

ANALISIS TEGANGAN AKIBAT PROSES *COLD EXPANSION HOLE*

**SKRIPSI
KONSENTRASI TEKNIK KONSTRUKSI**

**Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik**



Disusun Oleh :

**WIJIL PAMBUDI
NIM. 0710620057 – 62**

**KEMENTERIAN PENDIDIKAN NASIONAL
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG
2012**

LEMBAR PERSETUJUAN

ANALISIS TEGANGAN AKIBAT PROSES *COLD EXPANSION HOLE*

**SKRIPSI
KONSENTRASI TEKNIK KONSTRUKSI**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh :

**WIJIL PAMBUDI
NIM. 0710620057 – 62**

Telah diperiksa dan disetujui oleh:

Dosen Pembimbing

**Anindito Purnowidodo, ST., M.Eng., Dr.Eng.
NIP . 19710310 199802 1 001**

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISIS TEGANGAN AKIBAT PROSES *COLD EXPANSION HOLE*

**SKRIPSI
KONSENTRASI TEKNIK KONSTRUKSI**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik

Disusun oleh :

**WIJIL PAMBUDI
NIM. 0710620057 – 62**

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus pada
tanggal 31 Januari 2012

Penguji Skripsi I

Penguji Skripsi II

Prof. Dr. Ir.Rudy Soenoko, M.Eng.Sc.
NIP. 19490911 198403 1 001

Ir. Hastono Wijaya, MT.
19601204 198601 1 002

Penguji Komprehensif

Moch. Agus Choiron, ST.,MT.
19720817 200003 1 001

Mengetahui,
Ketua Jurusan Teknik Mesin

Dr. Slamet Wahyudi, ST., MT.
NIP. 19720903 199702 1 001

KATA PENGANTAR

Puji syukur kami panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa yang telah senantiasa melimpahkan rahmat, berkat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul ”**Analisis Tegangan Akibat Proses Cold Expansion Hole**” ini dengan baik.

Selama dalam penulisan skripsi ini penulis telah dibantu oleh banyak pihak.

Oleh sebab itu penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu dalam menyelesaikan skripsi ini, yaitu :

- Bapak Dr. Slamet Wahyudi, ST., MT., selaku Ketua Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya,
- Bapak Dr.Eng. Anindito Purnowidodo, ST.,M.Eng., selaku Sekretaris Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya dan sekaligus sebagai Dosen pembimbing yang telah banyak bersabar dan bersedia meluangkan waktunya untuk memberikan ide-ide, bimbingan, arahan, dan masukan dalam penyusunan skripsi ini,
- Bapak Prof. Dr. Ir. Pratikto MMT., selaku Ketua Konsentrasi Teknik Konstruksi Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya,
- Asisten Studio Perancangan Rekayasa dan Sistem Teknik Mesin UB
- Ayah, ibu tercinta, Ria, Santi, mbah Utak sekeluarga serta Anita tersayang yang selalu memberikan motivasi dan dukungan baik materiil maupun moril untuk mengerjakan skripsi ini,
- Sahabat sekaligus motivator, Rizky, Ananto, Bagus, Dian, Sony, Abid, Rendy, Wisnu, Anand, Tompi, Robert, Afan dan seluruh teman-teman M07 yang selalu ada menemani selama penyusunan skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari sempurna, untuk itu penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun dari semua pihak demi kesempurnaan skripsi ini. Akhir kata, semoga skripsi ini bermanfaat bagi kita semua.

Malang, Januari 2012

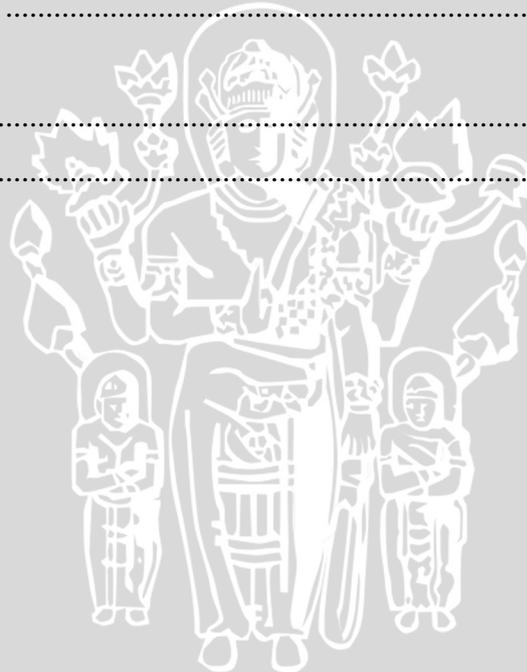
Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR TABEL	iv
DAFTAR GAMBAR	v
DAFTAR LAMPIRAN	vii
RINGKASAN	viii
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Penelitian Sebelumnya	4
2.2 Analisa Tegangan	5
2.2.1 Tegangan.....	7
2.2.2 Konsentrasi Tegangan.....	10
2.2.3 Regangan.....	10
2.2.4 Diagram Tegangan Regangan	11
2.3 Hubungan Teganga-Regangan	13
2.3.1 Elastis	13
2.3.2 Plastis	13
2.4 Tegangan Sisa (<i>Residual Stress</i>).....	16
2.5 <i>Cold Expansion Holes</i>	18
2.6 Metode Elemen Hingga (<i>Finite Element Method</i>)	19
2.7 Software ANSYS.....	24
2.8 Hipotesa	26
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	
3.1 Metode Penelitian.....	27
3.2 Variabel Penelitian	27
3.3 Data Material dan Dimensi.....	27



3.4	<i>Meshing</i>	29
3.5	Simulasi	33
3.5.1	Proses <i>Cold Expansion Holes</i>	33
3.5.2	Pembebanan	33
3.6	Pengambilan titik Tegangan dan Super Posisi	34
3.7	Tempat dan Waktu Penelitian	35
3.8	Diagram Alir Pelaksanan Penelitian.....	35
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		
4.1	Hasil Simulasi Pembebanan	37
4.2	Hasil Simulasi <i>Cold Expansion Holes</i>	39
4.3	Arah Ketebalan.....	43
4.4	Super Posisi Tegangan	44
4.5	Pembahasan	46
BAB V PENUTUP		
5.1	Kesimpulan.....	48
5.2	Saran	48
DAFTAR PUSTAKA		
LAMPIRAN		



DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Balok yang diberi tegangan merata pada ujung-ujungnya	5
Gambar 2.2	Benda padat yang diberi gaya dari berbagai arah	6
Gambar 2.3	Kondisi tegangan secara 3 dimensi pada elemen kubus	7
Gambar 2.4	Tegangan Prinsipal	8
Gambar 2.5	Bidang Prinsipal.	9
Gambar 2.6	Faktor konsentrasi tegangan pada pelat berlubang	10
Gambar 2.7	Komponen-komponen regangan	11
Gambar 2.8	Diagram tegangan-regangan	12
Gambar 2.9	Permodelan material	15
Gambar 2.10	Permodelan material Seinberg Guinan	16
Gambar 2.11	Tegangan sisa pada proses pengelasan	15
Gambar 2.12	Tegangan sisa yang terjadi pada pelat berlubang	16
Gambar 2.13	Regangan sisa pada diagram tegangan-regangan	17
Gambar 2.14	Mekanisme <i>Cold Expansion Hole</i>	19
Gambar 2.15	(a) <i>Gas engine crankshaft</i> , (b) <i>joy swivel link</i>	19
Gambar 2.16	Diskretisasi Elemen	20
Gambar 2.17	Elemen <i>Tetrahedral</i>	23
Gambar 2.18	Elemen <i>Heksaedron</i> (a) Elemen Pejal Segiempat Induk. (b) Pasangan Isoparametriknya	24
Gambar 2.19	Simulasi proses pembubutan dengan <i>Software ANSYS</i>	25
Gambar 3.1	Permodelan dimensi dan bentuk (a) <i>Mandrel</i> , (b) <i>Ring</i> , (c) Plat, (d) <i>Fixed Support</i>	29
Gambar 3.2	<i>Meshing</i> Pembebanan	30
Gambar 3.3	<i>Meshing Cold Expansion Holes</i>	31
Gambar 3.4	Melihat tipe Elemen pada ANSYS CLASSIC	31
Gambar 3.5	Geometri MASS21	32
Gambar 3.6	CONTA174	32
Gambar 3.7	Simulasi <i>Cold Expansion Hole</i>	33
Gambar 3.8	Simulasi Pembebanan	33
Gambar 3.9	Area pengambilan titik tegangan	34
Gambar 3.10	Diagram Pelaksanaan Penelitian	36

Gambar 4.1	<i>Contour</i> distribusi tegangan pada plat berlubang akibat pembebanan axial sumbu X	37
Gambar 4.2	Nilai tegangan terhadap jarak akibat pembebanan	38
Gambar 4.3	Grafik hubungan jarak lubang dengan tegangan akibat pembebanan	38
Gambar 4.4	<i>Contour</i> distribusi Tegangan sisa plat berlubang dengan tebal 5 mm diameter ekspansi <i>De</i> berturut-turut (a) 9,02; (b) 9,06; (c) 9,1; (d) 9,2 dan (e) 9,6 mm	40
Gambar 4.5	Grafik perbandingan distribusi tegangan sisa (a) pada journal V. Nigrelli dan Pasta.S dan (b) adalah distribusi tegangan sisa hasil penelitian	41
Gambar 4.6	Grafik hubungan jarak lubang sambungan dengan distribusi tegangan sisa yang terjadi.	41
Gambar 4.7	Titik transisi tegangan sisa pada berbagai <i>De</i>	42
Gambar 4.8	Tegangan sisa <i>extreme</i> pada berbagai <i>De</i>	43
Gambar 4.9	Grafik jarak lubang terhadap distribusi tegangan sisa pada sisi atas dan bawah plat berlubang.	44
Gambar 4.10	Grafik Superposisi <i>base</i> murni dengan plat yang diexpansi	45
Gambar 4.11	Distribusi regangan plastis pada plat berlubang setelah <i>Cold Expansion Hole</i> dilakukan	46
Gambar 4.12	Plot grafik distribusi regangan plastis tebal plat 5 dengan berbagai <i>De</i> yang berbeda-beda.	47

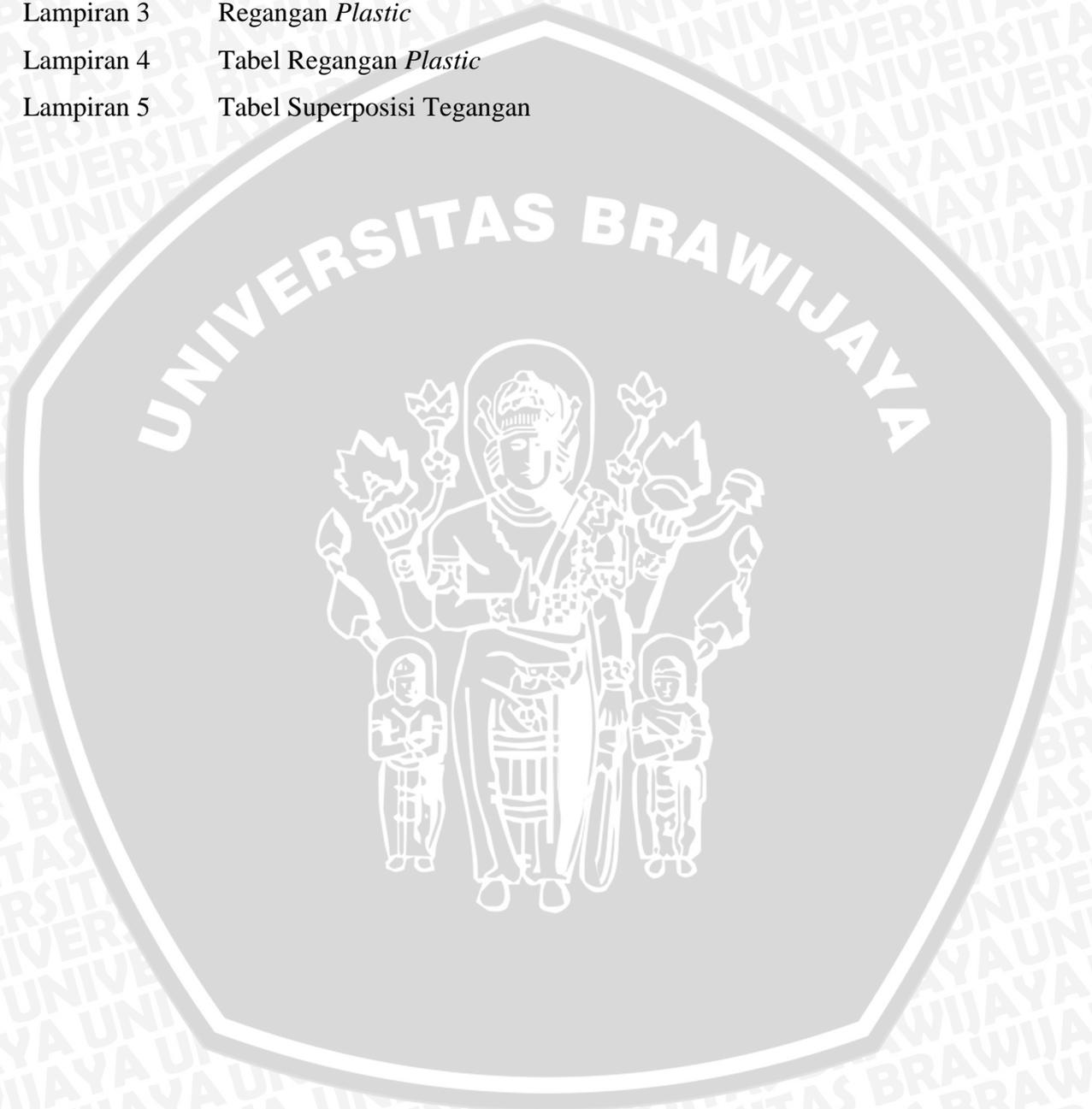
DAFTAR TABEL

No.	Judul	Halaman
Tabel 2.1	Modulus elastisitas berbagai jenis logam	13
Tabel 3.1	<i>Material Properties</i>	28



DAFTAR LAMPIRAN

No.	Judul
Lampiran 1	Distribusi Tegangan Sisa Paralel Sumbu Y Pada Plat Berlubang
Lampiran 2	Tabel Distribusi Tegangan sisa terhadap jarak dari lubang
Lampiran 3	Regangan <i>Plastic</i>
Lampiran 4	Tabel Regangan <i>Plastic</i>
Lampiran 5	Tabel Superposisi Tegangan



RINGKASAN

Wijil Pambudi, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Januari 2012, *Analisa Tegangan Akibat Proses Cold Expansion Hole*, Dosen Pembimbing: Dr.Eng. Anindito Purnowidodo, ST., M.Eng

Dalam merakit komponen struktur dengan *rivet* ataupun *screw* konsentrasi tegangan tarik pada area sekitar lubang tidak dapat dihindari. Hal ini dapat menyebabkan retak awal atau FCI (*Fatigue Crack Initiation*) terjadi dari material sewaktu dibebani. *Cold Expansion Holes* merupakan salah satu cara yang sering digunakan untuk menciptakan tegangan sisa tekan disekitar lubang sambungan, yaitu dengan menekankan bola baja keras berdiameter tertentu pada lubang sambungan. Tegangan sisa tekan ini akan mengeliminir dari konsentrasi tegangan disekitar lubang sambungan pada saat pembebanan, sehingga retak awal material akan terhambat dan umur dari material lebih bisa dioptimalkan.

