

## Distribusi dan Interaksi Tegangan Sisa antar Lubang Setelah Proses *Cold Expansion Hole*

Ari W.<sup>1)</sup>, Anindito P.<sup>1)</sup>, Andika H P.<sup>2)</sup>

Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang<sup>1)</sup>

Mahasiswa Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya<sup>2)</sup>

Jl. MT. Haryono 167 Malang 65145, Indonesia

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

### Abstract

*It is well known that the main cause of a failure of structure is initiated by cracks on a member. A crack may originate easily in a region with high stress concentration. Because in the rivet and the bolt joining method are usual with number of holes, and to reduce the stress concentration, the compressive residual stress is introduced in the region near by the hole. The cold expansion hole technique is used to developed compressive residual on the vicinity of the edge hole. The present study was carried out by the computer simulation based on finite element method to investigate the distribution and interaction residual stress in the region between holes related to the cold expansion hole. The result of the study suggests that the distance between holes influence the state of residual stress and its magnitude. These cause by the deformed material between holes interact each other.*

**Keywords:** residual stress distribution, stress interaction, region between holes

### PENDAHULUAN

#### Latar Belakang

Proses penyambungan untuk membangun suatu struktur adalah salah satu proses yang sulit dihindari [1]. Salah proses atau teknik penyambungan yang sering digunakan adalah penyambungan dengan menggunakan mur dan baut atau dengan menggunakan paku keling. Teknik penyambungan ini dapat dilakukan dengan cara membuat suatu lubang atau beberapa lubang pada komponen yang akan disambung. Umumnya teknik penyambungan ini digunakan untuk menyambung suatu jenis *profile* atau lembaran (plat) dari suatu logam [1].

Salah satu kelemahan teknik penyambungan dengan menggunakan metode mur-baut atau pun keling adalah lubang yang harus dibuat pada suatu komponen atau bagian yang disambung. Hal ini, dapat menyebabkan timbulnya konsentrasi tegangan, yang mana besar tegangan pada tepi lubang adalah 3 kali dari tegangan kerja [1-4]. Sehingga kekuatan material yang harus digunakan setidaknya-tidaknya mempunyai kekuatan 3 kali lebih kuat dari tegangan kerja.

Untuk mengurangi besar tegangan pada daerah sekitar tepi lubang yang disebabkan oleh konsentrasi tegangan, maka daerah tersebut diberi tegangan sisa tekan. Ada beberapa teknik digunakan untuk menimbulkan tegangan sisa tekan pada daerah sekitar tepi lubang. Teknik-teknik tersebut pada dasarnya adalah dengan cara memberikan deformasi plastis baik secara dingin maupun panas sehingga menyebabkan tegangan sisa tekan terdistribusi pada daerah sekitar tepi lubang [6, 7]. Dengan menggunakan teknik ekspansi dingin (*cold expansion hold*) pada lubang, tegangan sisa tekan terbentuk mulai dari tepi lubang sampai beberapa milimeter dari tepi lubang, dan selanjutnya tegangan sisa tekan secara gradual berubah menjadi tegangan sisa tarik dan selanjutnya setelah beberapa milimeter pengaruh proses ekspansi terhadap tegangan sisa tidak mempunyai pengaruh [6-8].

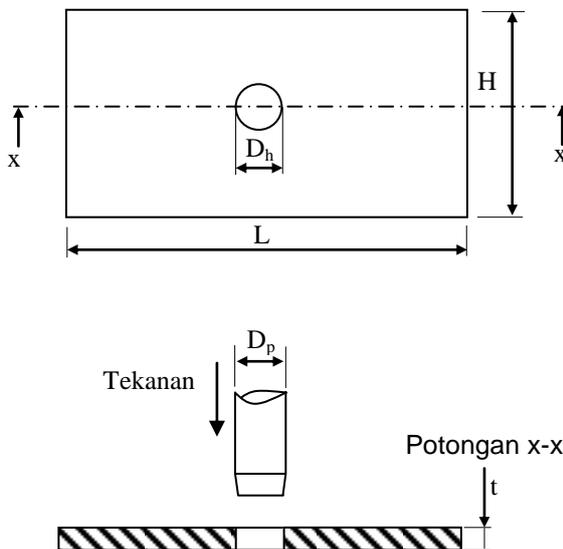
Teknik penyambungan mur-baut atau paku keling, pada umumnya dilakukan dengan menggunakan lebih dari satu mur-baut atau keling, maka sebagai konsekuensi, jumlah lubangnya disesuaikan dengan jumlah mur-baut atau keling. Kondisi ini menyebabkan timbulnya daerah konsentrasi

