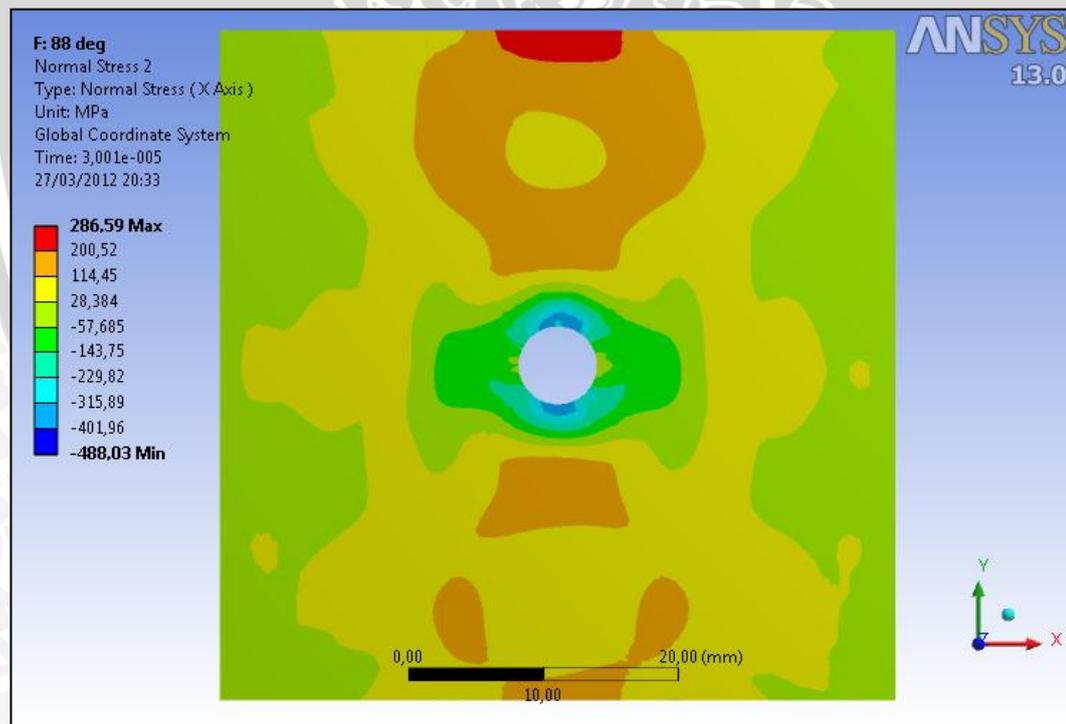


## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Hasil Simulasi *Cold Expansion Hole*

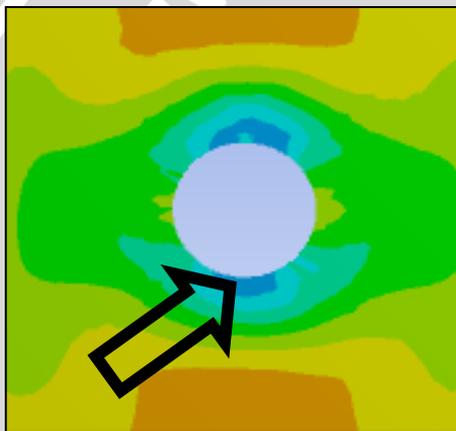
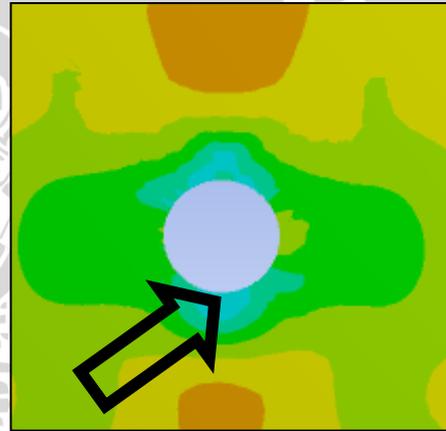
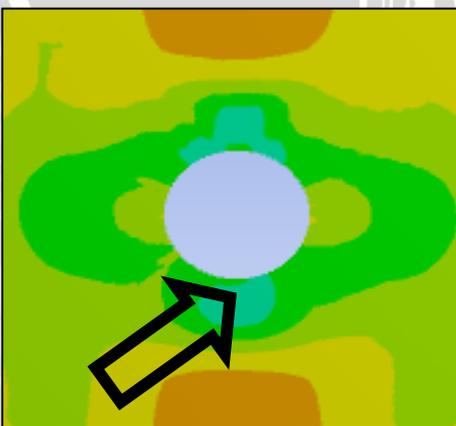
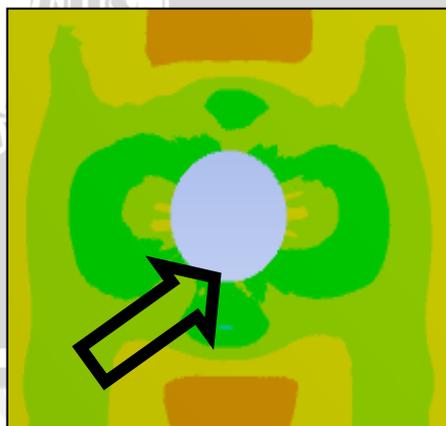
Dari simulasi *cold expansion hole* yang telah dilakukan didapatkan hasil distribusi tegangan sisa yang beragam yang terjadi pada plat mulai daerah sekitar hole sampai daerah tepi terluar plat. Hal ini dapat dilihat pada *contour* distribusi *normal stress* yang berbeda di masing-masing variasi sudut *chamfer* yang diberikan mulai dari sudut *chamfer*  $88^{\circ}$ ,  $87^{\circ}$ ,  $86^{\circ}$ ,  $85^{\circ}$ , dan  $84^{\circ}$  yang diperlihatkan pada gambar 4.1. Dari *contour* inilah dapat dilihat bahwa sudut *chamfer* juga berpengaruh terhadap besarnya tegangan sisa yang besarnya tergantung pada masing-masing variasi sudut yang diberikan setelah proses *cold expansion hole* berlangsung. Berikut adalah perbedaan *contour* warna yang terjadi :

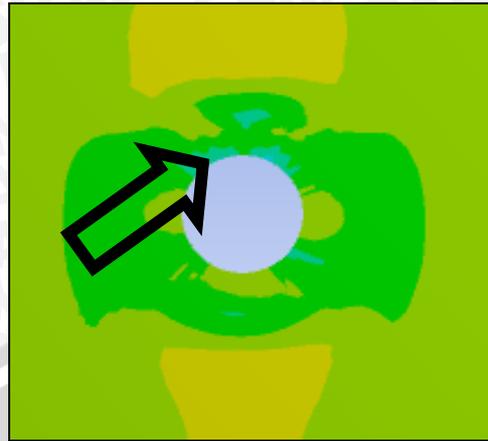


Gambar 4.1 *Contour* distribusi *normal stress* (*x axis*) yang terjadi pada plat setelah dikenai proses *cold expansion hole*.