Dalam penelitian ini bola penekan pada proses *Cold Expansion Hole* diganti menjadi *mandrel* dengan tujuan tegangan sisa tekan yang terbentuk tidak hanya pada permukaan saja. *Cold Expansion Hole* akan disimulasikan dengan software berbasis elemen hingga ANSYS 13 sehingga distribusi tegangan sisa dan tegangan akibat pembebanan dapat diketahui. Selain itu juga diberikan pengaruh parameter diameter ekspansi (*De*) terhadap besar dan kondisi tegangan sisa yang terbentuk setelah proses *Cold Expansion Hole*. Material plat yang digunakan adalah AL 2024 dan *mandrel* serta *fixed support* terbuat dari *struktural steel* yang dianggap *rigid body*.

Dari penelitian ini didapatkan pada plat berlubang yang diberi tegangan 85 MPa terjadi konsentrasi tegangan sebesar 282,93MPa pada sisi lubang. Pada proses *Cold Expansion Hole* tegangan sisa tekan terjadi pada daerah sekitar lubang sambungan sampai arah ketebalan sesuai harapan, dengan tegangan minimum pada *De* 9,02 mm sebesar -189,84 MPa. Tegangan sisa tekan akan bertransisi menjadi tegangan sisa tarik, titik transisi terjauh terjadi pada *De* 9,6 mm sejauh sekitar 6 mm. Tegangan sisa tarik terbesar terjadi pada *De* 9,6 mm sebesar 162,76. Sedangkan pada superposisi tegangan, tegangan terbesar pada *De* 9,6 MPa sebesar 253,94 MPa.

Kata kunci : Analisis Tegangan, *Cold Expansion Hole*, Metode Elemen Hingga, Tegangan Sisa

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam merakit suatu struktur, proses yang paling sering dijumpai adalah proses penyambungan. Penyambungan sendiri dibagi menjadi 3 macam cara yaitu, penyambungan permanen, semi permanen, dan penyambungan tidak permanen. Penyambungan permanen adalah sambungan yang jika diurai lagi akan merusak bagian yang disambung tersebut. Penyambungan semi permanen adalah jenis penyambungan yang jika diuraikan lagi akan merusak sebagian dari sambungan tersebut. Sedangkan sambungan tidak permanen adalah tipe sambungan yang jika diuraikan lagi tidak merusak bagian yang disambung tersebut.

Pada sambungan semi permanen ataupun tidak permanen sering menggunakan sambungan kombinasi mur-baut (*screw*) dan paku keling (*rivet*). Sambungan ini dilakukan dengan melubangi bagian yang akan disambung, sehingga lubang tersebut dapat diisi *screw* maupun keling. Keuntungan sambungan ini adalah mampu dibongkar dan dipasang dengan mudah tanpa menimbulkan kerusakan yang berarti pada daerah sambungan, namun lubang yang dibuat tadi akan timbul konsentrasi tegangan pada saat pengoperasian. Sehingga dalam merencanakan kekuatan material yang akan digunakan pada struktur sambungan juga harus mempertimbangkan konsentrasi tegangan yang terjadi pada lubang sambungan tersebut.

Dalam mendesain suatu komponen ataupun struktur konsentrasi tegangan harus dihindari sebisa mungkin, atau jika tidak dapat dihindari maka harus dilakukan pertimbangan yang serius agar komponen maupun struktur tersebut aman dan tidak mengalami kegagalan. Kegagalan yang disebabkan beban statik jarang terjadi karena cara untuk menganalisa tegangan pada suatu komponen maupun struktur sudah berkembang dengan baik, namun banyak kegagalan pada suatu komponen atau struktur terjadi karena beban berulang atau dinamis. Kegagalan pada beban berulang tidak hanya dipengaruhi oleh besar beban atau kondisi pembebanan tetapi juga kondisi material. Kegagalan yang terjadi dalam mekanisme ini dapat mengakibatkan suatu material mengalami patah atau *fracture*, dan patah ini disebut *fatigue fracture* atau patah lelah. Patahan jenis ini diawali dengan retak yang terinisiasi pada daerah yang mengalami deformasi plastis secara lokal, deformasi ini terjadi pada daerah yang

mempunyai konsentrasi tegangan, jika konsentrasi tegangan ini melebihi tegangan luluh material maka deformasi plastis akan terjadi.

Sampai saat ini ada tiga cara untuk memperlambat perambatan retak, yaitu *stopping hole*, adalah dengan membuat lubang yang sesuai pada ujung retak. Tujuannya adalah untuk mengurangi konsentrasi tegangan yang terjadi pada ujung retak, cara ini sangat ekonomis dan praktis dalam menambah umur material yang telah mengalami inisiasi retak. Cara yang kedua adalah pengelasan, yaitu dengan membuang bagian yang retak kemudian mengelasnya dengan tambahan logam pengisi (*filler metal*). Cara ini sesuai untuk logam yang mempunyai sifat mampu las yang baik, namun untuk material yang tidak mempunyai sifat mampu las yang baik akan mengurangi kekuatan material tersebut. Cara yang ketiga adalah dengan menciptakan tegangan sisa (*residual stress*) tekan di depan ujung retak, cara ini dilakukan dengan melepas atau membongkar struktur kemudian dilakukan sedemikian rupa agar terbentuk tegangan sisa tekan di depan ujung retak..

Selain mampu menghambat perambatan retak yang telah terjadi, tegangan sisa tekan juga mencegah terjadinya inisiasi retak. Tegangan sisa tekan ini akan bisa mengeliminir tegangan pada saat pembebanan aplikatif pada suatu struktur. Konsep ini dipakai dalam cara untuk mencegah inisiasi retak maupun perambatan retak pada sambungan mur-baut (*screw joint*) dan keling (*rivet*) yaitu pada *Cold Expansion Hole Technique*. Teknik ini dilakukan dengan menekankan bola logam pada permukaan lubang sambungan sampai terjadi deformasi plastis, sehingga terjadi tegangan sisa tekan pada daerah permukaan sekitar lubang sambungan.

Kelemahan dari *Cold Expansion Hole Technique* ini adalah tegangan sisa yang terjadi hanya terbentuk di permukaan saja. Untuk memperbaiki teknik tersebut maka pada studi ini akan menggantikan bola logam (sebagai penekan) dengan pasak (*mandrel*) yang nantinya diharapkan tegangan sisa tekan yang terjadi tidak hanya pada permukaan saja tetapi di daerah sekitar lubang secara menyeluruh. Untuk itu dalam studi ini lubang sambungan akan diperlakukan proses *Cold Expansion Hole* dengan mengganti bola penekan dengan pasak (*mandrel*) sehingga pada proses ini diharapkan terjadi tegangan sisa tekan secara menyeluruh terbentuk pada daerah sekitar lubang sambungan, selain itu juga diteliti bagaimanakah pengaruh diameter ekspansi yang digunakan. Pada penelitian ini plat berlubang juga akan diberi pembebanan aplikatif yang nantinya akan disuperposisikan dengan tegangan sisa yang terjadi dan diteliti bagaimanakah hasil tegangan pada daerah sekitar lubang sambungan tersebut.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, dapat disimpulkan suatu permasalahan yaitu:

- Bagaimanakah distribusi tegangan sisa yang terjadi pada daerah sekitar lubang sambungan akibat proses *Cold Expansion Hole*?
- Bagaimanakah teganganyang terjadi pada daerah sekitar lubang sambungan akibat pembebanan?

1.3 Batasan Masalah

Agar permasalahan tidak meluas dan tetap terfokus, maka perlu dilakukan batasan-batasan sebagai berikut :

1. Bahan plat dianggap *isotropik* dan memiliki struktur yang homogen.
2. Tidak meperhitungkan faktor lingkungan seperti Temperatur dan Korosi.
3. Pasak (*mandrel*) dan tumpuan dianggap *rigid body*.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin diperoleh dari penelitian ini adalah:

- Mengetahui distribusi tegangan sisa yang terjadi pada daerah sekitar lubang sambungan akibat proses *Cold Expansion Hole*.
- Mengetahui tegangan yang terjadipada daerah sekitar lubang sambungan akibat pembebanan.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat sebagai berikut :

1. Memberikan pemahaman lebih jauh mengenai distribusi tegangan sisa pada proses *Cold Expansion Hole*.
2. Dapat memberikan suatu masukan yang bermanfaat tentangdistribusi tegangan sisa pada proses *Cold Expansion Hole* yang diaplikasikan dalam kehidupan sehari-hari.
3. Sebagai bahan acuan untuk penelitian selanjutnya.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Sejumlah penelitian yang terdahulu banyak yang membahas tentang perilaku tegangan sisayang terjadi pada komponen struktur, diantaranya adalah sebagai berikut:

R. Ghfiri, A. Amroche, A. Imad dan G. Mesmacque (2000) dalam tulisannya “*Fatigue life estimation after crack repair in 6005 A-T6 Aluminium alloy using the cold expansion hole technique*”, dijelaskan proses *Hole Drilling (HD)* dan *Cold Expansion (CE)* digunakan dalam teknik mereparasi retakan struktur. Ditemukan pada hasil bahwa proses *Cold Expansion (CE)* menimbulkan *Compressive Residual Stress*(tegangan sisa tekan) dan juga meningkatkan *Fatigue Crack Initiation (FCI)*, yaitu banyaknya siklus yang menimbulkan retakan baru sejauh 0,22 mm dari permukaan struktur.

D. Zeljko (1995), “*Comparasion of Fatigue Crack Retardation Methods*”, ditulis berbagai perbandingan proses reparasi retakan yang diujikan pada spesimen paduan Aluminium dengan lubang dan *notch* kemudian diperlakukan pada *closed-loop servo hydraulic machine* untuk menghasilkan retak, setelah itu proses reparasi retak seperti *Welding technique, Weldedmetal reinforcements, Adhesively bonded CFRP patches, Single peak tensile overloads dan Fatigue crack arrestholes* diterapkan pada spesimen. Setelah diujikan pada *Fatigue test programmes* dihasilkan bahwa *Adhesively bonded CFRP patches dan Fatigue crack arrestholes* adalah hasil terbaik karena pada proses ini menghasilkan tegangan sisa tekan yang menguntungkan dan konsentrasi tegangan pada *notch* yang rendah.

V. Nigrelli, S. Pasta (2007) dari University of Palermo pada jurnalnya “*Finite-element simulation of residual stress induced by split-sleeve cold expansion hole process of holes*”, memberi gambaran bahwa *split-sleeve cold expansion hole process* dimodelkan dalam tiga dimensi untuk mengetahui tegangan sisa yang terjadi dengan menggunakan *software DEFORMTM*. Dalam *software* ini permodelan perhitungan tegangan sisa yang terjadi menggunakan *Langrangian Implicit Code* yang biasanya dipakai dalam proses pembentukan logam. Hasilnya adalah tegangan sisa terjadi pada daerah lubang berupa *Compressive Residual Stress*(tegangan sisa tekan) yang juga nilai tegangan sisa yang dihasilkan hampir sama dengan penyelesaian menggunakan *Analitycal Solution* yang dikembangkan oleh Guo.

Priyo Tri Iswanto, N. Shin Ichi, H. Nobusuke(2002), *Effect Of Compressive Mean Stress And Compressive Residual Stress On Fatigue Properties Of Stainless Steel*

SUS304, pada studi tersebut dihasilkan bahwa *Compressive mean stress* dan *Compressive residual stress* akan menambah *Fatigue Limit* spesimen sebesar 425 MPa dengan pemberian *Compressive mean stress* dan *Residual stress* sebesar -183,75 MPa dan juga dijelaskan bahwa *Compressive residual stress* dapat menghambat perambatan retak.