tegangan pada beberapa tempat. Selain di daerah tepi lubang, tegangan pada daerah antar lubang pun dapat mempunyai tegangan yang lebih tinggi dari tegangan kerja, jika jarak antar lubang terlalu dekat. Semakin banyaknya konsentrasi tegangan, maka semakin meningkatkan kemungkinan terjadinya inisiasi retak, dan jika retak merambat pada daerah antar lubang yang mempunyai tegangan yang lebih besar dari tegangan kerja dapat meningkatkan laju perambatan retak. Hal ini dapat memperpendek umur suatu komponen dan membahayakan keamanan dari struktur [1-10].

Dengan adanya beberapa lubang pada suatu komponen, dan jika teknik *cold expansion hold* digunakan untuk menimbulkan tegangan sisa tekan, maka proses tersebut harus dilakukan pada masing-masing lubang. Selain dapat menimbulkan tegangan sisa tekan, proses ini juga dapat menimbulkan tegangan sisa tarik pada jarak tertentu dari tepi lubang. Jika dalam kasus penyambungan dengan menggunakan banyak lubang, maka daerah antar lubang akan terdapat interaksi tegangan sisa yang disebabkan oleh proses ekspansi pada tiap-tiap lubang. Oleh karena itu dalam investigasi ini akan diteliti bagaimana hubungan jarak antar lubang dan besar deformasi ekspansi pada masing-masing lubang terhadap kondisi dan interaksi tegangan sisa pada daerah antar lubang.

**METODE PENELITIAN**

Pada studi ini difokuskan pada distribusi tegangan sisa yang terjadi pada daerah sekitar lubang. Metode yang digunakan adalah simulasi numerik dengan menggunakan bantuan *software* berbasis metode elemen hingga. Dalam simulasi ini model material yang digunakan adalah identik dengan Aluminium komersial seri 1000, yang mempunyai spesifikasi sebagai berikut : *Density* ( $\rho$ ) 2,705 g/cm<sup>2</sup>, *Poisson's Ratio* ( $\nu$ ) 0,33, *Elastic Modulus* ( $E$ ) 71 Gpa., *Tensile Strength* ( $\sigma$ ) 320 MPa., *Yield Strength* ( $\sigma_y$ ) 280 MPa., *Elongation* ( $e$ ) 10 %, *Hardness* 30 HB.



Gambar 1. Proses *cold expansion hold*

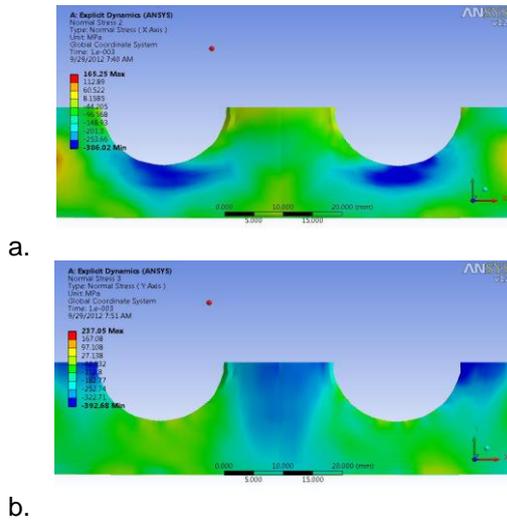
Gambar 1 berikut ini menunjukkan secara skematik bagaimana proses *cold expansion hole* dilakukan. Gambar tersebut menunjukkan suatu lubang sambungan dengan diameter  $D_h$  pada suatu plat dengan ketebalan  $t$ , diekspansi dengan cara memberi tekanan pada lubang tersebut dengan pasak berdiameter  $D_p$ . Karena  $D_p > D_h$ , maka pada saat  $D_p = D_h$  keliling lubang akan terdeformasi, sehingga akan terbentuk tegangan sisa disekitar lubang. Dalam studi ini akan diteliti distribusi tegangan sisa pada ketebalan plat  $t = 2$  dan dengan  $D_p = 20.2$  mm dan  $D_h = 20$  mm pada jarak antar tepi lubang  $r$  masing-masing, 20, 40 dan 60 mm.