Jika diamati pada *contour* tegangan pada plat yang telah dikenai proses *cold expansion hole*, maka dapat dilihat terdapat warna biru disekitar lubang yang menandakan bahwa di sekitar hole telah terjadi tegangan sisa tekan (*compressive residual stress*). Dengan semakin menjauh dari *hole*, warna biru tersebut secara granual berangsur-angsur akan berubah warnanya menjadi merah yang menandakan bahwa semakin menjauhi *hole*, tegangan sisa tekan (*compressive residual stress*) akan bertransisi menjadi tegangan sisa tarik (*tensile residual stress*) yang dibuktikan dengan warna merah.

Berikut adalah perbedaan *contour* warna yang terjadi di sekitar *hole* setelah dikenai proses *cold expansion hole* dengan variasi sudut *chamfer* mandrel yang berbeda:

(a)  $88^{\circ}$ (b)  $87^{\circ}$ (c)  $86^{\circ}$ (d)  $85^{\circ}$



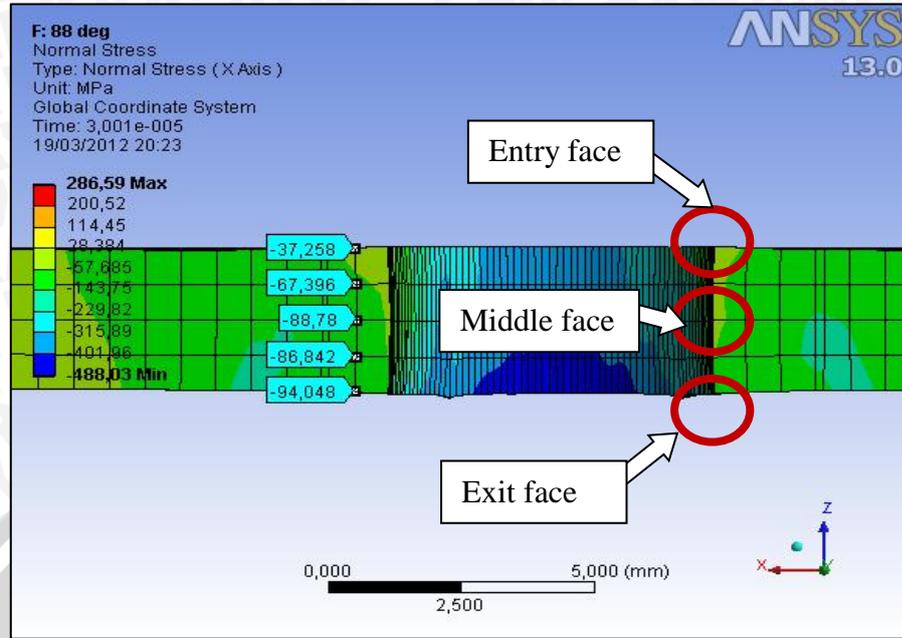
(e) 84°

Gambar 4.2 *Contour* yang terjadi pada plat setelah dikenai proses *cold expansion hole*.

Dari gambar 4.2 secara visual dapat kita lihat bahwa tegangan sisa tekan yang terjadi di sekitar *hole* pada plat yang ditandai dengan warna biru (tanda panah) pada masing-masing variasi sudut *chamfer* mengalami perbedaan. Semakin besar sudut *chamfer* maka warna biru di sekitar *hole* warnanya akan semakin tua (tegangan sisa tekan besar) dan daerahnya lebih luas. Hal ini dapat terlihat pada gambar 4.2 (a). Semakin kecil sudut *chamfer* pada mandrel warna biru disekitar *hole* akan semakin memudar bahkan tidak ada sama sekali. Hal ini menggambarkan bahwa tegangan sisa tekannya akan semakin kecil yang ditunjukkan pada gambar 4.2 (d) dan (e).

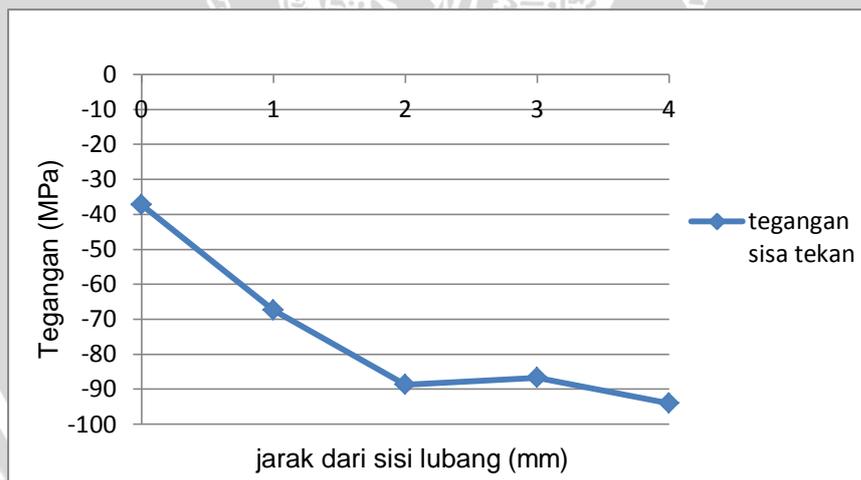
#### 4.1.1 Perbedaan distribusi tegangan sisa tekan pada daerah *entry face*, *middle face* dan *exit face*

Jika diambil sebuah *sample* variasi mandrel yaitu pada variasi sudut 88° dapat ditunjukkan pada gambar bahwa distribusi tegangan sisa pada daerah *entry face*, *middle face* dan *exit face* berbeda. Hal ini dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 4.3 Plot distribusi tegangan sisa tekan setelah dipotong secara melintang pada variasi sudut *chamfer* mandrel  $88^{\circ}$