2.2 Analisa Tegangan

2.2.1 Tegangan

Tegangan (*Stress*) didefinisikan suatu besaran yang menyatakan intensitas gaya yang dibagi luasan tempat gaya tersebut bekerja yang ada pada suatu struktur atau elemen *solid* (padat). Dalam fluida tegangan disebut tekanan (*pressure*). Tegangan dinotasikan:

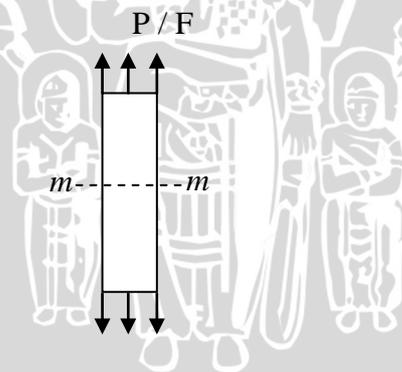
$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Dengan: σ adalah besarnya tegangan (MPa)

F adalah besarnya gaya yang bekerja (N)

A adalah luas penampang (mm^2)

Sebagai contoh yang sederhana adalah sebuah balok yang diberi beban (gaya) merata melintang pada ujung-ujungnya seperti pada gambar 2.1 berikut:

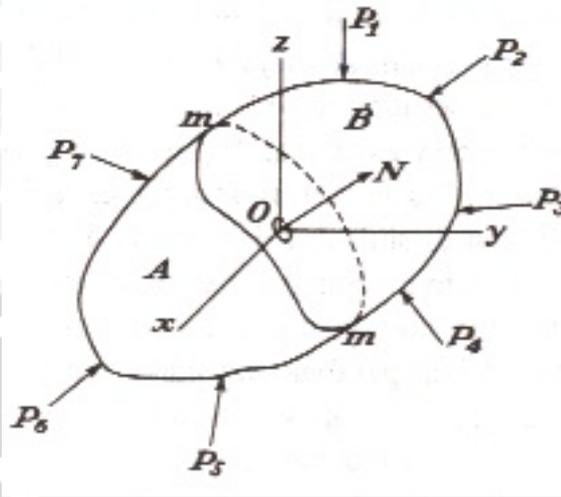


Gambar 2.1 Balok yang diberi tegangan merata pada ujung-ujungnya
Sumber :Timoshenko, 1986: 2

untuk mencapai suatu kesetimbangan maka benda tersebut akan menghasilkan gaya dalam atau sering disebut (*Internal Force*) yang juga terbagi secara merata di sepanjang potongan *m-m*, sehingga tegangan yang terjadi dapat diperoleh dengan membagi semua gaya (F) yang bekerja pada ujung-ujung batang tersebut dengan luasan yang dihasilkan pada potongan *m-m* (A).

Pada contoh kasus tersebut, tegangan yang terjadi terbagi secara merata di sepanjang potongan *m-m* (A). Pada kasus umum, tegangan yang terjadi tidak terbagi

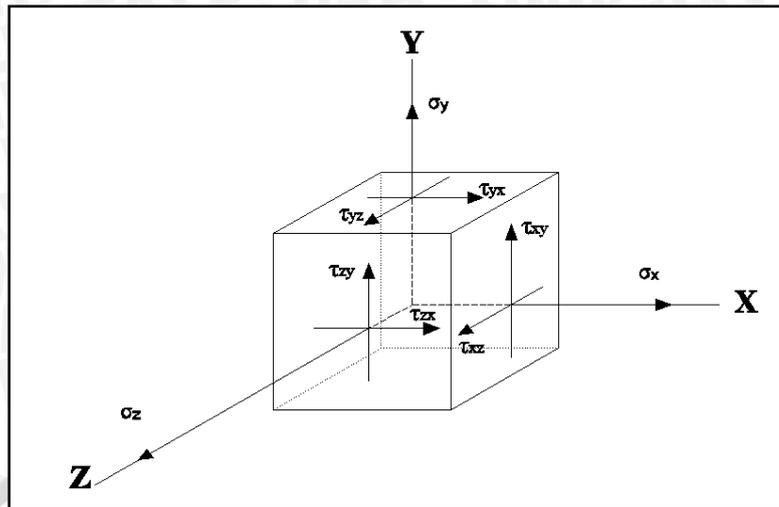
rata sepanjang luasan. Hal tersebut bisa terjadi karena pengaruh bentuk dari benda itu sendiri. Sebagai contoh pada gambar berikut:



Gambar 2.2 Benda padat yang diberi gaya dari berbagai arah
Sumber :Timoshenko, 1986: 2

untuk memperoleh tegangan yang terjadi pada luasan tertentu (δA), maka potongan penampang $m-m$ pada titik O di sembarang tempat, kita mengamati bahwa gaya yang bekerja pada luas elemen ini diakibatkan oleh adanya gaya yang bekerja pada bagian B terhadap bagian A pada elemen luasan yang kecil tersebut, yang kita sebut dengan δP dengan arah dan besar δP sudah dalam resultan gaya yang bekerja pada benda tersebut. Sehingga tegangan pada luasan kecil tersebut dirumuskan $\delta\sigma = \delta P / \delta A$ yang biasanya arahnya tidak lagi tegak lurus dari luasan δA . Untuk itu tegangan tersebut akan di uraikan menjadi 2 macam tegangan, yaitu tegangan yang tegak lurus dengan arah luasan δA dan tegangan yang sejajar dengan luasan kecil δA . Dalam kuliah kita sehari-hari tegangan yang tegak lurus tadi disebut dengan tegangan normal, tegangan ini dinotasikan dengan σ dan tegangan yang sejajar tadi disebut dengan tegangan geser (*Shear Stress*), tegangan ini disimbolkan dengan τ .

Kondisi tegangan pada suatu titik dimaksudkan sebagai suatu definisi atau informasi lengkap mengenai besar dan arah tegangan pada suatu titik meliputi semua bidang yang melalui titik tersebut. Pada gambar di bawah ini ditunjukkan suatu elemen kubus yang mempunyai tegangan normal dan tegangan geser pada ketiga bidang yang melalui suatu titik. Elemen kubus disini merupakan pemisalan yang sangat kecil dari suatu komponen struktur yang dikenai gaya dalam 3 dimensi arah.



Gambar 2.3 Kondisi tegangan secara 3 dimensi pada elemen kubus

Sumber: Timoshenko, 1986: 349

Penulisan tegangan pada suatu titik dapat dilakukan dengan penulisan tensorial dengan matrik sebagai berikut :

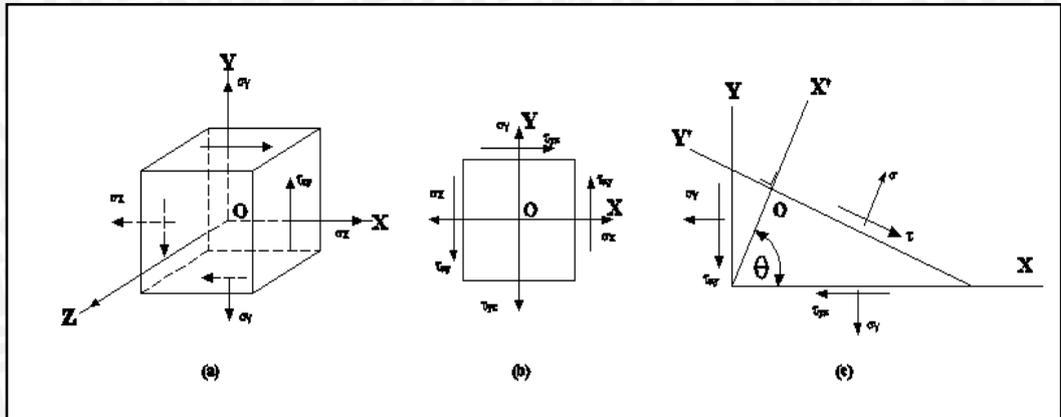
$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \sigma_{yy} & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Arti dari penulisan tersebut adalah indeks pertama menyatakan bidang tempat tegangan tersebut bekerja, dan indeks kedua menyatakan arah tegangan tersebut. Tegangan dengan indeks pertama dan kedua sama merupakan tegangan normal, sedangkan yang indeksnya berlainan merupakan tegangan geser. Tegangan normal berharga positif, bila merupakan tegangan tarik dan bertanda negatif bila merupakan tegangan kompresi. Untuk tegangan geser berharga positif bila mempunyai kecenderungan memutar elemen kubus searah jarum jam dan bertanda negatif bila cenderung memutar elemen kubus berlawanan arah jarum jam.

Dalam menganalisa tegangan maka kita akan menjumpai istilah tegangan prinsipal, tegangan prinsipal adalah tegangan yang bekerja pada daerah prinsipal dimana tegangan geser berharga nol dan hanya tegangan normal saja yang bekerja. Arah tegangan utama disebut arah prinsipal.

Untuk titik yang mendapat tegangan dua dimensi, artinya $\sigma_z = \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0$ maka sumbu prinsipal ketiga dianggap berhimpit dengan sumbu z dan dengan demikian harga tegangan ke arah sumbu prinsipal ketiga akan sama dengan tegangan ke arah sumbu z yang berharga nol ($\sigma_3 = \sigma_z = 0$). Hal ini dapat digambarkan seperti pada gambar (2.4.a) dan dapat disederhanakan lagi menjadi seperti pada gambar (2.4.b). Jika sumbu xy diputar terhadap sumbu z sebesar sudut θ dan melalui titik O dibuat

bidang oblique (bidang miring sembarang) yang mempunyai normal n (sama dengan arah x') seperti pada gambar (2.4c).



Gambar 2.4 Tegangan Prinsipal
Sumber: Timoshenko, 1986: 306

Maka tegangan normal (σ_x') di bidang *oblique* didapatkan sebagai berikut :

$$\sigma_x' = \sigma_x \cos^2 \theta + \sigma_y \sin^2 \theta + 2\tau_{xy} \sin \theta \cos \theta \quad (3)$$

Sedangkan tegangan geser ($\tau_{x'y'}$) di bidang *oblique* didapatkan

$$\tau_{x'y'} = \tau_{xy} (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) + (\sigma_y - \sigma_x) \sin \theta \cos \theta \quad (4)$$

Persamaan di atas juga sering ditulis dengan sudut 2θ sehingga :

$$\sigma_x' = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta \quad (5)$$

$$\tau_{x'y'} = \frac{\sigma_y - \sigma_x}{2} \sin 2\theta + \tau_{xy} \cos 2\theta \quad (6)$$

Untuk mencari arah tegangan prinsipal maka sesuai definisi di atas bahwa tegangan gesernya harus sama dengan nol maka dari persamaan (6) didapatkan :

$$\tau_{x'y'} = \tau_{xy} (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) + (\sigma_y - \sigma_x) \sin \theta \cos \theta = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} = \frac{\sin \theta \cos \theta}{\cos^2 \theta - \sin^2 \theta} = \frac{1/2 \sin 2\theta}{\cos 2\theta} = \frac{1}{2} \tan 2\theta \quad (8)$$

$$\tan 2\theta = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} \quad (9)$$

Persamaan (9) bila dianalogkan dengan suatu segitiga dengan dalil pythagoras maka :

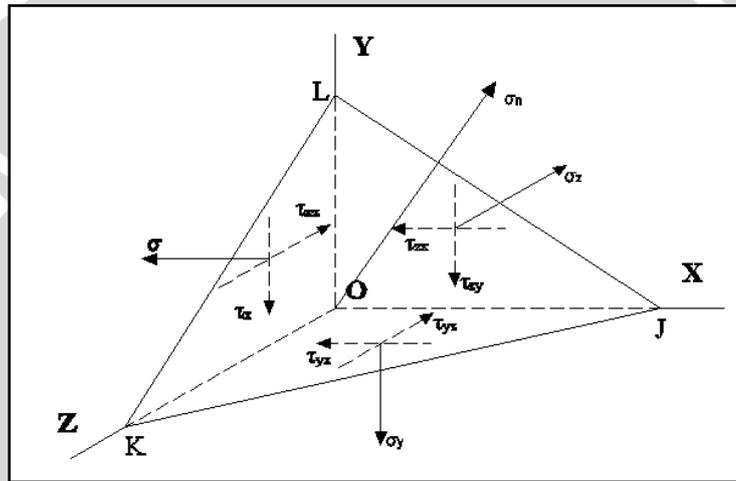
$$\sin 2\theta = \frac{\tau_{xy}}{\left[\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right)^2 + \tau_{xy}^2 \right]^{1/2}} \quad (10)$$

$$\cos 2\theta = \frac{\sigma_x - \sigma_y / 2}{\left[\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right)^2 + \tau_{xy}^2 \right]^{1/2}} \quad (11)$$

Harga – harga ini disubstitusikan ke persamaan (5) dan (6) sehingga didapatkan tegangan prinsipal sebagai berikut :

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \pm \left[\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right)^2 + \tau_{xy}^2 \right]^{1/2} \quad (12)$$

Untuk menentukan tegangan – tegangan prinsipal suatu kondisi tegangan 3D dari suatu sistem sumbu koordinat ortogonal x,y,z dapat dilakukan dengan memotong suatu kubus sehingga didapat bidang diagonal JKL. Bidang ini sedemikian rupa sehingga merupakan bidang prinsipal dimana pada bidang ini hanya bekerja tegangan prinsipal tanpa ada tegangan geser, seperti pada gambar 2.5 berikut:



Gambar 2.5 Bidang Prinsipal
Sumber: Timoshenko, 1986: 344

Dari persamaan kesetimbangan dalam masing – masing arah sumbu (x,y,z) maka didapatkan :

$$(\sigma - \sigma_x)l - \tau_{xy}m - \tau_{zx}n = 0 \text{ arah } x$$

$$-\tau_{xy}l + (\sigma - \sigma_y)m - \tau_{zy}n = 0 \text{ arah } y$$

$$-\tau_{yz}l - \tau_{yz}m + (\sigma - \sigma_z)n = 0 \text{ arah } z$$

l, m, dan n berturut – turut adalah cosinus sudut antara σ_n dengan sumbu x, y, z.

Penyelesaian persamaan – persamaan tersebut diperoleh dengan membuat determinan dari koefisien – koefisien l, m, n sama dengan nol.

$$D = \begin{vmatrix} (\sigma - \sigma_x) & -\tau_{xy} & -\tau_{xz} \\ -\tau_{xy} & (\sigma - \sigma_y) & -\tau_{yz} \\ -\tau_{xz} & -\tau_{yz} & (\sigma - \sigma_z) \end{vmatrix} \quad (13)$$

Penyelesaian determinan ini menghasilkan persamaan pangkat tiga dari σ , yaitu :

$$\sigma^3 - I_1\sigma^2 + I_2\sigma - I_3 = 0 \quad (14)$$

dimana :

$$I_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z$$

$$I_2 = \sigma_x\sigma_y + \sigma_y\sigma_z + \sigma_z\sigma_x - \tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2$$

$$I_3 = \sigma_x\sigma_y\sigma_z + 2\tau_{xy}\tau_{yz}\tau_{zx} - \sigma_x\tau_{yz}^2 - \sigma_y\tau_{zx}^2 - \sigma_z\tau_{yx}^2$$

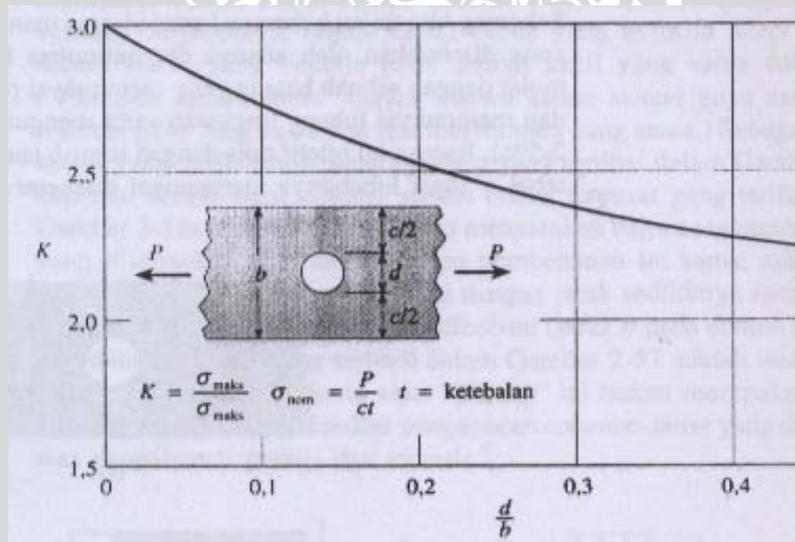
Akar – akar dari persamaan ini merupakan tegangan – tegangan utama ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) dimana $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$.