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

**Hasil**

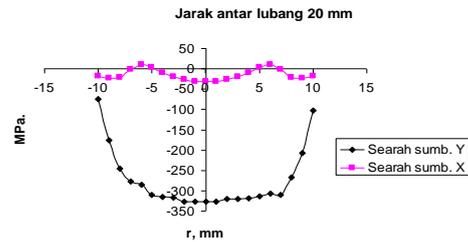
Gambar 2 menunjukkan contoh hasil simulasi pada plat setelah diekspansi dengan jarak antar tepi lubang  $r = 20$  mm. Karena simetri maka pada gambar tersebut ditunjukkan kontur distribusi tegangan sisa pada setengah bagian saja (semi model). Pada Gbr. 2a adalah distribusi tegangan normal searah dengan sumbu  $x$  dan pada Gbr. 2b adalah distribusi tegangan pada arah sumbu  $y$ . Warna biru menunjukkan bahwa daerah tersebut mempunyai tegangan sisa tekan (*compressive*) dan kontur yang cenderung

tergradasi ke arah merah berubah menjadi tegangan sisa tarik. Dari gambar ini dapat diperoleh petunjuk bahwa tegangan sisa tekan ke arah sumbu  $y$  mendominasi pada daerah antar tepi lubang, sehingga jika diberi beban ke arah sumbu  $y$ , maka dapat mengurangi konsentrasi tegangan yang terjadi pada daerah di depan tepi lubang. Hal ini dapat menurunkan peluang terjadinya retak di sekitar tepi lubang, misalnya, dalam kasus ini adalah retak yang timbul atau merambat searah sumbu  $x$ .



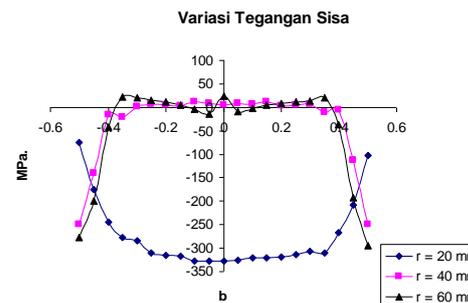
Gambar 2. Kontur distribusi tegangan normal searah sumbu  $x$  dan  $y$

Untuk mengetahui lebih detail besar tegangan sisa di daerah antar lubang, maka Gbr. 3 menunjukkan contoh variasi distribusi tegangan sisa pada daerah antar lubang untuk tegangan sisa paralel terhadap sumbu  $x$  dan  $y$  dengan jarak antar lubang 20 mm, yang mana  $r = 0$  adalah kondisi tegangan sisa tepat diantara lubang dan  $r = -10$  atau 10 mm adalah masing-masing posisi di tepi lubang.



Gambar 3. Distribusi tegangan sisa, jarak antar lubang 20 mm

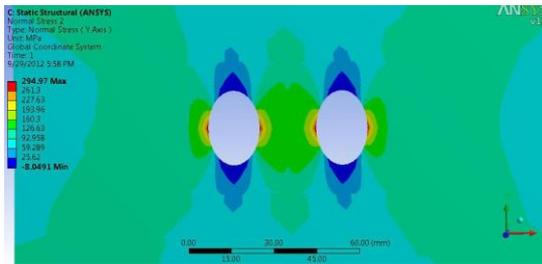
Dalam penelitian ini simulasi di fokuskan pada pembebanan tegangan aksial ke arah sumbu  $y$ , maka Gbr. 4 hanya menunjukkan grafik variasi dan kondisi tegangan sisa pada daerah antar lubang searah sumbu  $y$  untuk kondisi  $r$  yang berbeda yaitu 20, 40 dan 60 mm. Karena jarak antar lubangnya berbeda maka agar supaya dapat dibandingkan, maka dalam grafik tersebut  $r$  diganti dengan  $b$ , yaitu perbandingan jarak dari titik diantara lubang atau pada saat  $r = 0$  dengan jarak antar lubang. Dari gambar ini dapat terlihat bahwa kondisi tegangan sisa disekitar ujung lubang adalah tekan, walaupun besarnya berbeda pada masing-masing jarak antar lubang,  $r$ . Pada daerah antar lubang terlihat jelas bahwa besar tegangan sisa tekan pada  $r = 20$ , jauh lebih besar dibandingkan dengan yang terjadi pada jarak antar lubang dengan  $r = 40$  dan 60 mm. Sebaliknya kondisi tegangan sisa di ujung lubang pada  $r = 20$  mm lebih kecil dibandingkan dengan kedua harga  $r$  lainnya.