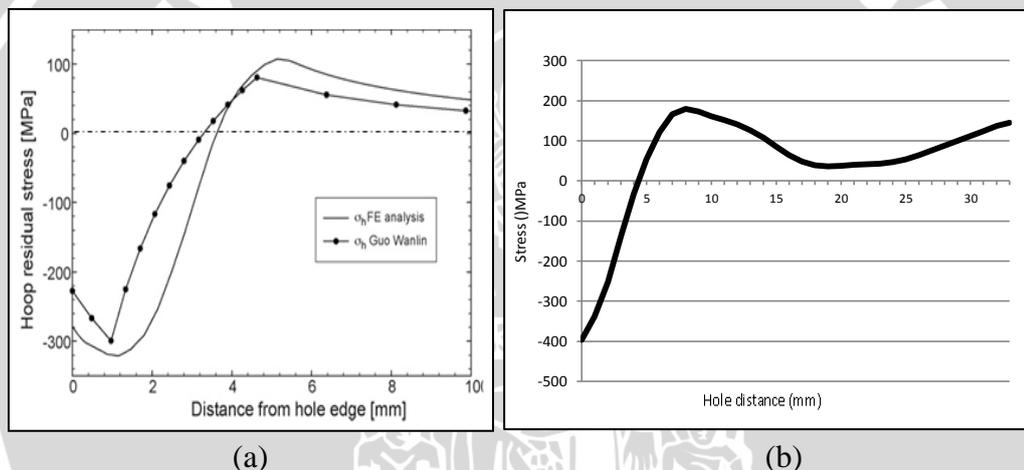
Jika plot-plot tersebut di gambarkan dalam sebuah grafik maka dihasilkan trend grafik sbb:



Gambar 4.4 Grafik distribusi tegangan sisa tekan pada arah ketebalan plat

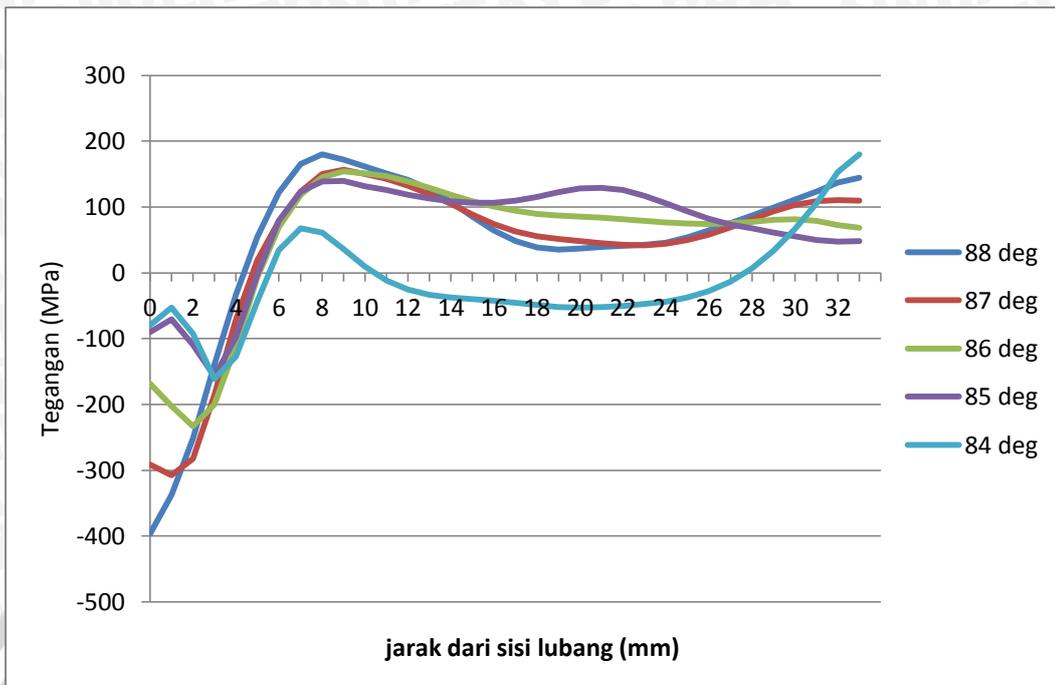
Dari grafik 4.4 dapat dilihat bahwa tegangan sisa tekan yang terjadi pada plat setelah di ekspansi, tegangan sisa tekannya mulai dari daerah *entry face* sampai *exit face* akan mengalami kenaikan. Hal ini terlihat dari trend grafik yang semakin menurun seiring dengan bertambahnya jarak ketebalan dari *entry face*.

Untuk memvalidasi hasil simulasi ini maka dilakukan perbandingan hasil grafik tegangan sisa yang terjadi pada simulasi ini dengan hasil distribusi tegangan sisa hasil perhitungan Nigrelli dan Pasta (2007). Pada jurnal tersebut dituliskan bahwa distribusi tegangan sisa dari *cold expansion hole ball models* dihitung dengan cara eksak oleh Guo (2007). Sedangkan untuk *cold expansion holes* secara *finite elemen* dihitung oleh Nigrelli dan Pasta. Namun pada jurnal tersebut belum dihitung bagaimanakah distribusi tegangan sisa dengan diameter ekspansi ( $D_e$ ) yang berbeda-beda. Jika hasil simulasi ini memiliki distribusi tegangan sisa dengan bentuk grafik yang mirip maka hasil simulasi ini dengan hasil distribusi dapat diterima, berikut perbandingan grafiknya:

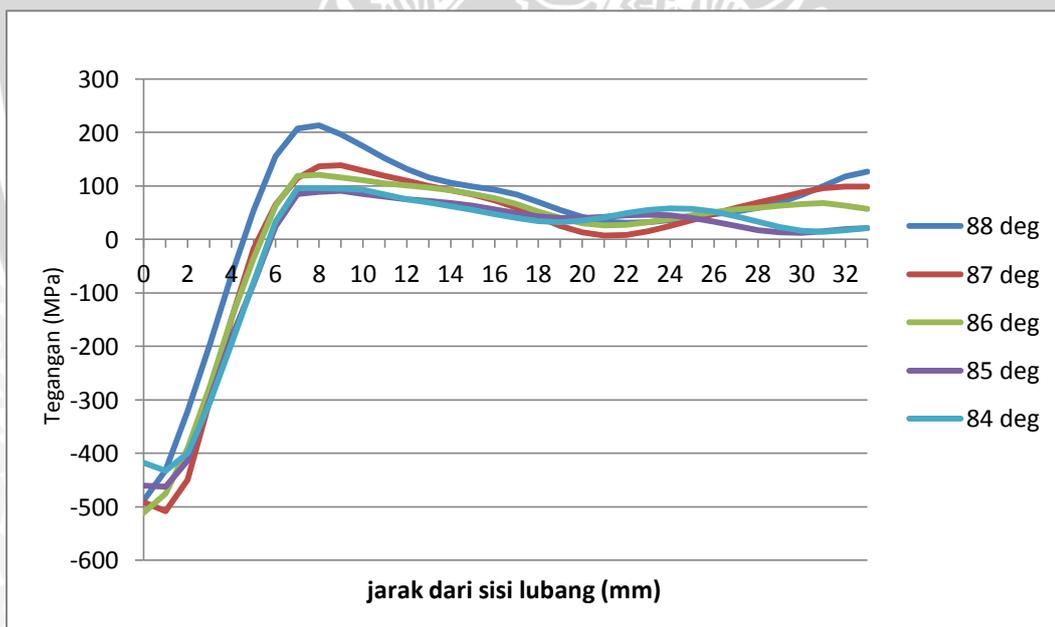


Gambar 4.5 Grafik perbandingan distribusi tegangan sisa  
 (a) pada journal V. Nigrelli dan Pasta.S  
 (b) adalah distribusi tegangan sisa hasil penelitian