2.2.2 Konsentrasi Tegangan

Pemusatan tegangan terjadi seiring adanya bentuk yang tidak teratur dari bahan. Pada pelat berlubang, tegangan normal yang bekerja pada potongan melintang potongan Faktor pemusatan tegangan (*stress concentration factor*) dipakai untuk menghubungkan tegangan maksimum sebenarnya pada ketidak-mulusan tersebut terhadap tegangan nominal (E. Shigley, 1986). Faktor tersebut dinyatakan dengan persamaan :

$$K = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}} \tag{15}$$

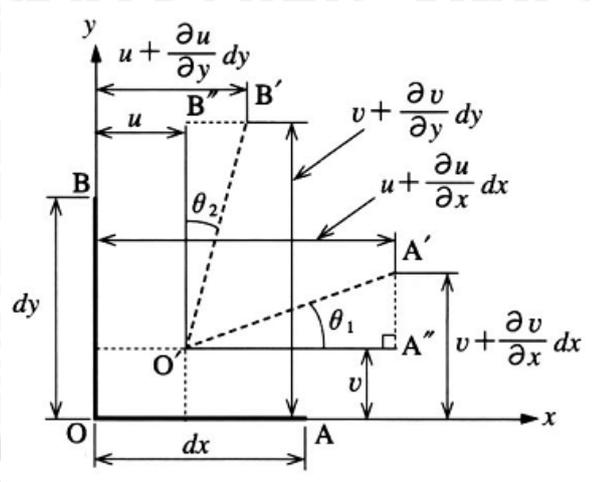
Pada pelat berlubang faktor konsentrasi tegangan dapat dilihat pada gambar grafik 2.6 di bawah ini:



Gambar 2.6 Faktor konsentrasi tegangan pada pelat berlubang
Sumber: Gere, 1987:126

2.2.3 Regangan

Regangan adalah suatu perubahan bentuk tanpa dimensi untuk menyatakan adanya deformasi (Iremonger, 1990:17). Regangan yang terjadi karena benda atau struktur tersebut dikenai suatu tegangan. Seperti halnya tegangan regangan pada suatu titik mempunyai beberapa komponen. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 2.7 dibawah ini:



Gambar 2.7 Komponen-komponen regangan
 Sumber: Timoshenko, 1986: 6

Gambar tersebut menjelaskan suatu elemen yang mengalami perubahan dimensi. Komponen-komponen regangan yang dapat diambil dari permodelan gambar tersebut adalah sebagai berikut:

Regangan normal (*Normal Strain*)(Timoshenko, 1986: 6):

$$\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \epsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \tag{16}$$

dan untuk Regangan geser (*Shear Strain*)(Timoshenko, 1986: 6):

$$\begin{aligned} \gamma_{xy} = \gamma_{yx} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \\ \gamma_{yz} = \gamma_{zy} &= \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \\ \gamma_{zx} = \gamma_{xz} &= \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \end{aligned} \tag{17}$$

Dengan: ϵ_x adalah regangan normal arah sumbu x

ϵ_y adalah regangan normal arah sumbu y

ϵ_z adalah regangan normal arah sumbu z

γ_{xy} adalah regangan geser arah sumbu x pada sumbu y

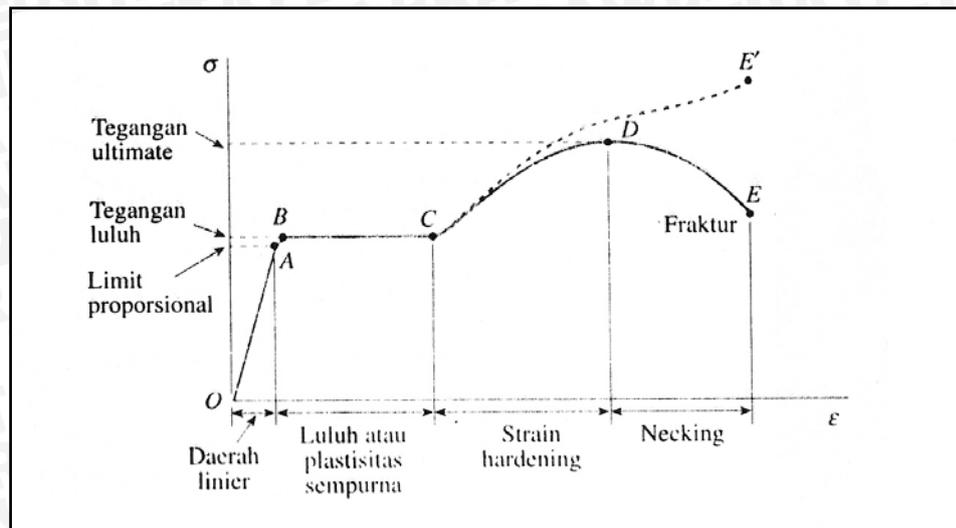
γ_{yz} adalah regangan geser arah sumbu y pada sumbu z

γ_{zx} adalah regangan geser arah sumbu z pada sumbu x

2.2.4 Diagram Tegangan-Regangan

Tegangan dan regangan senantiasa berhubungan dalam semua material. Dalam material teknik (baja), pada umumnya hubungan tegangan regangan diberikan pada diagram tegangan-regangan seperti pada gambar 2.8 berikut ini:





Gambar 2.8 Diagram tegangan-regangan
Sumber: Gere, 1996:13

Diagram tersebut didapat dari menguji tarik suatu material. Dari diagram tersebut ada beberapa titik-titik penting, diantaranya adalah sebagai berikut:

Titik A adalah *proporsional limit point*, yaitu titik dimana batas antara tegangan regangan masih dalam keadaan proporsional atau linear. Sampai batas ini hukum Hooke yang menyatakan regangan sebanding dengan tegangannya untuk material elastik sempurna masih berlaku. Daerah ini disebut daerah elastis.

Titik B adalah *yield point*, yaitu titik dimana bahan mulai mengalami penambahan regangan tanpa ada penambahan tegangannya. Peristiwa ini dinamakan *yielding* atau pelelehan, sedangkan tegangan yang terjadi adalah tegangan leleh. Pelelehan akan terus terjadi sampai pada titik C, yang mana pada daerah ini material menjadi plastis sempurna (*perfectly plastic*). Kalau pemberian tegangan terus dilakukan maka material akan mengalami *strain hardening* sampai pada titik *ultimate*, yaitu titik D.

Titik D adalah *ultimate point*, yaitu titik dimana tegangan suatu bahan mencapai tegangan tertinginya. Tegangan yang bekerja pada titik ini dinamakan tegangan *ultimate*. Bila penambahan beban terus dilakukan maka bahan tersebut akan putus pada titik E, yaitu *fracture point*. Dari diagram tersebut dapat dilihat dari titik C sampai titik patahnya (E), ada dua garis hubungan tegangan-regangan yang terjadi. Hal tersebut dikarenakan material mengalami penyusutan luas penampang atau lebih populernya disebut *necking*, untuk garis yang putus-putus tegangan yang terjadi dihitung dengan menggunakan luas penampang sebenarnya (yang sudah mengalami penyusutan) dan tegangan yang dihasilkan dinamakan tegangan sejati (*true stress*) sedangkan untuk garis yang kontinu tegangan dihitung dengan menggunakan luas

penampang awal material sebelum material tersebut di uji tarik dan tegangan yang dihasilkan disebut tegangan rekayasa, dalam dunia teknik diagram yang digunakan adalah tegangan rekayasa karena dari diagram tersebut dapat dilihat tegangan ultimate yang terjadi.

2.3 Hubungan Tegangan-Regangan

2.3.1 Elastis

Bila dilihat dari diagram tegangan-regangan hubungan yang pertama terdapat pada daerah elastis (*elastic region*). Hubungan tegangan regangan pada daerah ini bersifat linier, dirumuskan dengan hukum Hooke yang secara sistematis dituliskan(Iremonger,1990:19):

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \tag{18}$$

dengan: E adalah modulus Young bahan ($\frac{N}{mm^2}$)

Modulus Young atau modulus elastisitas dinyatakan sebagai perbandingan antara tegangan dan regangan.Modulus elastisitas merupakan karakteristik linear suatu logam tertentu, karena setiap logam mempunyai modulus elastisitas yang berbeda.Makin besar modulus elastisitas, makin kecil regangan elastis yang dihasilkan akibat pemberian tegangan. Makin besar gaya tarik menarik antara atom logam, makin tinggi pula modulus elastisitasnya.

Tabel 2.1.Modulus elastisitas berbagai jenis logam

Material	Elastic Modulus <i>E</i> , GPa (10 ³ ksi)		Poisson's Ratio <i>ν</i>
<i>(a) Metals</i>			
Aluminum	70.3	(10.2)	0.345
Brass, 70Cu-30Zn	101	(14.6)	0.350
Copper	130	(18.8)	0.343
Iron; mild steel	212	(30.7)	0.293
Lead	16.1	(2.34)	0.44
Magnesium	44.7	(6.48)	0.291
Stainless steel, 2Ni-18Cr	215	(31.2)	0.283
Titanium	120	(17.4)	0.361
Tungsten	411	(59.6)	0.280

Sumber :Dowling,1998;178

2.3.2 Plastis

Pada kondisi plastis, deformasi yang terjadi pada material bersifat *irreversible* dan pada kondisi ini hukum Hooke sudah tidak berlaku lagi.Salah satu karakteristik yang perlu dipahami dari deformasi plastis pada material logam adalah logam tidak

mempunyai sifat mampu tekan (*incompressible*), sehingga pada deformasi plastis volume dari material logam adalah konstan.

Bila dilihat pada diagram tegangan-regangan sebenarnya pada kondisi plastis hubungan tegangan regangan dapat dirumuskan dengan:

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (19)$$

dengan σ adalah tegangan

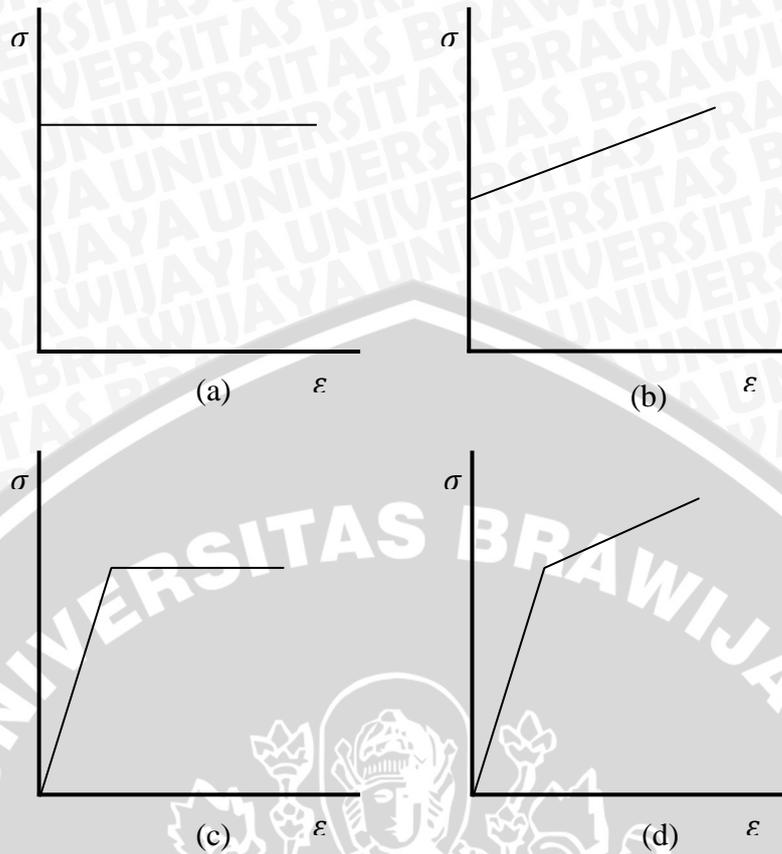
K adalah konstanta penguatan

ε adalah regangan

n adalah eksponensial *strain hardening*

Dalam analisa untuk mendapatkan penyelesaian masalah deformasi, maka perlu untuk mengidealisasikan hubungan tegangan-regangan yang terjadi. Pada umumnya ada empat permodelan pengidealisasi dari sudut pandang terjadinya deformasi pada material, yang pertama adalah *rigid perfectly plastic*, pada pemodelan ini material tidak mengalami deformasi elastis terlebih dahulu, namun langsung mengalami deformasi plastis pada saat diberi pembebanan sampai batas tertentu. Deformasi akan terus terjadi jika pembebanan terus dilakukan walaupun besar pembebanan tidak ditambahkan. Pada kurva diagram tegangan-regangan permodelan material ini dapat dilihat pada gambar 2.9 (a). Permodelan yang kedua adalah *rigid linier strain hardening*, yaitu permodelan material yang tanpa mengalami deformasi elastis, sehingga hanya terjadi deformasi plastis dan pada saat penambahan deformasi plastis maka akan diikuti oleh penambahan pembebanan secara linier pada diagram tegangan-regangan. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 2.9 (b). Kedua permodelan ini sangat cocok digunakan untuk menggambarkan yang bersifat plastis.