Gambar 4. Distribusi tegangan sisa diantara lubang pada berbagai harga  $r$ .

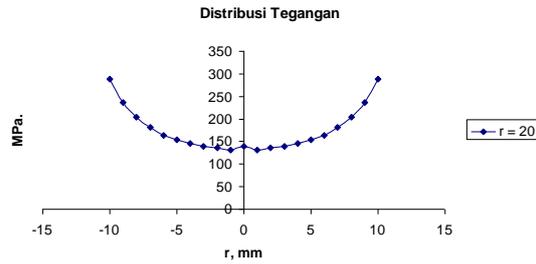
Gambar 5 menunjukkan kontur distribusi tegangan pada daerah antar lubang pada saat diberi beban aksial, searah sumbu  $y$ , sebesar 90 MPa. Seperti pada umumnya bahwa tegangan akan terkonsentrasi di depan

tepi lubang sebesar tiga kali dari beban. Hal ini juga terlihat pada gambar ini, yang mana warna merah pada daerah sekitar ujung lubang mengindikasikan bahwa pada daerah tersebut terjadi konsentrasi tegangan. Sedangkan pada bagian lubang sisi tepi atas dan bawah didominasi warna biru, hal ini mengindikasikan bahwa pada area tersebut mempunyai kondisi tegangan tekan. Oleh karena arah pembebanan paralel terhadap sumbu  $y$ , maka investigasi di fokuskan pada tegangan yang paralel terhadap sumbu  $y$ .



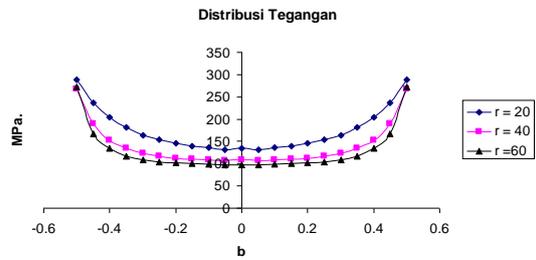
Gambar 5. Contoh kontur distribusi tegangan sekitar daerah lubang pada pembebanan ke arah sumbu  $y$

Gambar 6 menunjukkan harga distribusi tegangan yang terjadi pada daerah antar lubang ketika plat diberi beban sebesar 90 MPa. dengan jarak antar ujung lubang  $r = 20$  mm. Ketika  $r = 10$  atau  $-10$ , karena tepat di tepi lubang maka mempunyai nilai tegangan yang lebih dari tiga kali beban aksial, yaitu sekitar 295 MPa., dan karena nilai ini melebihi besar dari tegangan yeild material, maka pada daerah disekitar ujung lubang akan mengalami defoemasi plastis, seperti ditunjukkan dengan kontur warna merah pada Gbr. 5. Semakin menjauh dari ujung lubang, konsentrasi tegangan cenderung menurun, dan tepat di antara lubang atau  $r = 0$  nilai tegangan menjadi minimum, sekitar 140 MPa.. Tetapi nilai ini masih lebih besar dari besar tegangan aksial, yaitu sebesar 90 MPa., hal ini disebabkan oleh jarak antar lubang,  $r$  yang dekat.