Untuk lebih mudah menganalisa distribusi tegangan sisa tersebut, maka semua variasi sudut *chamfer* mandrel diplot dalam grafik besar tegangan terhadap jarak dari lubang sambungan, maka akan didapatkan hasil berikut :



Gambar 4.6 Grafik distribusi tegangan sisa tekan pada berbagai variasi sudut *chamfer* pada daerah *entry face*



Gambar 4.7 Grafik distribusi tegangan sisa tekan pada berbagai variasi sudut *chamfer* pada daerah *exit face*

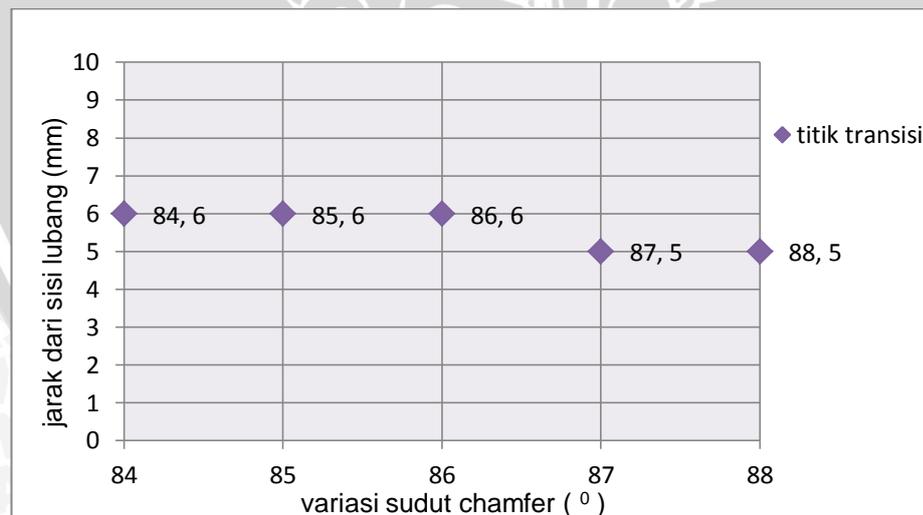
Dari grafik pada Gambar 4.6 dapat dilihat bahwa pada proses *cold expansion hole* dengan variasi sudut yang berbeda pada daerah *entry face* menghasilkan tegangan sisa tekan di sekitar *hole* yang ditunjukkan dengan

tegangan yang bernilai negatif dan kemudian bertransisi menjadi tegangan sisa tarik yang bernilai positif. Sama halnya dengan hasil yang terjadi pada *entry face*, pada *exit face* (gambar 4.7) juga terjadi tegangan sisa tekan yang bertransisi menjadi tegangan sisa tarik.

Namun yang membedakan di sini adalah pada daerah *entry face* ( gambar 4.6), semakin besar sudut *chamfer* mandrel semakin tinggi pula tegangan sisa tekan yang terjadi di sekitar *hole*. Hal ini berbeda dengan tegangan yang terjadi pada daerah *exit face*. Pada gambar 4.7 dapat dilihat bahwa tegangan sisa tekan yang terjadi di sekitar *hole* memiliki tegangan sisa tekan yang relatif sama pada berbagai variasi sudut *chamfer* mandrel. Perbedaan ini terjadi karena kontak antara mandrel dengan plat terjadi pertama kali pada daerah tepi *hole* pada *entry face* sehingga masih dipengaruhi oleh besar kecilnya sudut *chamfer*.

#### 4.1.2 Daerah transisi tegangan sisa tekan menjadi tegangan sisa tarik

Pada simulasi ini dapat dilihat titik di mana mulai terjadinya transisi tegangan dari tegangan sisa tekan menjadi tegangan sisa tarik yang terjadi pada plat setelah proses *cold expansion holes*, untuk lebih detail mengenai titik transisi tersebut dapat dilihat pada gambar grafik berikut ini:



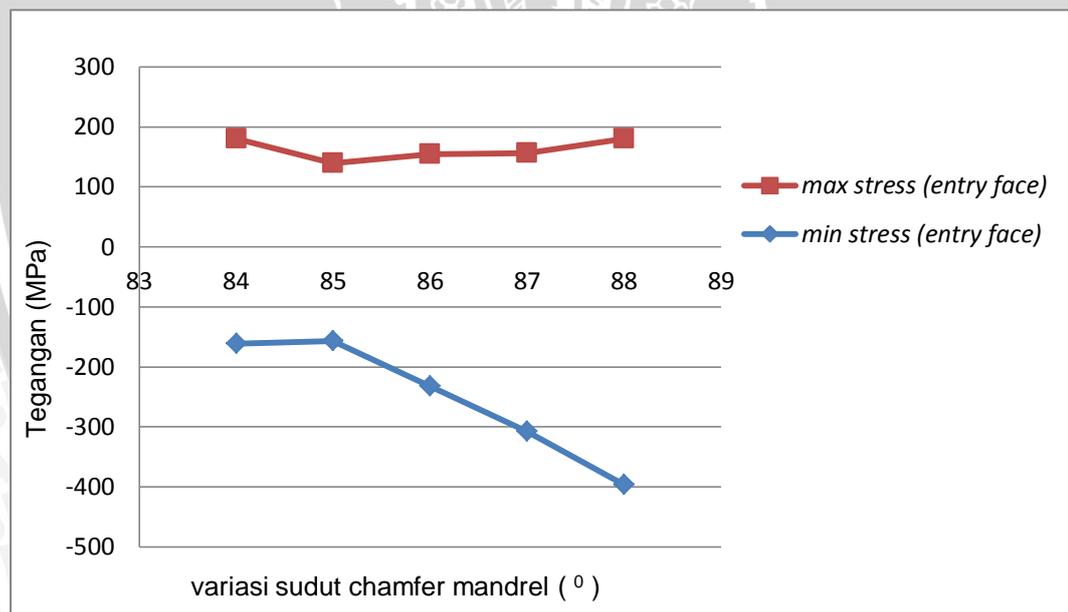
Gambar 4.8 Titik transisi tegangan sisa pada berbagai variasi