Untuk material logam sendiri biasanya tergolong material yang *elasto-plastic*, yang mana pada material terjadi dua macam deformasi yaitu deformasi elastis dan deformasi plastis. Pada material jenis ini permodelan yang digunakan adalah jenis ke-tiga dan ke-empat, yaitu *elastis perfectly plastic* dan *elastis linier strain hardening*. Pada permodelan ini material akan mengalami deformasi elastis terlebih dahulu selama diberi pembebanan sampai batas tertentu, kemudian akan mengalami deformasi plastis. Untuk *elastis perfectly plastic*, deformasi plastis yang terjadi tidak diikuti penguatan tegangan sedangkan *elastis linier strain hardening*, deformasi plastis yang terjadi akan diikuti dengan penguatan tegangan. Berikut adalah gambar kurva tegangan-regangan berbagai macam permodelan material:



Gambar 2.9 Permodelan material

Untuk analisa non-linier sendiri ada beberapa permodelan hubungan tegangan-regangan yang secara empiris maupun semi empiris, salah satunya adalah permodelan *The Steinberg–Cochran–Guinan–Lund* atau yang lebih dikenal dengan *steinberg guinan model*, pada permodelan material ini tegangan pada daerah plastis juga dipengaruhi oleh suhu lingkungan. Hubungan tegangan-regangan dirumuskan sebagai berikut:

$$Y = Y_0 \left\{ 1 + \left(\frac{Y'_p}{Y_0} \right) \frac{P}{\eta^{1/3}} + \left(\frac{G_T}{G_0} \right) (t - 300)(1 + \beta \epsilon)^n \right\}$$

Dengan : Y adalah tegangan plastis

Y_0 adalah tegangan yield

p adalah tekanan luar

η adalah *compression* (v/v_0)

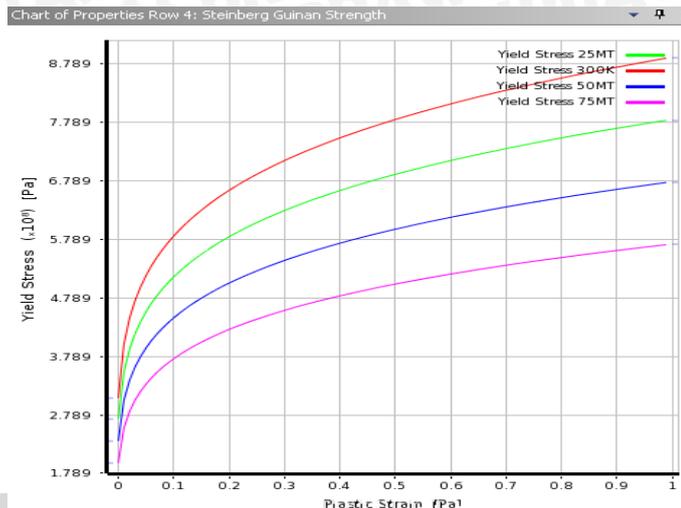
β adalah *hardening constanta*

e adalah regangan plastis

n adalah *hardening exponent*

Y'_p dan G_T adalah parameter-parameter tersebut pada kondisi p dan T = 0

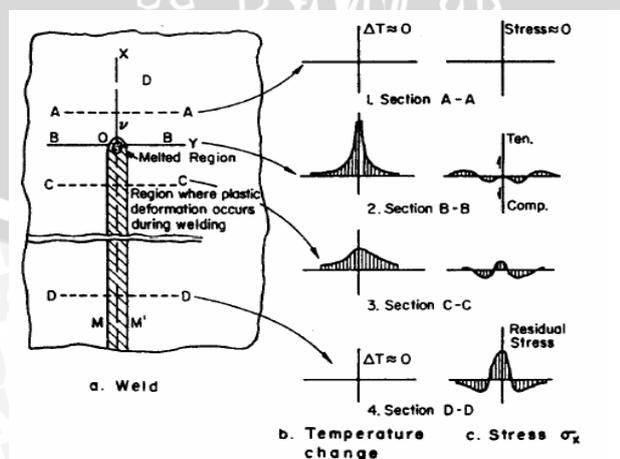
Bentuk kurva tegangan-regangan yang terbentuk adalah sebagai berikut:



Gambar 2.10 Permodelan material Seinberg Guinan
 Sumber: Material Properties Ansys AutoDyn

2.4 Tegangan Sisa (*Residual Stress*)

Menurut Radaj(1992), tegangan sisa merupakan tegangan yang bekerja di dalam suatu material tanpa adanya gayaluar yang bekerja ataupun perubahan temperatur pada material tersebut. Tegangan sisa muncul akibat beberapa proses pembentukan seperti deformasi plastis, perubahan temperatur dan transformasi fasa. Beberapa proses pembentukan yang menghasilkan tegangan sisa antara lain: *casting, forming, forging, drawing, extruding, rolling, spinning, bending, machining, welding, shot peening, quenching, carburizing, coating*, dll. Biasanya tegangan sisa dibedakan berdasarkan besar-kecilnya tegangan yang berada di sekitar butir material. Yang pertama disebut *macro stress* jika melewati beberapa butir. Jenis yang kedua adalah yang berada di sekitar batas butir, dan yang ketiga berada di dalam butir. Jenis kedua dan ketiga merupakan *micro stress*. Contoh tegangan sisa yang terjadi pada proses pengelasan dapat dilihat pada gambar 2.11 di bawah ini:

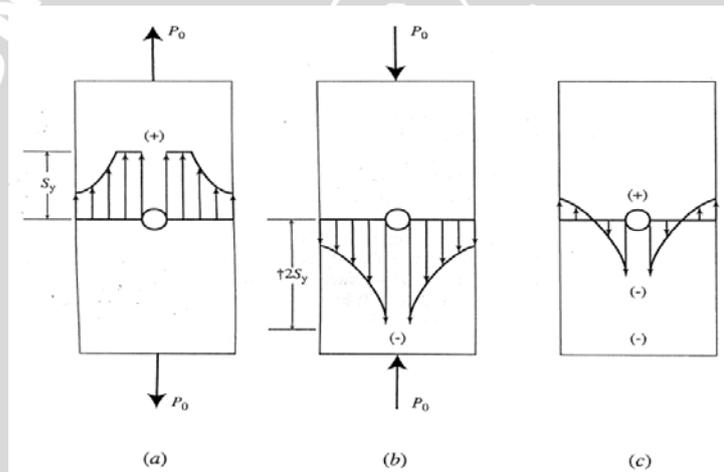


Gambar 2.11 Tegangan sisa pada proses pengelasan
 Sumber: Wijayanto, 2008:130

Tegangan sisa ini dapat merugikan tetapi juga dapat menguntungkan. Jika terdapat tegangan sisa tarik pada material yang mengalami beban tarik maka akan memberikan *resultante* positif dan jika melewati tegangan luluhnya akan menjadi awal mula terjadinya patahan, sebaliknya jika beban berupa tegangan tarik dan terdapat tegangan sisa tekan pada material maka tegangan sisa ini akan memberi *resultant* negatif mengurangi efek beban ke material.

Ada berbagai teknik yang digunakan dalam pembentukan tegangan sisa pada suatu struktur. Secara umum dibagi menjadi empat cara, yaitu cara mekanik, pelapisan, *thermal method*, dan proses permesinan. Cara tersebut hampir dipakai pada semua logam tinggal memilih cara apa yang paling cocok untuk suatu kondisi logam tertentu.

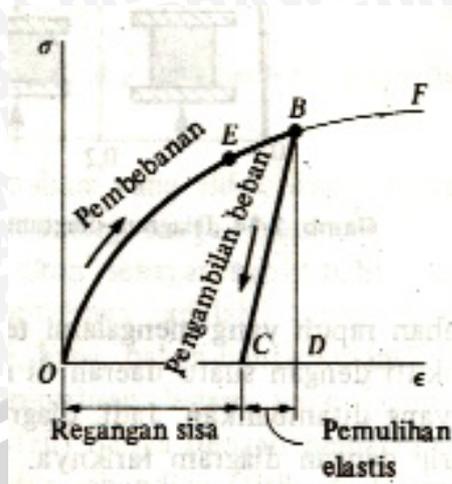
Contoh pembentukan *compressive residual stress* dengan cara mekanik, adalah *stretching*, yaitu dengan memberi beban pada material sampai terbentuk deformasi plastis pada daerah lokal. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 2.12 di bawah ini:



Gambar 2.12 Tegangan sisa yang terjadi pada pelat berlubang
Sumber: Stephens, 2001:248

Gambar tersebut adalah *stretching (tensile overload)* dari sebuah pelat berlubang. Dengan mengasumsikan material pelat *elastic-perfectly plastic* pada gambar (a) dapat dilihat distribusi tegangan yang terjadi pada saat pembebanan dilakukan, karena ada perubahan penampang maka pada daerah sekitar lubang akan terjadi konsentrasi tegangan sehingga tegangan pada daerah sekitar lubang menjadi besar dan terjadi deformasi plastis. Pada gambar (b) beban pada pelat sudah dilepaskan sehingga ada *reyielding* dari material yang tidak mengalami deformasi plastis. Gambar (c) adalah hasil distribusi tegangan sisa pada pelat tersebut.

Pada diagram tegangan-regangan, regangan sisa dapat dilihat pada pada gambar 2.13 berikut ini:



Gambar 2.13 Regangan sisa pada diagram tegangan-regangan
 Sumber: Timoshenko, 1986: 16

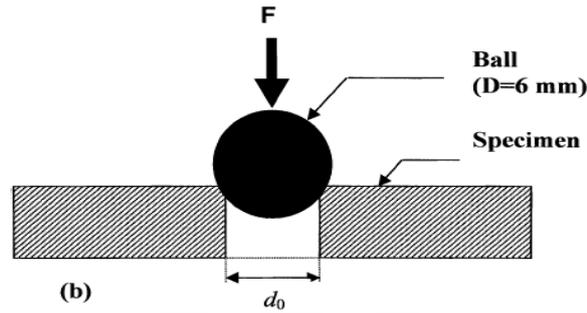
pada gambar tersebut suatu material dibebani melebihi tegangan luluhnya sehingga terjadi deformasi plastis. Oleh karena itu ketika pembebanan pada material tersebut dihilangkan maka deformasi plastis yang terjadi pada material tidak ikut hilang.

Tegangan sisa secara umum dapat dicari dengan berbagai cara, diantaranya cara analitis, pendekatan elemen hingga dan cara experimental. Untuk cara analitis hanya dipakai untuk kasus-kasus yang sederhana seperti pada proses *stretching*, untuk proses permesinan, termal, dan pelapisan cara analitis akan sangat kompleks dan terbatas dalam penggunaannya. Sedangkan cara experimental sudah banyak berbagai macam metode yang digunakan diantaranya *the hole-drilling method*, yaitu dengan menekan bola logam, biasanya dengan penetrasi sebesar 1,5mm sampai 3mm. Pada platnya dipasang *strain gage* pada arah tiga sumbu utamanya. Dari hasil pengukuran *strain gage* tersebut tegangan sisa yang terbentuk dianalisa.

2.5 Cold Expansion Hole

Cold expansion hole adalah salah satu teknik yang digunakan untuk menghasilkan *compressive residual stress* pada permukaan lubang sambungan pada pelat. Sebuah bola baja dengan kekuatan tinggi akan ditekan pada pelat sampai pelat tersebut mengalami deformasi plastis lokal pada permukaannya sehingga akan terjadi tegangan sisa tekan pada saat pembebanan dilepaskan. Tegangan sisa tersebut akan terbentuk karena proses *reyielding* dari material yang tidak mengalami deformasi plastis.

Skema proses *Cold expansion hole* dapat dilihat pada gambar 2.14 di bawah ini:



Gambar 2.14 Mekanisme *Cold Expansion Hole*
 Sumber: R. Ghfiri, 2000:913

Pada proses *Cold expansion hole* tersebut akan tercipta daerah yang dinamakan *Cold Expansion Affected Zone (CEAZ)*, yaitu dimana daerah yang paling terpengaruh akibat proses *Cold expansion hole*. Daerah tersebut terjadi deformasi plastis dan terdapat *compressive residual stress*. Besarnya CEAZ dipengaruhi oleh *mechanical properties* material yang digunakan dan *Degree of Cold Expansion (DCE%)* yang besarnya dirumuskan sebagai berikut:

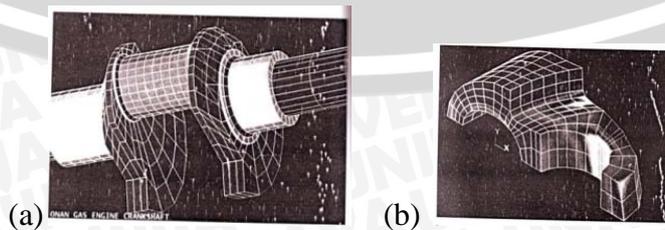
$$DCE\% = [(D-d_0)/d_0] \times 100\% \quad (20)$$

Dimana : D adalah diameter bola (mm)

D_0 adalah diameter lubang sebelum *Cold expansion hole* (mm)

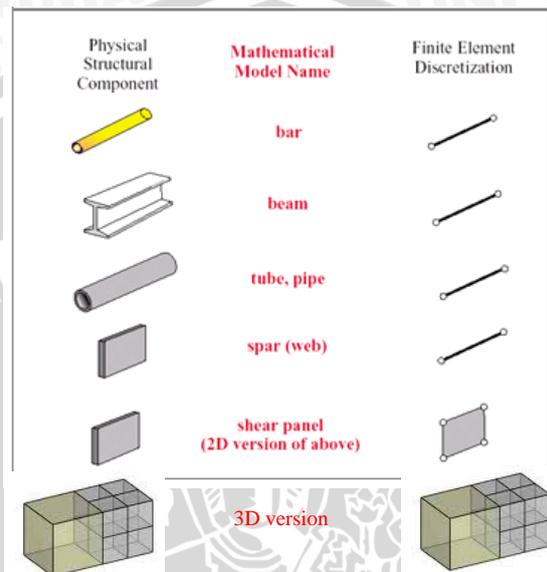
2.6 Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method*)

Berkembangnya metode numerik yang didukung oleh kemampuan komputasi ternyata makin menjadi alternatif dalam menyelesaikan kasus-kasus *engineering*. Salah satunya adalah metode elemen hingga yang merupakan solusi numerik dengan proses diskretisasinya, yaitu membagi struktur menjadi elemen-elemen kecil yang memiliki geometri yang lebih sederhana dengan jumlah yang masih berhingga. Metode ini digunakan terutama untuk penyelesaian yang menyangkut dimensi benda yang tidak teratur dan pembebanan kompleks. Tujuan utama penggunaan metode ini adalah untuk memperoleh nilai pendekatan tegangan dan perpindahan yang terjadi pada suatu struktur.