Gambar 6. Contoh harga distribusi tegangan pada daerah antar lubang pada  $r = 20$  mm

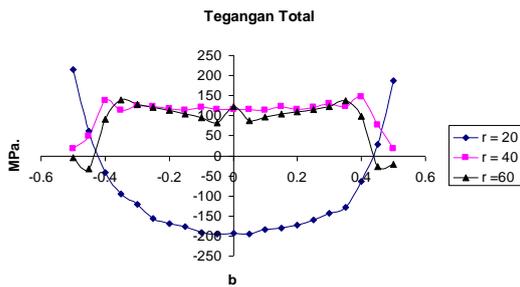
Untuk mengetahui pengaruh perbedaan jarak antar lubang  $r$  terhadap distribusi tegangan pada daerah antar lubang, maka Gbr. 7 menunjukkan bahwa semakin dekat jarak antar lubang maka tegangan yang terjadi pada daerah antar lubang adalah cenderung lebih tinggi dibanding beban aksial, hal ini terlihat pada  $r = 20$  mm. Sedangkan pada masing-masing tepi lubang mempunyai kecenderungan sama yaitu sekitar tiga kali dari beban aksialnya. Dari sini dapat disimpulkan bahwa semakin dekat jarak antar lubang dapat membahayakan karena tegangan pada daerah antar lubang juga lebih tinggi daripada tegangan kerjanya, dalam penelitian ini adalah beban yang disebabkan oleh tegangan aksial, 90 MPa. searah sumbu  $y$ .



Gambar 7. Distribusi tegangan pada daerah antar lubang pada berbagai variasi  $r$ .

Selain untuk mengetahui interaksi tegangan sisa pada daerah antar lubang, tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui bagaimana pengaruh distribusi tegangan sisa pada daerah antar lubang pada berbagai variasi jarak antar lubang  $r$ , maka dengan mensuperposisi tegangan sisa pada daerah antar lubang, Gbr. 4 dan kondisi tegangan pada saat diberi beban, Gbr. 7, pada berbagai jarak antar lubang  $r$ , kondisi

tegangan pada saat dibebani, dalam hal ini disebut tegangan total, dapat diketahui seperti ditunjukkan pada Gbr. 8. Dari sini dapat diketahui bahwa pembentukan tegangan sisa melalui proses ekspansi lubang sangat efektif menurunkan konsentrasi tegangan. Pada  $r = 20$  mm, meskipun konsentrasi tegangan masih tetap tinggi pada daerah ujung lubang, akan tetapi nilainya jauh dibawah tegangan yeild bahan, bahkan meskipun diberi beban tarik pada daerah antar lubang masih mempunyai tegangan dalam kondisi tekan. Hal ini merupakan suatu keuntungan, karena dapat mencegah terjadinya inisiasi retak. Untuk  $r = 40$  dan  $60$  mm, besar tegangan yang terjadi pada daerah antar lubang adalah sebanding dengan beban yang diberikan pada plat, yaitu  $90$  MPa., dan tegangan sisa tekan yang disebabkan proses ekspansi lubang, ternyata dapat mengeliminasi konsentrasi tegangan pada ujung lubang, sehingga besar tegangan pada daerah tersebut mendekati  $0$  MPa..



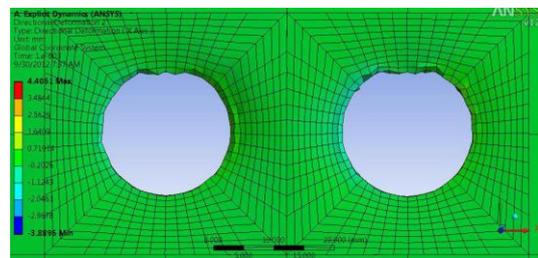
Gambar 8. Tegangan Total

Dari hasil studi ini dapat diketahui pengaruh interaksi tegangan sisa hasil proses ekspansi lubang dan tegangan pada lubang dipengaruhi oleh jarak antar lubang  $r$ . Dapat disimpulkan bahwa semakin kecil harga  $r$ , maka tegangan sisa tekan yang terbentuk lebih besar pada daerah antar lubang dibanding dengan pada tepi lubang. Sebaliknya pada  $r$  yang lebih besar tegangan sisa tekan yang terjadi pada ujung lubang mempunyai harga yang lebih besar. Tentunya ini merupakan suatu petunjuk bahwa untuk mereduksi inisiasi retak yang biasanya terjadi pada daerah dengan konsentrasi tegangan tinggi dalam hal ini tepi lubang, akan lebih efektif jika harga  $r$  lebih besar. Untuk mengetahui mekanisme terbentuknya

