lebih dari $0.4D$, tegangan sisa berubah menjadi tegangan sisa tarik, terutama pada $t = 2$ dan 3 mm.
3. Tegangan sisa tekan terjadi karena pada daerah sekitar lubang, atau kurang dari $0.4D$ dari sisi lubang mengalami deformasi plastis.
4. Tegangan sisa tarik yang terjadi pada daerah lebih dari $0.4D$ disebabkan karena adanya kontraksi pada daerah plastis. Tegangan sisa tarik masih dalam daerah elastis, hal ini diindikasikan dengan tidak adanya regangan plastis pada daerah tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Robert L. Mott, RE, Machine Elements in Mechanical Design, Prentice Hall, 2004
- [2] Shin Ichi Nishida, Failure Analysis in Engineering Application, Butterworth-Heinemann Ltd., 1992.
- [3] A.J. McEvily, " Failures in inspection procedures: case studies", *Engineering Failure Analysis*, Vol. 11, 2004, pp. 167-176.
- [4] Charlie R. Brooks, Ashok Choudhury, "Failure Analysis of Engineering Materials", *Profesional Engineering*, Mc.Graw Hill, 2002.
- [5] F.S. Silva, " Analysis of a vehicle crankshaft failure", *Engineering Failure Analysis*, Vol. 10, 2003, pp. 605-616.
- [6] Jung-Kyu Kim, Dong-Suk Shim, "The variation in fatigue crack growth due to the thickness effect", *International Journal of Fatigue*, Vol. 22, 2000, pp. 611-618.
- [7] Norman E. Dowling, "Mechanical Behavior of Materials", *Engineering Methods for Deformation, fracture, and fatigue*, Prentice Hall, 1999.
- [8] R. Kieselbach, "Curious cases of failure", *Engineering Failure Analysis*, Vol. 11, 2004, pp. 501-513.
- [9] Tim J Carter, " Common failures in gas turbine blades", *Engineering Failure Analysis*, Vol. 12, 2005, pp. 237-247.
- [10] Volker Esslinger, Rolf Kieselbach, Roland Koller, Bernhard Weisse, " The railway accident of Eschede – technical background", *Engineering Failure Analysis*, Vol. 11, 2004, pp. 515-535.
- [11] R . Ghf I Ri , A. Amrouche, A. Imad And G. Mesmacque, "Fatigue life estimation after crack repair in 6005 A-T6 aluminium alloy using the cold expansion hole technique ", *Fatigue Fract Engng Mater Struct*, vol. 23, 2000, pp. 911–916.
- [12] Bao, H. and McEvily, A. J. "The Effect of Overload on the Rate of Crack Propagation under Plane Stress Conditions." *Metallurgical and Materials*, Vol. 26A, 1995, pp.1725-1733.
- [13] Barsom, J.M., Rofle, S.T., "Fracture and Fatigue Control in Structure." *Appliaction of Fracture Mechanics*, ASTM,MNL41, 1999.
- [14] Makabe, C., McEvily, A. J., Purnowidodo, A. and Yamauchi, "A. Effects of Negative Stress Ratios on Crack Propagation Behavior after an Overload." *Int. J. Modern Physics. B*, Vol.17, 2003, PP.1580-1586.
- [15] Makabe, C., Purnowidodo, A. and McEvily, A. J. Effects of Surface Deformation and Crack Closure on Fatigue Crack Propagation after Overloading and Underloading, " *Int. J. Fatigue*, Vol.26, 2004, pp.1341-1348
- [16] Anindito Purnowidodo, Chobin Makabe, The Crack Growth Behavior After Overloading on Rotating Bending Fatigue, Engineering Failure Analysis, European Structural Integrity Society, Vol. 16, issue 7, October 2009, pp. 2245-2254.
- [17] Anindito Purnowidodo, Budi Prawara, The Relation Of Crack Length And Overloads To Crack Growth On Solid

- Round Bar, International Journal of Materials Engineering and Technology, Vol. 5, No. 1, pp. 29-40, 2011.
- [18] Zeljko Domazet, Comparison Of Fatigue Crack Retardation, "Engineering Failure Analysis", Vol.3, No. 2, pp.137-147, 1996.
- [19] Stephens, R.I., Fatemi, A., Stephens, R.R., Fuchs, H.O., "Metal Fatigue in Engineering",2001.