Gambar 2.15 (a) *Gas engine crankshaft*, (b) *joy swivel link*
 Sumber :Zahavi, 1992

Pemakaian Metode Elemen Hingga (MEH) selama ini antara lain untuk menganalisa struktur, yang berada pada pengaruh pembebanan (gaya maupun tekanan), gradien temperatur yang akan memberikan akibat berupa deformasi, tegangan maupun perubahan temperatur yang dialami oleh struktur tersebut. Tujuan utama dari analisa ini adalah untuk memperoleh nilai pendekatan tegangan dan perpindahan yang terjadi pada struktur tersebut.



Gambar 2.16 Diskretisasi Elemen

Sumber : Modul ANSYS 2009, Studio Perancangan dan Rekayasa Sistem

Prosedur perhitungan dengan Metode Elemen Hingga (MEH)

1. Diskretisasi dan pemilihan elemen

Proses ini adalah proses pembagian struktur menjadi elemen-elemen kecil yang lebih sederhana yang dihubungkan pada titik simpul (*node*), kemudian dilakukan pemilihan elemen seperti model awal dari struktur. Hal ini dilakukan untuk mempermudah analisa.

2. Memilih fungsi pendekatan

Variasi perpindahan pada suatu elemen didekati dengan fungsi interpolasi yang didasarkan pada harga simpul yang mengitari. Fungsi yang paling umum digunakan adalah polinomial. Pendekatan dengan fungsi interpolasi ini disebabkan karena sulitnya mencari jawaban tertutup sehingga dipilih suatu bentuk jawaban, yaitu distribusi perpindahan yang merupakan besaran yang tidak diketahui dengan memakai fungsi yang harus memenuhi hukum, prinsip dan syarat batas yang menjadi sifat persoalan yang ada.

3. Menurunkan persamaan matrik kekakuan [k]

Dengan prinsip usaha virtual akan dihasilkan persamaan matrik kekakuan elemen yang dinyatakan sebagai berikut :

$$[k] = \int [B]^T [C] [B] dV \quad (21)$$

dimana:

- [k] : matrik kekakuan elemen
- [B] : matrik konstitutive hubungan regangan dan perpindahan
- [C] : matrik konstitutive hubungan tegangan dan regangan material

Adapun matrik B untuk elemen tetrahedral adalah sebagai berikut :

$$B_1 = \begin{bmatrix} f_{i,x} & 0 & 0 \\ 0 & f_{i,y} & 0 \\ 0 & 0 & f_{i,z} \\ f_{i,y} & f_{i,x} & 0 \\ 0 & f_{i,z} & f_{i,y} \\ f_{i,z} & 0 & f_{i,x} \end{bmatrix}$$

4. Menghitung matrik beban total

Beban yang bekerja didefinisikan menjadi 3 macam, sehingga beban total adalah :

$$R = Q_{NF} + Q_{BF} + Q_T \quad (22)$$

dimana:

- Q_{NF} : beban pada konsentrasi nodal
- Q_{BF} : beban *body force* (akibat beban sendiri)
- Q_T : beban traksi (*surface traction*)

5. Merakit elemen menjadi struktur

Perakitan persamaan elemen akan dibawa ke bentuk persamaan global, yang prosesnya harus memenuhi sifat konvergen dan sifat sinambung. Salah satunya antara lain : titik-titik yang semula bersebelahan harus tetap bersebelahan satu sama lain setelah elemen dikenai beban. Bentuk persamaan global elemen yaitu :

$$[K] \{q\} = \{R\} \quad (23)$$

dimana:

- [K] : matrik kekakuan elemen.
- {q} : vektor perpindahan simpul.
- {R} : matrik beban total.

Setelah matrik kekakuan global diperoleh dan syarat-syarat batasnya dimasukkan maka perpindahan simpul (q) dapat dicari. Suatu syarat batas memberikan informasi bagaimana struktur ditopang dalam ruang, dengan memasukkan nilai perpindahan yang telah ditetapkan sesuai kondisi pada struktur.

6. Mendapatkan perpindahan global

Persamaan global yang telah mendapatkan syarat batas, merupakan sekumpulan persamaan linier yang secara umum dapat ditulis sebagai berikut :

$$k_{1,1} q_1 + k_{1,2} q_2 + \dots + k_{1,n} q_n = R_1 \quad (24)$$

$$k_{2,1} q_1 + k_{2,2} q_2 + \dots + k_{2,n} q_n = R_2$$

.....

$$k_{n,1} q_1 + k_{n,2} q_2 + \dots + k_{n,n} q_n = R_n$$

Persamaan di atas akan diselesaikan dengan cara eliminasi Gauss untuk mendapatkan besaran-besaran primer yaitu $q_1, q_2, q_3, \dots, q_n$.

7. Mendapatkan besaran sekunder dan interpretasi hasil

Dari besaran pertamanya yang berupa perpindahan, dapat dicari besaran sekunder yang dapat berupa tegangan maupun regangan, dengan menggunakan hubungan antara keduanya. Hubungan tegangan-regangan pada kondisi 3D dapat dinyatakan dalam bentuk matrik sebagai berikut :

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} \quad (25)$$

Hubungan tersebut dapat ditulis dalam bentuk simbol berikut :

$$\{\sigma\} = [C] \{\epsilon\}$$

Hubungan regangan dengan perpindahan adalah :

$$\{\epsilon\} = [B] \{d\}$$

Sehingga tegangan dapat dirumuskan sebagai :

$$\{\sigma\} = [C] [B] \{d\}$$

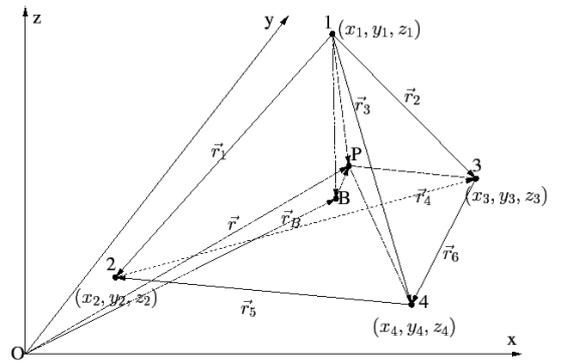
Hasil akhir dari perhitungan dengan metode elemen hingga ini berupa harga distribusi tegangan yang akan diplot di sepanjang struktur untuk dianalisis sesuai dengan rumusan masalah yang ada.

Analisa elemen hingga pada dasarnya dikembangkan untuk kondisi 2-D (*plane stress*). Struktur 3-D menyebabkan penambahan persamaan berganda dalam jumlah besar, tetapi dengan menggunakan elemen dengan orde lebih tinggi dan komputer yang lebih cepat, maka masalah tersebut dapat diatasi oleh metode elemen hingga.

Macam – macam bentuk Elemen solid 3-D pada Elemen Hingga:

1. Elemen *Tetrahedral*

Elemen *tetrahedral* didefinisikan dalam tiga sumbu koordinat, x, y, z , sehingga memiliki tiga komponen perpindahan yaitu u, v, w . Skema elemen *tetrahedral* dalam sumbu koordinat dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 2.17 Elemen *Tetrahedral*

Sumber : A. Nentchev. *Numerical Analysis and Simulation in Microelectronics by Vector Finite Elements*

Untuk mendapatkan volume *tetrahedral*, V , maka dengan menggunakan fungsi determinan dari matriks *tetrahedral*.

$$6V = \det \begin{vmatrix} 1 & x_i & y_i & z_i \\ 1 & x_j & y_j & z_j \\ 1 & x_m & y_m & z_m \\ 1 & x_p & y_p & z_p \end{vmatrix} \quad (26)$$

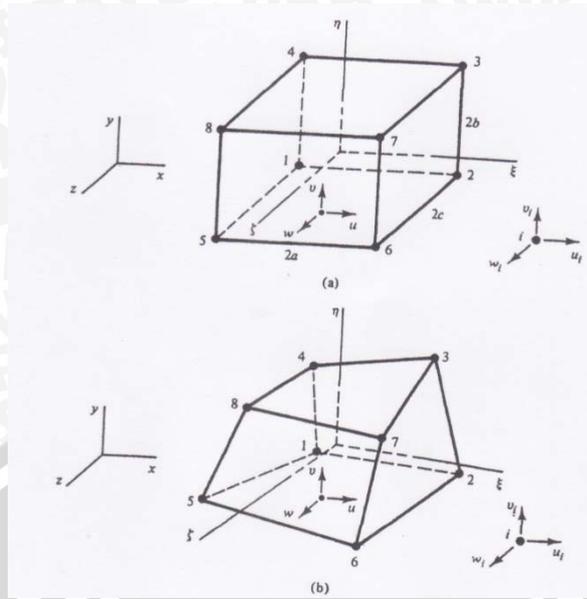
Persamaan di atas akan menghasilkan nilai dari volume *tetrahedral*. Persamaan di atas juga akan diselesaikan dengan menggunakan kofaktor dari determinan matriks tersebut, sehingga diperoleh nilai dari a_i, b_i, c_i, d_i sebagai komponen untuk memperoleh besarnya perpindahan dengan menggunakan persamaan :

$$N_i = \frac{a_i + b_i x + c_i y + d_i z}{6V} \quad (27)$$

Dengan menggunakan persamaan tersebut, akan diperoleh besarnya perpindahan sebagai besaran primer. Hasil akhir dari perhitungan dengan metode elemen hingga ini berupa harga distribusi tegangan yang akan diplot di sepanjang struktur untuk dianalisis sesuai dengan rumusan masalah yang ada. (R.L. Taylor. 2000)

2. Elemen *Heksahedron*

Elemen *Heksahedron* didefinisikan dalam tiga sumbu koordinat, x, y, z sehingga memiliki tiga komponen perpindahan yaitu u, v, w . Skema elemen *Heksahedron* dalam sumbu koordinat dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 2.18 Elemen *Heksahedron* (a) Elemen Pejal Segiempat Induk. (b) Pasangan Isoparametriknya

Sumber: Elemen Hingga Untuk Analisa Struktur, 1989

Hubungan antara regangan - peralihan dapat lebih disederhanakan menjadi:

$$\epsilon_t = B_i q_i \quad (i = 1, 2, \dots, 8) \tag{28}$$

Dimana :

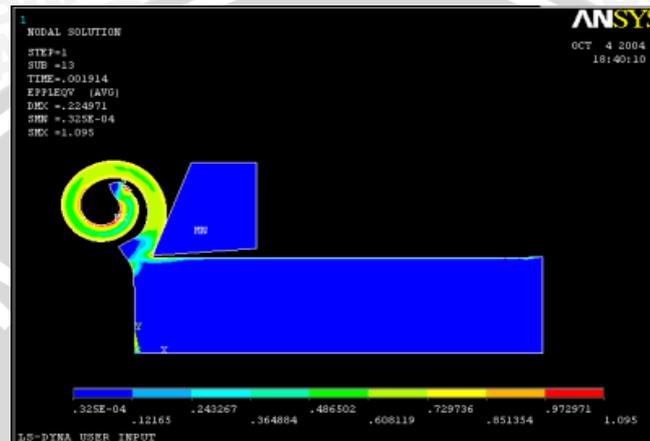
Sehingga dari hubungan antara regangan dan peralihan dapat dieliminasi sehingga akan mendapatkan tegangan dan regangan dalam metode elemen hingga.

Analisis proses *Cold expansion holedengan* menggunakan metode elemen hingga termasuk dalam jenis analisis geometri *nonlinier*. Analisis ini melibatkan perpindahan, tegangan, dan rotasi yang besar pada elemen dengan tujuan akhir adalah menentukan posisi ekuilibrium dan konfigurasi dari elemen. Rumusan dasar yang digunakan adalah formulasi Lagrangian dengan menentukan prinsip usaha virtual.

2.7 Software ANSYS

ANSYS merupakan salah satu *software* yang berbasiskan FEA (*Finite Elemen Analysis*). Dalam modul “ANSYS Klasik” buatan Studio Perancangan dan Rekayasa disebutkan bahwa ANSYS mempunyai kelebihan kemampuan untuk mendiskritisasi

model dengan sangat halus, mampu bekerja elemen lebih banyak dan menghasilkan output dengan ketelitian yang tinggi. ANSYS dapat digunakan untuk menganalisis masalah-masalah dalam bidang *disciplines engineering*, seperti analisis struktural, analisis thermal, analisis listrik, analisis magnetis, dan analisis fluida. Gambar 2.12 di bawah merupakan contoh penggunaan *software ANSYS* pada salah satu bidang *engineering*. Dapat dilihat pada gambar 2.19 merupakan hasil simulasi proses pembubutan dan juga tegangan yang terjadi pada proses tersebut.



Gambar 2.19 Simulasi proses pembubutan dengan *Software ANSYS*

Sumber: Modul Ansys, 2009:6

Secara umum langkah-langkah analisis dengan menggunakan *software ANSYS* dibagi menjadi tiga proses, yaitu *Preprocessing* (Proses awal), *Solution* (Proses solusi) dan *Postprocessing* (Proses pembacaan hasil).

Dalam tahap *Preprocessing* (Proses awal) ada tahap-tahap penting yang harus dilakukan yaitu, permodelan geometri. Pada permodelan geometri dilakukan proses modeling geometri baik 1D, 2D maupun 3D. Pembuatan model geometri dari benda kerja dapat juga dilakukan dengan *software CAD* yang nantinya diekspor ke dalam ANSYS. Yang kedua adalah pemilihan tipe elemen, elemen disini digunakan untuk mendiskritisasikan model yang telah dibuat tadi. Pada *Software ANSYS* ada berbagai macam model elemen yang diberikan, misalnya elemen *3D solid* untuk analisis material 3 dimensi *solid* dan *beam elemen* untuk analisis material *beam*. Yang ketiga adalah input material properties, pada tahap ini data-data material (*material properties*) akan diinputkan, misalnya *poisson ratio*, tegangan luluh, dan *strain hardening* tergantung dari permodelan material yang kita gunakan. Dan tahap yang terakhir pada proses *Preprocessing* adalah proses *meshing*, yaitu proses pembagian struktur menjadi elemen-elemen kecil/elemen diskrit, dalam ANSYS berbagai macam bentuk *meshing* dapat ditentukan diantaranya bentuk tetrahedral untuk material solid 3D.