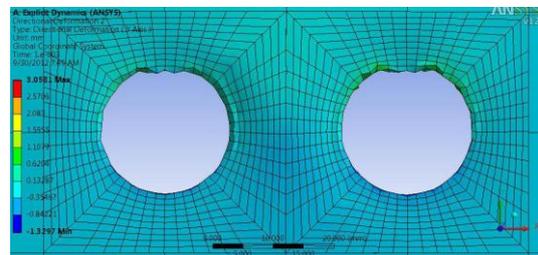
tegangan sisa, maka sesi berikut akan membahas lebih detail.

**Pembahasan**

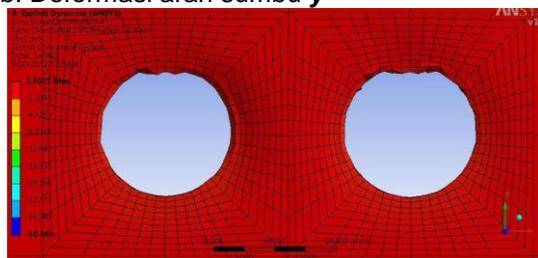
Untuk mengetahui penyebab distribusi tegangan sisa tekan kearah sumbu  $y$  yang lebih besar pada daerah antar lubang dibandingkan dengan pada ujung lubang, untuk kasus  $r = 20$  mm, maka distribusi deformasi pada daerah-daerah tersebut perlu diinvestigasi. Gbr. 9 menunjukkan contoh kontur distribusi deformasi searah sumbu  $x$ ,  $y$  dan  $z$  pada kasus dengan jarak antar ujung lubang  $20$  mm. Selanjutnya untuk mengetahui lebih detail harga deformasi pada daerah antar lubang, maka Gbr. 10 menunjukkan distribusi deformasi pada daerah tersebut.