Dapat diketahui dari gambar grafik 4.8 tersebut, titik transisi tegangan sisa berbagai sudut *chamfer* mandrel, untuk  $84^{\circ}$ ,  $85^{\circ}$  dan  $86^{\circ}$ , transisi tegangan sisa

tekan menjadi tegangan sisa tarik terjadi pada jarak sekitar 6 mm dari sisi lubang sambungan. Sedangkan sudut  $87^{\circ}$  dan  $88^{\circ}$  terjadi pada jarak sekitar 5 mm dari sisi lubang sambungan. Sehingga dalam mendesain suatu struktur yang dalam penggunaannya menggunakan *cold expansion hole process* pada jarak setelah titik transisi tersebut perlu perhatian khusus, mengingat tegangan yang dihasilkan pada titik-titik transisi tersebut sudah berubah menjadi tegangan sisa tarik yang merugikan. Tegangan sisa tarik ini akan menambah tegangan material pada saat material tersebut dibebani (waktu aplikasi).

#### 4.1.3 Tegangan sisa ekstrim

Selain titik transisi, dapat dilihat pula tegangan sisa tekan minimum dan tegangan sisa tarik maksimum pada plat berlubang setelah *cold expansion hole* dilakukan. Berikut adalah tegangan sisa dengan nilai ekstrem yang terjadi pada plat berlubang dengan berbagai macam *chamfer* mandrel yang berbeda-beda yang ditunjukkan pada gambar berikut:



Gambar 4.9 Grafik tegangan sisa ekstrim pada daerah *entry face* dan *exit face*

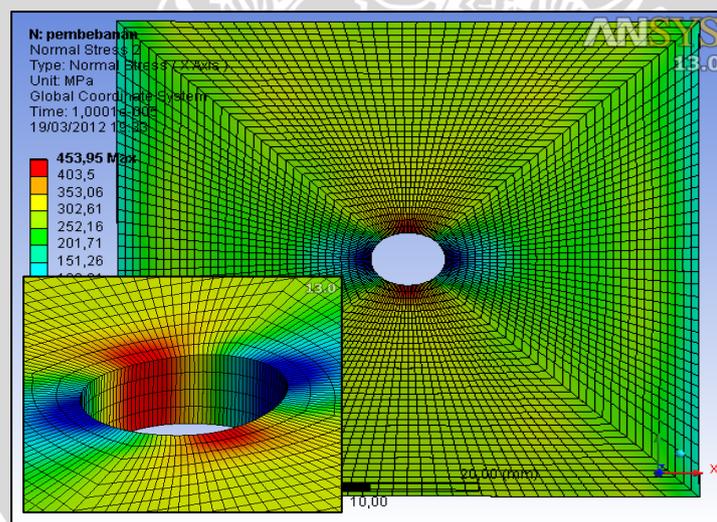
Pada grafik 4.9 di atas dapat ditunjukkan tegangan sisa tekan minimum dan tarik maksimum dari berbagai variasi sudut *chamfer*. Bila diamati dari berbagai variasi yang berbeda maka tegangan maksimum yang dihasilkan juga berbeda. Berikut ini kecenderungan bahwa semakin besar sudut *chamfer* pada mandrel yang digunakan maka semakin besar pula tegangan sisa tekan yang terbentuk

mulai dari tepi lubang. Ini dapat diketahui pada variasi sudut *chamfer*  $84^{\circ}$  tegangan sisa tekan maksimumnya sebesar -160,94 MPa dan variasi sudut *chamfer*  $88^{\circ}$  meningkat menjadi -396,06 MPa. Sedangkan untuk tegangan sisa tariknya seperti halnya terlihat pada grafik, perbedaannya tidak terlalu signifikan.

Sehingga dari uraian daerah transisi dan tegangan sisa *extreme* yang terjadi tersebut dapat diambil kesimpulan bahwa parameter sudut *chamfer* pada mandrel yang digunakan dalam *cold expansion process* memang perlu diperhatikan. Oleh karena itu dalam pemilihan mandrel pada *cold expansion hole process* agar disesuaikan supaya tegangan sisa tekan yang terjadi seminimum mungkin serta tidak menghasilkan tegangan sisa tarik yang terlalu besar.

#### 4.2 Hasil Simulasi Pembebanan

Untuk mengetahui besarnya tegangan aplikasi yang dihasilkan pada plat, pada simulasi ini juga dilakukan proses pembebanan arah axial sebesar 140 MPa pada plat sebelum dikenai proses *cold expansion hole*. Berikut adalah gambar visualisasi hasil simulasi pembebanan axial :



Gambar 4.10 *Contour normal stress (X axis)* distribusi tegangan pada plat berlubang akibat pembebanan axial sumbu X

Dalam simulasi ini tegangan yang terjadi bervariasi mulai dari tegangan kecil dan besar, dapat dilihat dari gambar tersebut terjadi konsentrasi tegangan disekitar lubang. Warna merah pada gambar menunjukkan tegangan tarik yang terjadi pada pelat, nilai terbesar terjadi di sisi lubang pada arah paralel sumbu Y dengan besar tegangannya 438,57 MPa. Pada daerah inilah biasanya retak awal

material (*fatigue crack initiation*) akan dimulai sehingga tegangan ke arah inilah yang akan dianalisa. Setelah terjadi pemusatan tegangan disisi lubang kearah sumbu Y warna merah ini akan memudar menjadi warna hijau bila semakin jauh dari lubang, hal ini menunjukkan bahwa tegangan yang terjadi juga semakin turun. Selain itu juga timbul warna biru yang menggambarkan terjadinya tegangan sisa tekan pada plat yang dikenai beban tarik.