Tahap penting kedua pada analisis tegangan dengan *software* ANSYS adalah *Solution* (Proses Solusi). Proses-proses yang ada dalam proses solusi yang pertama adalah mendefinisikan jenis analisis solusi yang dipakai (*Analysis Type*). Yang kedua adalah memasukkan kondisi batas (*constrain*). Yang ketiga adalah menerapkan pembebanan, pada proses ini permodelan pembebanan dilakukan dan menentukan *fixed support*. Dan yang terakhir adalah proses penyelesaian (*Solving*).

Setelah tahap penting pertama dan kedua sudah dilaksanakan maka tahap penting terakhir adalah *General Postprocessing* (Proses Pembacaan Hasil). Hasil analisis dapat diperoleh dengan *read result* pada menu *General Postprocessing*. Hasil dari proses solusi dapat ditampilkan dalam bentuk *plot result*, *list result* maupun animasi. *Plot result*, dengan menggunakan *plot result* (biasanya *contour plot*) akan tampak distribusi tegangan atau variabel lain pada model sehingga mudah dalam menginterpretasikan informasi yang diperoleh. Pada penyajian dengan *plot result* hasil perhitungan akan digambarkan dengan sebaran warna yang terdapat pada model yang menunjukkan besarnya tegangan atau besaran-besaran lain yang sudah dihitung. Hasil penyajian yang kedua adalah *list result*, hasil analisis dapat juga disajikan dalam bentuk *list result* yang biasanya berupa tabel yang memberikan informasi secara detil nilai perpindahan, tegangan dan regangan yang terjadi pada tiap node maupun elemennya. Dan untuk penyajian dalam bentuk animasi, hasil analisa yang diperoleh akan ditampilkan secara lengkap dari proses awal hingga proses terakhir dalam waktu tertentu yang biasanya disebut juga simulasi.

2.8 Hipotesa

Dengan adanya proses *Cold expansion hole* maka akan terjadi tegangan sisa tekan (*Compressive Residual Stress*) pada daerah sekitar lubang sambungan, sehingga tegangan tarik akibat proses pembebanan akan berkurang oleh tegangan sisa tekan tersebut. Maka pada saat pembebanan dilakukan, tegangan yang terjadi pada plat yang mengalami proses *Cold expansion hole* di daerah sekitar lubang sambungan akan lebih kecil dari pada pelat yang tidak mengalami proses *Cold expansion hole*.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan simulasi, yaitu melakukan studi literatur untuk mencari hubungan sebab akibat dalam suatu proses melalui pengumpulan data dari berbagai sumber, kemudian data tersebut diolah dalam simulasi yang menggunakan *software* berbasis elemen hingga. *Software* yang dipakai dalam penelitian ini adalah ANSYS 13.0. Sehingga distribusi tegangan sisa akibat proses *Cold Expansion Holedan* distribusi tegangan yang terjadi setelah dilakukan pembebanan pada daerah sekitar lubang sambungan dapat diketahui.

3.2 Variabel Penelitian

Variabel yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Variabel bebas (*independent variabel*) adalah variabel yang besarnya ditentukan oleh peneliti dan harganya diubah-ubah dengan metode tertentu untuk mendapatkan nilai variabel terikat dari obyek yang diteliti sehingga diperoleh hubungan antara keduanya. Variabel bebas yang digunakan pada penelitian ini adalah diameter pasak (D_e), meliputi: 9,02 mm, 9,06 mm, 9,1 mm, 9,2 mm, dan 9,6 mm.
2. Variabel terikat (*dependent variabel*) adalah variabel yang nilainya tergantung dari variabel bebas dan besarnya diketahui setelah penelitian dilakukan. Variabel terikat yang diamati pada penelitian ini adalah distribusi tegangan sisa yang terjadi akibat proses *Cold expansion hole* dan distribusi tegangan sekitar lubang sambungan setelah pembebanan dilakukan.
3. Variabel terkontrol yaitu variabel yang nilainya dijaga konstan selama penelitian dilakukan. Variabel terkontrol yang digunakan pada penelitian ini adalah material spesimen yang digunakan AL 2024, tebal plat 5 mm dan kecepatan pasak dalam menembus pelat, yaitu 90 mm/s.

3.3 Data Material dan Dimensi

Material plat yang digunakan dalam penelitian ini adalah AL2024. AL 2024 adalah salah satu logam paduan dari aluminium yang sangat sulit untuk dilas dalam proses penyambungannya sehingga bila dipakai dalam berbagai struktur maka dalam perakittannya menggunakan menggunakan lubang sambungan, sebagai contoh pemakaian logam ini adalah struktur pesawat terbang. Pada penelitian ini material

AL2024 dimodelkan sesuai *Stienberg Guinan Strength* dengan *material properties* seperti pada tabel 3.1 berikut ini:

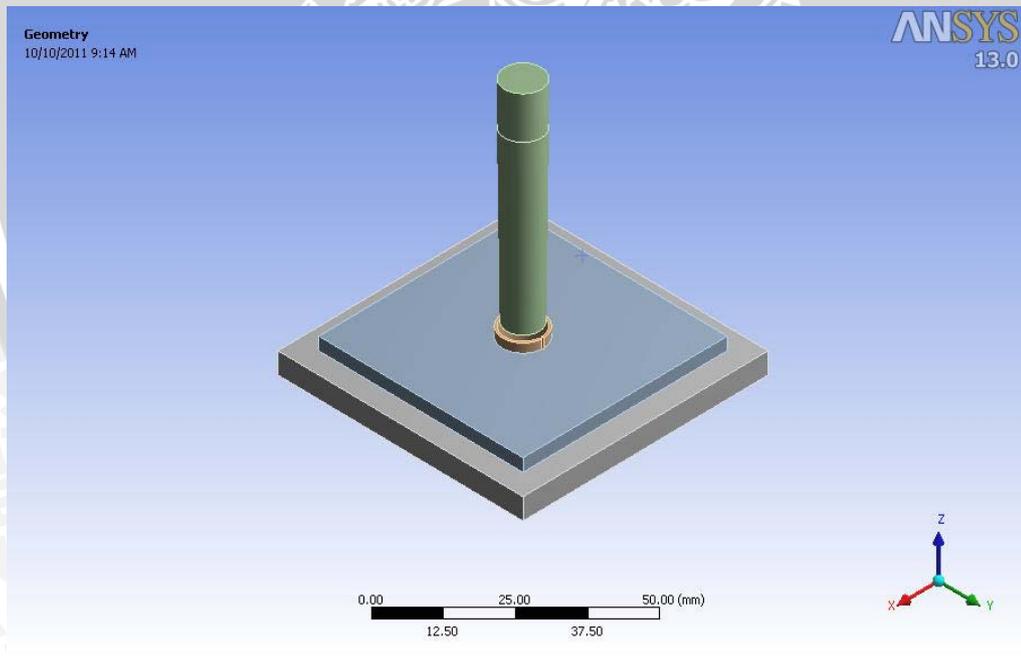
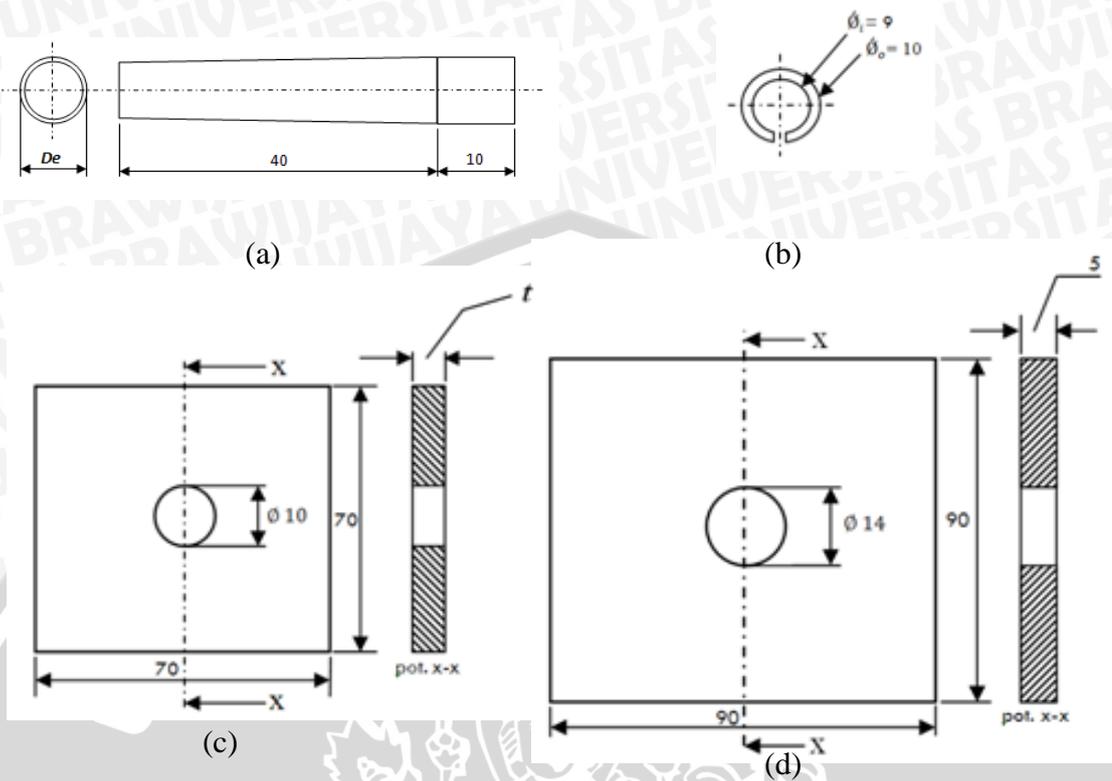
Tabel 3.1 *Material Properties*

<i>Properties</i>	Besar
<i>Density</i> ($\times 1000 \text{ kg/m}^3$)	2,785
<i>Poisson's Ratio</i>	0,33
<i>Shear Modulus</i> (GPa)	28,6
<i>Maximum Tensile Strength</i> (Mpa)	760
<i>Initial Yield Strength</i> (Mpa)	260
<i>Hardening Constanta</i>	310
<i>Hardening Exponent</i>	0,185
<i>Derivatif DG/DT</i> (Pa/C)	3,50e7
<i>Derivatif DY/DP</i>	0,0079
<i>Gruneisen Coefisien</i>	2
<i>Specific Heat</i> (J/kg-K)	863

Sedangkan untuk *mandrel* dan *fixed support* permodelan material yang digunakan adalah *struktural steel* yang dianggap *rigid body*, sehingga tidak akan terjadi deformasi pada saat proses *Cold Expansion Hole* dilakukan.

Ada 4 komponen yang digunakan dalam penelitian ini, yaitu:

- Mandrel, mandrel berbentuk tabung ber-*tapper* dengan dimensi diameter bawah 8mm, tinggi 50 mm dan diameter atas (*De*) yang bervariasi mulai dari 9,02; 9,06; 9,1; 9,2 dan 9,6 mm.
- Cincin (*ring*), cincin berfungsi untuk mencegah rusaknya plat yang dikarenakan gesekan pasak. Diameter dalam 9 mm dan diameter luarnya 10 mm serta tingginya 7 mm.
- Plat, plat dimodelkan sebagai AL 2024 dengan bentuk kotak balok dengan panjang 70 mm, lebar 70 mm dan tebal 5 mm. Plat tersebut diberi lubang di tengah-tengahnya dengan diameter 10 mm.
- Tumpuan (*fixed Support*), tumpuan berbentuk balok dengan ukuran panjang 90 mm, lebar 90 mm dan tebal 5 mm, serta dilubangi bagian tengahnya dengan diameter 14 mm. Tumpuan diletakkan dibawah plat, untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar di bawah ini:



Gambar 3.1 Permodelan dimensi dan bentuk (a) Mandrel, (b) Ring, (c) Plat, (d)

Fixed Support

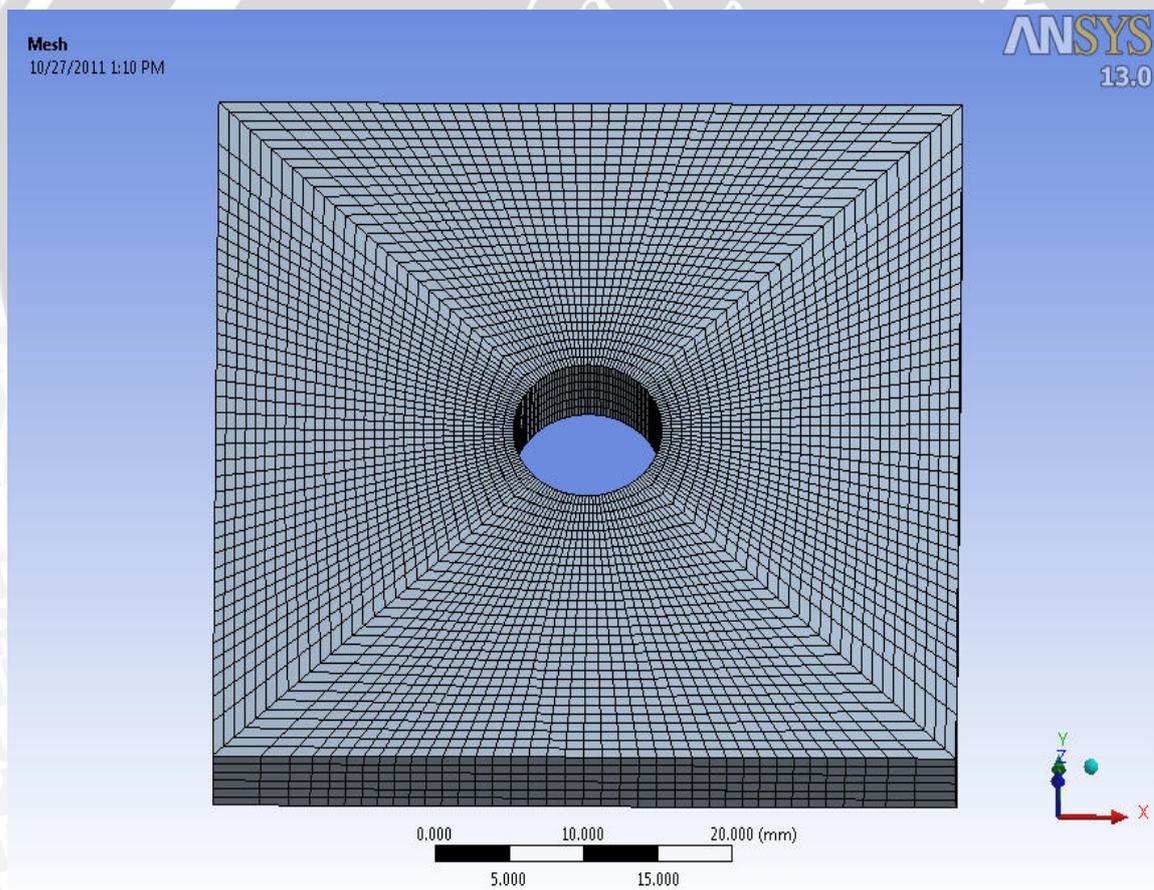
3.4 Meshing

Meshing adalah proses membagi benda kerja menjadi elemen-elemen kecil. Semakin kecil elemen yang dibentuk semakin besar pula persamaan yang harus di