a. Deformasi arah sumbu  $x$

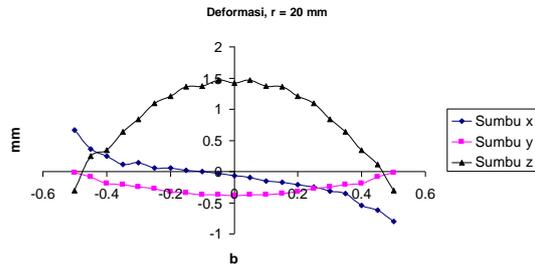


b. Deformasi arah sumbu  $y$



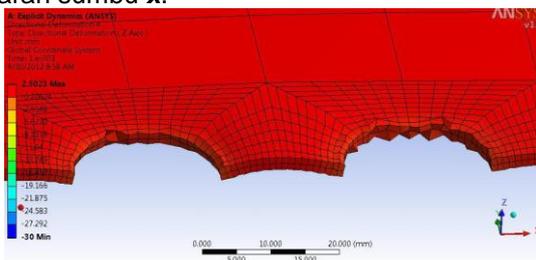
c. deformasi arah  $z$

Gambar 9. Contoh kontur deformasi, mm



Gambar 10. Harga distribusi deformasi pada daerah antar lubang,  $r = 20$  mm

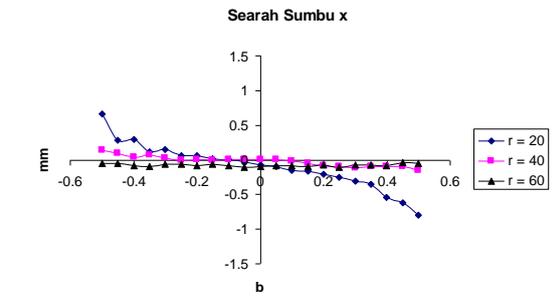
Gambar 10 menunjukkan deformasi yang terjadi pada berbagai arah sumbu, pada daerah antar lubang. Untuk arah sumbu  $x$ , terlihat bahwa deformasi yang terjadi berlawanan arah, yang mana satu sisi tepi lubang berharga negatif dan sisi lain berharga positif, sehingga menyebabkan timbulnya tegangan sisa tekan ke arah  $x$ . Untuk arah sumbu  $y$ , deformasi yang terjadi berharga negatif. Hal ini tidak mempengaruhi harga dari tegangan sisa yang timbul, karena pada arah sumbu  $y$  tidak berinteraksi dengan lubang, tetapi berinteraksi dengan area lain yang tidak terdeformasi. Kondisi inilah yang menyebabkan timbulnya tegangan sisa ke arah  $y$ . Pada arah sumbu  $z$  terjadi deformasi, hal ini mengindikasikan bahwa terjadi perubahan bentuk pada daerah antar lubang yang menyebabkan turunya harga tegangan sisa ke arah sumbu  $x$ . Gbr. 11 adalah semi model untuk kasus  $r = 20$ , menunjukkan perubahan bentuk berupa lengkungan diantara lubang yang disebabkan tekanan dari arah sumbu  $x$ .



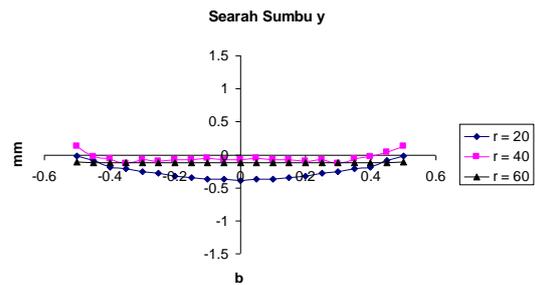
Gambar 11. Perubahan bentuk pada daerah sekitar lubang,  $r = 20$  mm

Gambar 12 menunjukkan perbandingan besar deformasi pada masing-masing sumbu untuk masing-masing jarak antar lubang,  $r$ . Dari gambar tersebut terlihat bahwa baik ke arah sumbu  $x$ ,  $y$  dan  $z$

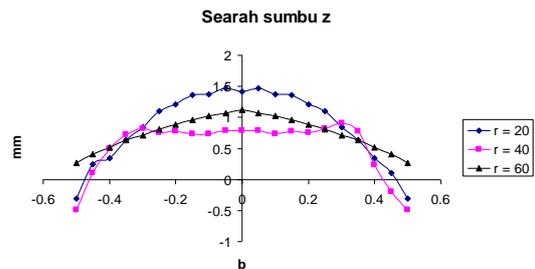
deformasi pada  $r = 20$  mempunyai kecenderungan lebih besar dibanding dengan kedua harga  $r$  lainnya. Hal ini merupakan indikasi bahwa semakin dekat jarak antar ujung lubang dapat meningkatkan kondisi tegangan sisa pada daerah antar lubang



a. Arah sumbu  $x$



b. Searah sumbu  $y$

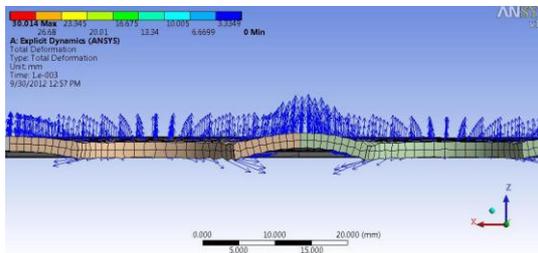


c. Searah sumbu  $z$

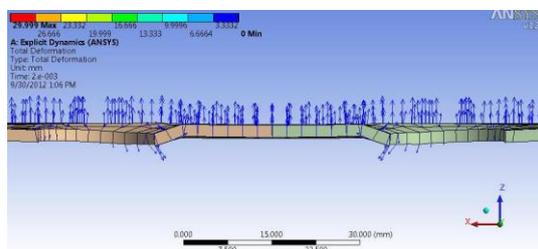
Gambar 12. Deformasi kearah masing-masing sumbu dan pada masing-masing jarak antar lubang,  $r$ .