Untuk memvalidasi hasil simulasi ini maka dihitung konsentrasi tegangan pada plat berlubang secara eksak dengan menggunakan faktor konsentrasi tegangan (K), sebagai berikut:

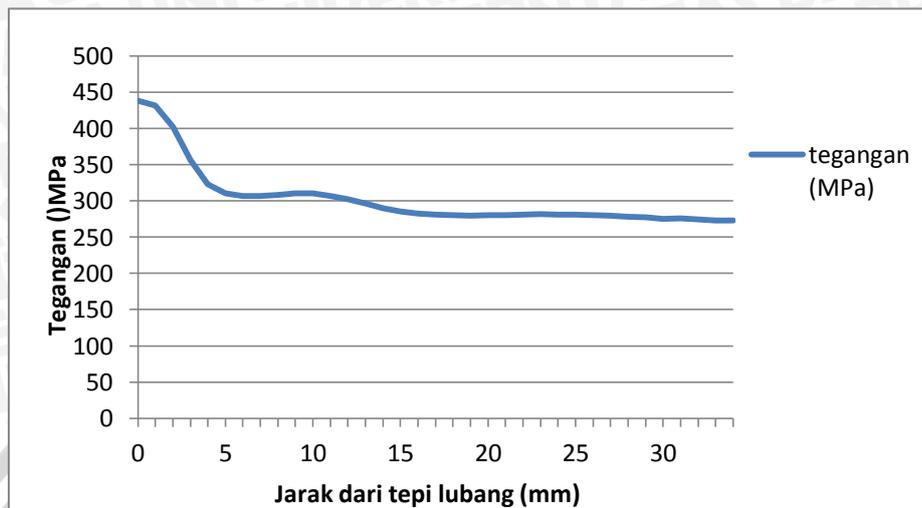
Diketahui :

- $S = \frac{\text{initial yield stress}}{3} = \frac{420 \text{ MPa}}{3} = 140 \text{ MPa}$
- Karena lubang berbentuk lingkaran sempurna, maka  $c = d$
- Sehingga  $\sigma_y = S (1 + 2 \frac{c}{d})$   
 $= 140 (1 + 2)$   
 $= 420 \text{ MPa}$

Sedangkan hasil tegangan maksimum dari simulasi dengan bantuan *software ANSYS 13* adalah 438,57 MPa. Maka tingkat keakuratan analisis dengan *software ANSYS 13* adalah:

$$100\% - \frac{438,57 - 420}{420} \cdot 100\% = 99,96\%.$$

Bila distribusi tegangan tersebut diplot dalam grafik besar tegangan terhadap jarak dari lubang sambungan, maka akan didapatkan hasil yang dipaparkan dalam grafik pada gambar 4.11 berikut:

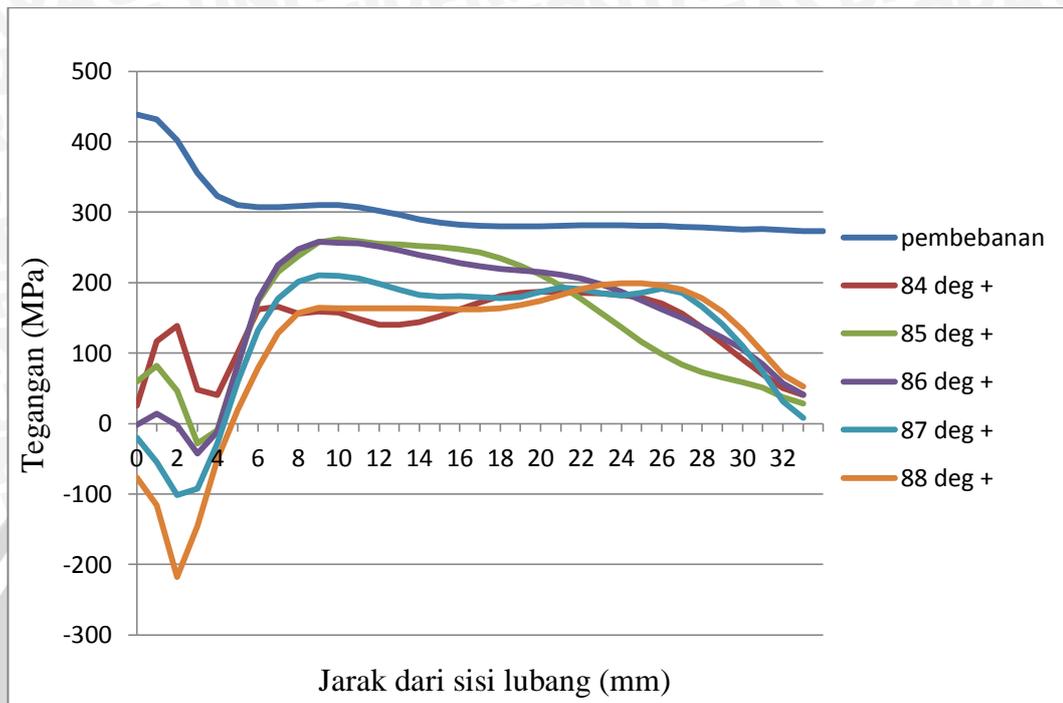


Gambar 4.11 Grafik hubungan jarak lubang dengan tegangan akibat pembebanan

Dari hasil simulasi pembebanan *axial* ini dapat diketahui bahwa terjadi konsentrasi tegangan pada daerah sekitar lubang. Konsentrasi tegangan ini dikarenakan semakin berkurangnya sisi penampang akibat adanya lubang yang ada pada plat. Hal ini tentunya akan sangat membahayakan komponen struktur tersebut waktu digunakan tanpa ada hitungan yang cermat. Karena pada daerah tersebut akan terjadi deformasi plastis lokal dengan tegangan sisa tarik yang dapat memicu timbulnya retak awal material, sehingga pada daerah tersebut memang perlu dilakukan perlakuan khusus dalam hal ini adalah proses *cold expansion hole* agar dihasilkan tegangan sisa tekan yang dapat meminimalisir tegangan yang ada di sekitar lubang.

#### 4.3 Hasil Simulasi *Cold Expansion Hole* dilanjutkan dengan proses pembebanan

Hasil ini diperoleh dengan cara menggabungkan proses *cold expansion hole* dengan pembebanan dengan proses pertama adalah *cold expansion hole*, kemudian dilanjutkan dengan pembebanan *axial*. Hasil ini perlu ditampilkan karena pada superposisi inilah seberapa besar pengaruh distribusi tegangan sisa terhadap tegangan akibat pembebanan dapat diketahui. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada plot grafik berikut ini:

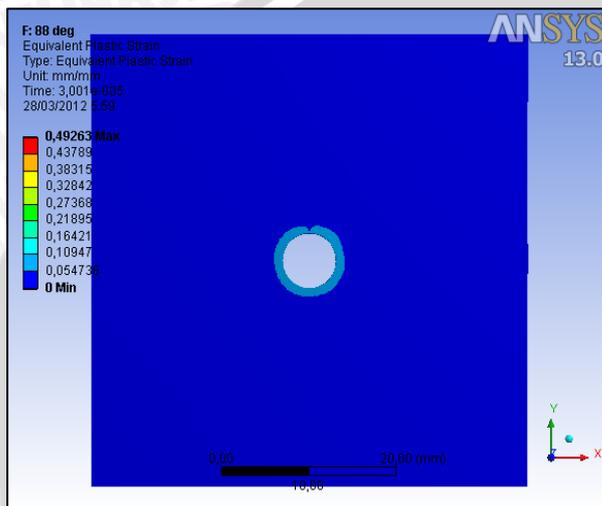
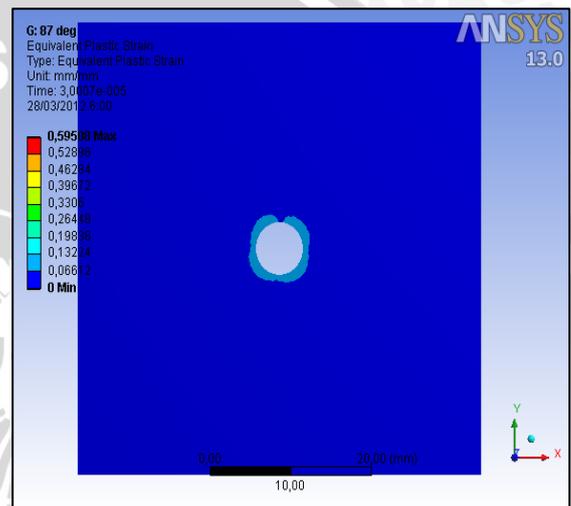
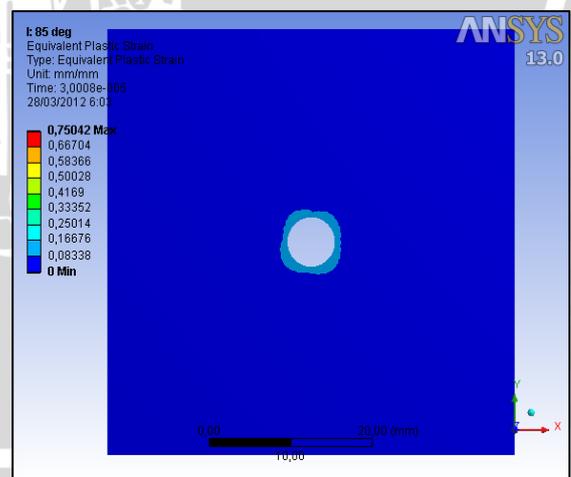


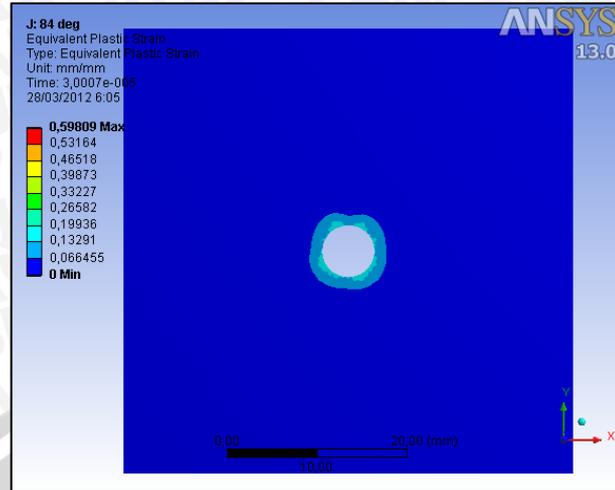
Gambar 4.12 Grafik hubungan antara distribusi tegangan pada proses pembebanan murni dengan distribusi tegangan pada proses *cold expansion hole* + pembebanan

Dari gambar ini dapat dilihat walaupun plat berlubang yang diekspansi diberi beban axial sebesar 140 MPa, disekitar lubang sambungan tidak terjadi konsentrasi tegangan seperti pada plat yang tidak diberi perlakuan *cold expansion hole* (*base* murni). Sebagai contoh pada variasi sudut *chamfer* mandrel 88° bila tidak di ekspansi tegangan yang terjadi di tepi lubang adalah 438,57 MPa sedangkan yang telah ekspansi terlebih dahulu adalah -76,489 MPa. Hal ini sangat sesuai dengan harapan bahwa proses *cold expansion hole* bertujuan untuk menurunkan konsentrasi tegangan pada area sekitar lubang sambungan yang mengakibatkan terjadinya inisiasi retak dari patah lelah pada komponen struktur.

#### 4.4 Pembahasan

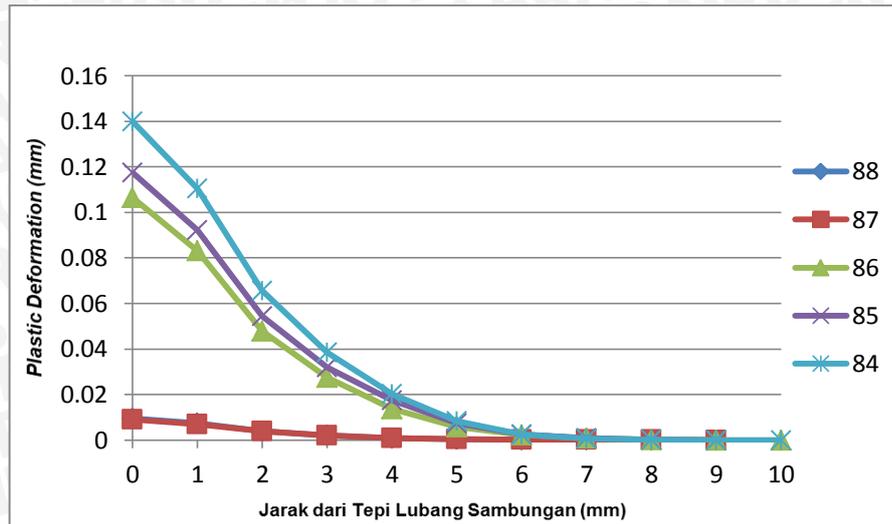
Untuk mengetahui penyebab terjadinya variasi distribusi tegangan sisa yang terjadi pada plat berlubang yang telah diekspansi dengan berbagai sudut *chamfer* mandrel, maka akan ditunjukkan *contour* regangan plastis yang terjadi pada plat berlubang setelah *cold expansion holes*. Hasil plot regangan plastis yang terjadi pada material setelah proses *cold expansion hole* dengan berbagai variasi sudut *chamfer* adalah sebagai berikut:

(a)  $88^{\circ}$ (b)  $87^{\circ}$ (c)  $86^{\circ}$ (d)  $85^{\circ}$

(e)  $84^{\circ}$ 

Gambar 4.13 Distribusi regangan plastis pada plat berlubang setelah *cold expansion holes* dilakukan

Dari gambar 4.13 tersebut dapat dilihat regangan plastis yang terjadi hanya terjadi disekitar lubang, hal ini diindikasikan dengan warna biru muda yang menggambarkan regangan plastis pada sisi dekat lubang sambungan plat berlubang setelah proses *cold expansion holes*. Sedangkan pada jarak yang lebih jauh dari sisi lubang maka tidak terjadi deformasi plastis pada meterial, pada gambar terlihat warna biru tua. Sehingga tegangan sisa pada material akan berubah menjadi tegangan sisa tarik. Tegangan ini terbentuk karena adanya *reyielding* material yang tidak mengalami deformasi plastis. Untuk mengetahui distribusi tegangan plastis pada material setelah proses *cold expansion hole* secara detail dapat dilihat pada gambar plot grafik 4.14 berikut ini:



Gambar 4.14 Plot grafik distribusi regangan plastis berbagai variasi sudut *chamfer* mandrel yang berbeda

Gambar 4.14 di atas adalah rangkuman distribusi regangan plastis yang terjadi pada material setelah dilakukan proses *cold expansion hole* yang dilakukan dengan menggunakan variasi sudut *chamfer* mandrel yang berbeda-beda, mulai dari  $88^\circ$ ,  $87^\circ$ ,  $86^\circ$ ,  $85^\circ$ , dan  $84^\circ$ , sedangkan ketebalan yang digunakan adalah sama, yaitu 5 mm. Pada gambar grafik tersebut dapat dilihat setelah jarak sekitar 7-9 mm regangan plastis sudah bernilai nol. Hal ini menggambarkan bahwa deformasi plastis yang terjadi maksimum terjadi pada jarak 9 mm dari tepi lubang.

Perbedaan tegangan sisa tekan yang terjadi pada berbagai variasi tidak hanya dipengaruhi oleh deformasi plastis pada bidang aksial saja, namun juga dipengaruhi oleh deformasi plastis pada arah ketebalan plat (sumbu y). Semakin besar sudut *chamfer* mandrel, maka semakin kecil tegangan tarik pada arah ketebalan plat sehingga menyebabkan tegangan sisa tekan yang lebih besar dibandingkan dengan variasi sudut yang lain. Sebaliknya, semakin kecil sudut *chamfer* mandrel, maka semakin besar tegangan sisa tarik pada arah ketebalan plat (sumbu y). Hal inilah yang menyebabkan tegangan sisa tekan di sekitar lubang semakin kecil karena tegangan sisa tekan telah direduksi oleh tegangan sisa tarik yang semakin besar tadi.

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Setelah melakukan penelitian ini didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Proses *cold expansion holes* dapat mengurangi terjadinya konsentrasi tegangan pada area sekitar lubang sambungan karena adanya tegangan sisa tekan yang dihasilkan di sekitar lubang sambungan.
2. Pada proses *cold expansion hole* diketahui bahwa semakin besar sudut *chamfer* pada mandrel, semakin besar pula tegangan sisa tekan yang dihasilkan di sekitar lubang.

#### 5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, peneliti menyarankan penelitian selanjutnya perlu dilakukan:

1. Menguji secara nyata proses *cold expansion holes* modifikasi pasak ini secara *true experimental*, seperti menggunakan *strain gauges* ataupun difraksi sinar-X sehingga hasil yang diperoleh lebih akurat.
2. Dilakukan lagi simulasi dengan variasi sudut *chamfer* mandrel yang berbeda.

## DAFTAR PUSTAKA

- P.F.P. de Matos, P.M.G.P. Moreira, J.C.P. Pina, A.M. Dias, P.M.S.T. de Castro. 2004. *Residual stress effect on fatigue striation spacing in a cold-worked rivet hole*. Portugal: Department of Mechanical Engineering, University of Coimbra
- Nigrelli, V. & Pasta, S. 2007. *Finite-Element Simulation of Residual Stress Induced by Split-Sleeve Cold Expansion Hole Process of Holes*. *Jurnal of Material Processing Technology*. Palermo: University of Palermo
- Jaee-Soon Jang, Dave Kim, Myoung-Rae Cho. 2008. *The Effect of Cold Expansion on the Fatigue Life of the Chamfered Holes*. Vancouver: Washington State University
- Gere, James N. & Timoshenko, Stephen P. 1996. *Mekanika Bahan*. Alih bahasa oleh Hans J. Wospakrik. Jakarta: Erlangga
- Szilard, Rudolph. 1974. *Teori dan Analisis Pelat*. Jakarta: Erlangga
- Timoshenko, SP. & Goodier, JN. 1986. *Teori Elastisitas*. Alih bahasa oleh Darwin Sebayang. Jakarta: Erlangga
- Stephens, Ralph I. & Fatemi, Ali. 2001. *Metal Fatigue in Engineering (Second Edition)*. New York: A Wiley-Interscience Publication.
- Iremonger, MJ. 1990. *Dasar Analisis Tegangan*. Alih bahasa oleh Sardi S. Jakarta: UI-Press.
- R, Ghfiri. A, Amroche. A, Imad & G, Mesmacque. 2000. *Ftigue Life Estimation After Crack Repair in 6005 A-T6 Aluminium Alloy Using The Cold Expansion Hole Technique*. *Journal Fatigue Fract Engng Mater Struct*. Lille: Blackwell Science, Ltd
- Zahavi, Eliahu. 1996. *Life Expectancy of Machine Parts: Fatigue Design*. Florida: CRC Press, Inc.
- Modul ANSYS. 2007. *Studio Perancangan dan Rekayasa Sistem Fakultas Teknik Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya*. Malang
- Iswanto, Priyo Tri. Nishida, Shin I. & H, Nobusuke. 2002. *Effect of Compressive Mean Stress and Compressive Residual Stress on Fatigue Properties of Stainless Steel SUS304*. Kitakyushu: The International Society of Offshore and Polar Engineers
- Dowling, Norman E. 1998. *Mechanical Behavior of Materials*. New Jersey: Prentice-Hall Inc.
- Dieter, George E. 1988. *Mechanical Metallurgy*. London : McGraw-Hill Book Company
- Shanmukha, N., Sharma, S.C. & Kulkarni R.V. 2006. *Evaluation of Tensile Properties of Cold Expanded Hole for Improved Fatigue Life*. Karnataka : India