Gambar 13. menunjukkan vektor deformasi total, pada masing-masing  $r$ . Terlihat bahwa deformasi total untuk  $r = 20$ , lebih terfokus tepat diantara lubang, hal ini mengindikasikan bahwa terjadi perubahan

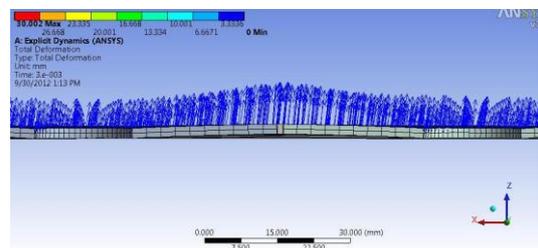
bentuk yang lebih besar, dalam hal ini, bengkokan yang paralel terhadap sumbu  $x$ .



a. Vektor deformasi total,  $r = 20$  mm



b. Vektor deformasi total,  $r = 40$  mm



c. Vektor deformasi total,  $r = 60$  mm

Gambar 13. Deformasi total pada  $r = 20, 40$  dan  $60$  mm

Dari hasil Studi ini diketahui bahwa jarak antar lubang mempengaruhi besar tegangan sisa yang terbentuk setelah proses ekspansi lubang. Harga tegangan sisa tekan pada  $r = 20$ , lebih besar dibandingkan dengan yang terjadi pada  $r = 40$  dan  $60$ . Hal ini disebabkan interaksi regangan atau deformasi terjadi lebih besar pada konfigurasi lubang dengan jarak antar ujung lubang sebesar  $20$  mm, seperti ditunjukkan pada Gbr. 12 dan 13.

## KESIMPULAN

Dari penelitian ini dapat disimpulkan bahwa;

1. Tegangan sisa tekan yang dihasilkan melalui proses ekspansi lubang, lebih besar terjadi pada daerah antar lubang yang mempunyai jarak  $20$  mm antar ujung lubang.
2. Penyebab utama dari besarnya tegangan sisa tekan yang terjadi pada  $r = 20$  adalah interaksi deformasi antar lubang lebih besar. Besarnya interaksi inilah yang menyebabkan terjadinya lengkungan diantara lubang lebih besar dibandingkan jika ujung lubang mempunyai jarak yang lebih besar.
3. Tegangan sisa tekan yang dihasilkan dari proses ekspansi lubang dapat secara efektif menghilangkan konsentrasi tegangan di ujung lubang, bahkan jika jarak antar ujung lubang semakin dekat,  $r = 20$ , bisa terjadi juga pada daerah diantara lubang.

## 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]. Barsom, J.M., Rolfe, S.T., "Fracture and Fatigue Control in Structure." *Appliaction of Fracture Mechanics, ASTM, MNL41*, 1999
- [4]. A.J. McEvily, " Failures in inspection procedures: case studies", *Engineering Failure Analysis*, Vol. 11, 2004, pp. 167-176.
- [5]. Stephens, R.I., Fatemi, A., Stephens, R.R., Fuchs, H.O., "Metal Fatigue in Engineering", 2001.
- [6]. 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.

- [7]. P.F.P. de Matos, A.J. McEvily, P.M.G.P. Moreira, P.M.S.T. de Castro, "Analysis of the effect of cold-working of rivet holes on the fatigue life of an aluminum alloy", *International Journal of Fatigue*, Vol. 29, 2007, pp. 575-586.
- [8]. Zeljko Domazet, Comparison Of Fatigue Crack Retardation, "Engineering Failure Analysis", Vol.3, No. 2, pp.137-147, 1996
- [9]. Charlie R. Brooks, Ashok Choudhury, "Failure Analysis of Engineering Materials", *Profesional Engineering*, Mc.Graw Hill, 2002.
- [10]. F.S. Silva, " Analysis of a vehicle crankshaft failure", *Engineering Failure Analysis*, Vol. 10, 2003, pp. 605-616.
- [11]. Norman E. Dowling, " Mechanical Behavior of Materials", *Engineering Methods for Defromation, fracture, and fatigue*, Prentice Hall, 1999
- [12]. 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.
- [13]. 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
- [14]. 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.
- [15]. 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.
- [16]. 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.