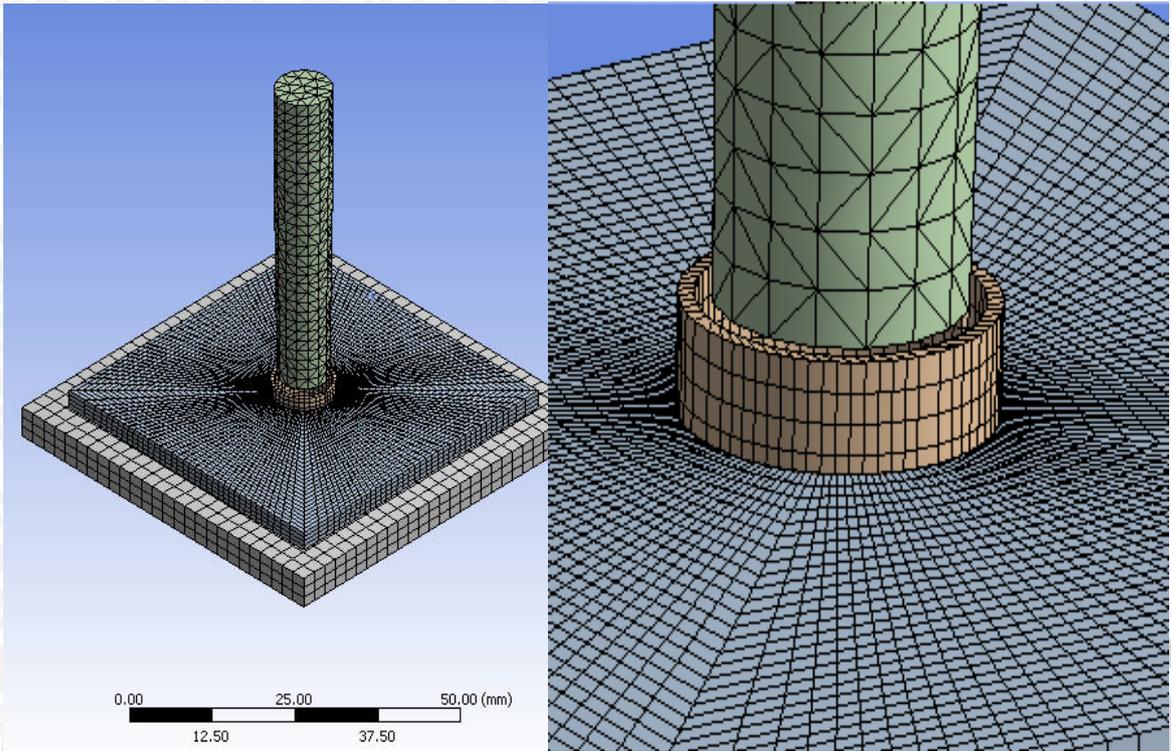
selesaikan oleh *software* sehingga beban komputer akan semakin besar namun nantinya hasil yang akan diperoleh juga semakin akurat. Pada *software* ANSYS 13 ini *meshing* dapat dilakukan dengan dua cara, yaitu manual dan otomatis. Cara manual yaitu user akan mendiskritisasi banyaknya elemen yang akan terbentuk dengan memasukkan tipe, ukuran dan jumlah elemen sesuai dengan yang dikehendaki. Sedangkan cara otomatis tipe elemen, ukuran dan jumlah elemen yang terbentuk secara otomatis ANSYS akan menentukan sendiri tergantung dari permodelan benda kerja yang kita gambar dan penyelesaian apa yang kita pakai.

Untuk simulasi pembebanan jumlah node yang terbentuk adalah 125330 node dan elemen yang terbentuk adalah 27180 elemen. Sedangkan untuk proses simulasi *Cold expansion hole* jumlah node yang terbentuk adalah 37985 node dan elemen yang terbentuk adalah 32550 elemen. Untuk lebih jelas tentang *meshing* pada plat pada proses pembebanan dapat dilihat pada gambar 3.2 berikut ini:



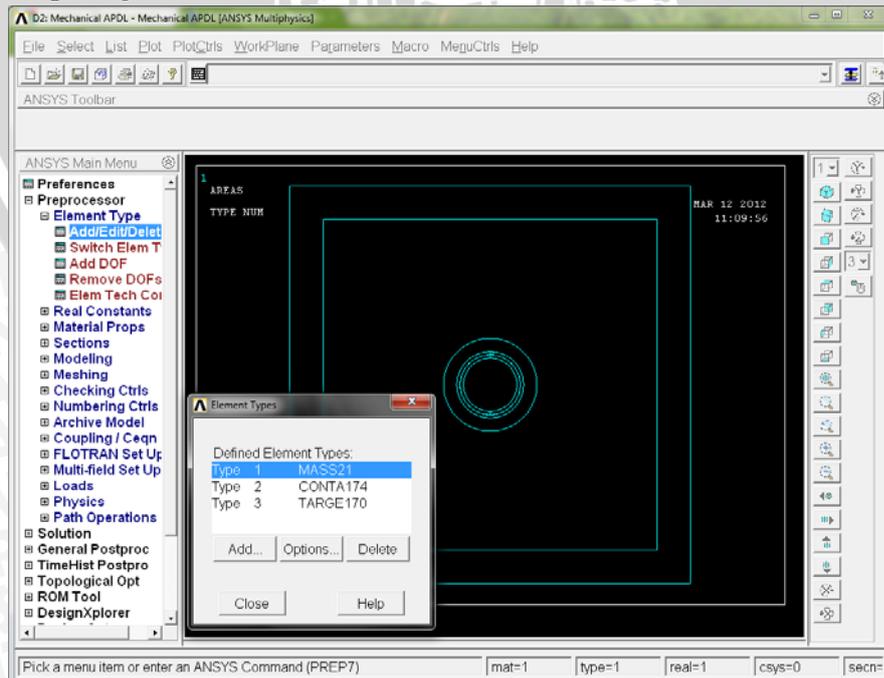
Gambar 3.2 *Meshing* Pembebanan

Sedangkan pada proses *Cold Expansion Hole* hasil meshingnya adalah sebagai berikut:



Gambar 3.3 Meshing Cold expansion hole

Dalam penelitian ini digunakan ANSYS 13 Workbench, sehingga untuk mengetahui tipe elemen yang digunakan harus dibawa (permodelan model di *export*) dulu ke Mechanical APDL. Dari Mechanical APDL ini permodelan akan dibuka lagi dengan ANSYS CLASSIC, dengan cara ini tipe elemen dapat diketahui dengan membuka main menu, Preprocessor, kemudian tipe elemen pada menu ANSYS CLASSIC. Seperti gambar berikut ini:



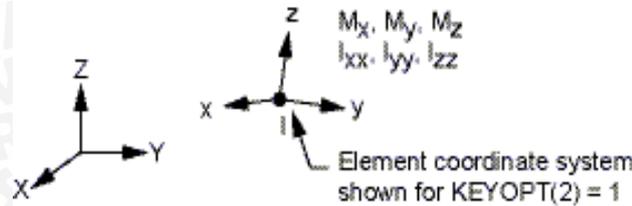
Gambar 3.4 Melihat tipe Elemen pada ANSYS CLASSIC



Elemen yang digunakan pada penelitian ini pada dasarnya ada 2 macam yaitu:

1. Elemen penyusun solid

Elemen solid yang digunakan adalah MASS21, elemen ini mempunyai 6 Degree Of Freedom (DOF), yaitu translasi X, Y, Z dan rotasi pada sumbu X, Y, Z.



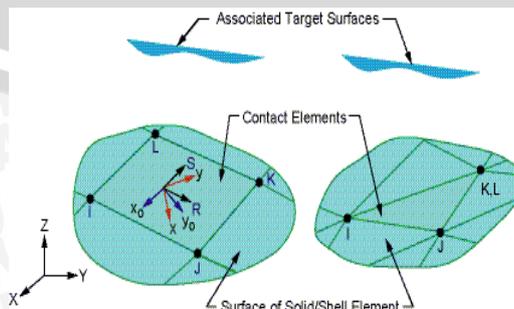
Gambar 3.5 Geometri MASS21

Sumber: Elemen Library ANSYS 13

Elemen ini didefinisikan sebuah node tunggal dengan massa yang terkonsentrasi pada arah sumbunya dan momen inersia terdapat sumbunya. Koordinat dari elemen ini bisa dimulai dari koordinat global ataupun koordinat lokal untuk node selanjutnya. Untuk analisa deformasi yang besar koordinat system pada elemen ini akan berotasi dengan koordinat nodal.

2. Elemen *contact*

Elemen *contact* yang digunakan adalah CONTA174 yang tergabung dengan TARGE170, elemen ini digunakan untuk mempresentasikan kontak dan sliding dari permukaan antara 2 obyek 3D dengan salah satu permukaan rigid dengan permukaan yang lainnya dapat terdeformasi. Elemen ini diaplikasikan pada *3D structural* dan pada suatu field *contact analyses*. Elemen ini terletak pada permukaan *3D solid* atau *shell element* dengan *midside node*. CONTA174 karakteristik geometrinya sama elemen awalnya. CONTA174 akan aktif bila terjadi penetrasi dari surface targe elemen, misalnya TARGE170. Pada elemen ini user juga dapat memasukkan parameter gesekan pada surface tersebut.



Gambar 3.6 CONTA174

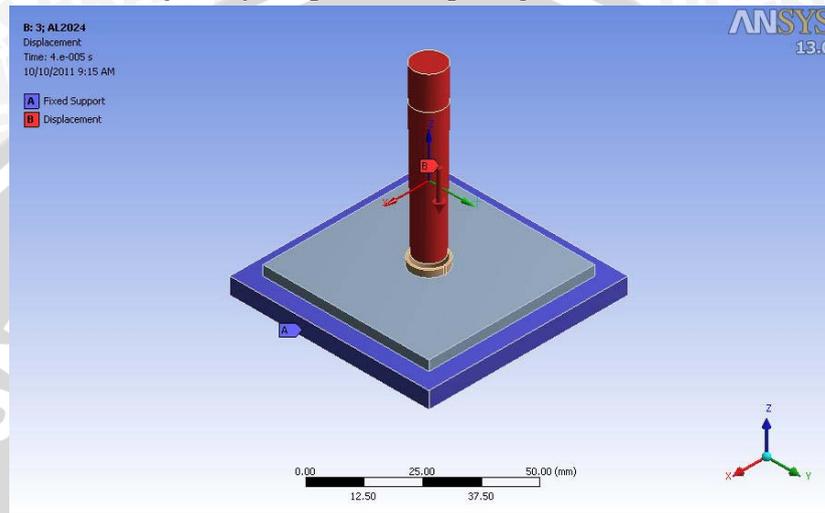
Sumber: Elemen Library ANSYS 13



3.5 Simulasi

3.5.1 Proses *Cold Expansion Hole*

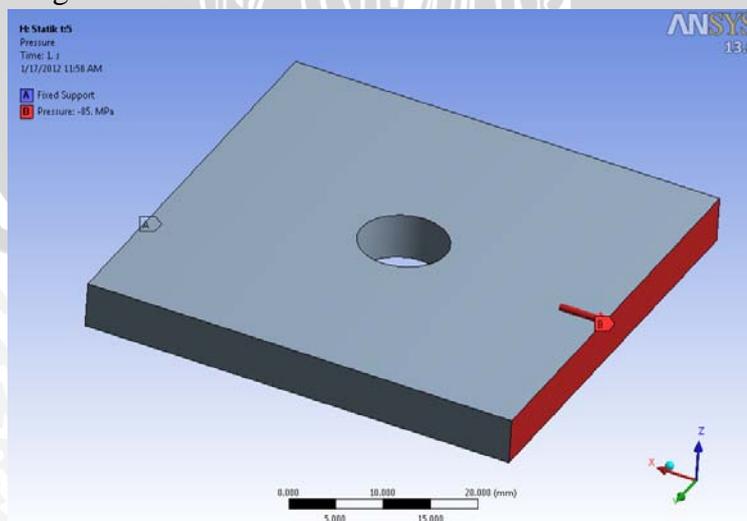
Tahap pertama dari simulasi pada penelitian ini adalah proses *Cold expansion hole*. Pada tahap ini *mandrel* digerakkan ke arah bawah sejauh 90 mm sampai menembus lubang di plat. Sedangkan *fixed support* yang digunakan adalah pelat yang terletak dibawah pelat utama, *fixed support* ini juga *rigid body* sama seperti pasak (*mandrel*). Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 3.7 di bawah ini:



Gambar 3.7 Simulasi *Cold Expansion Hole*

3.5.2 Pembebanan

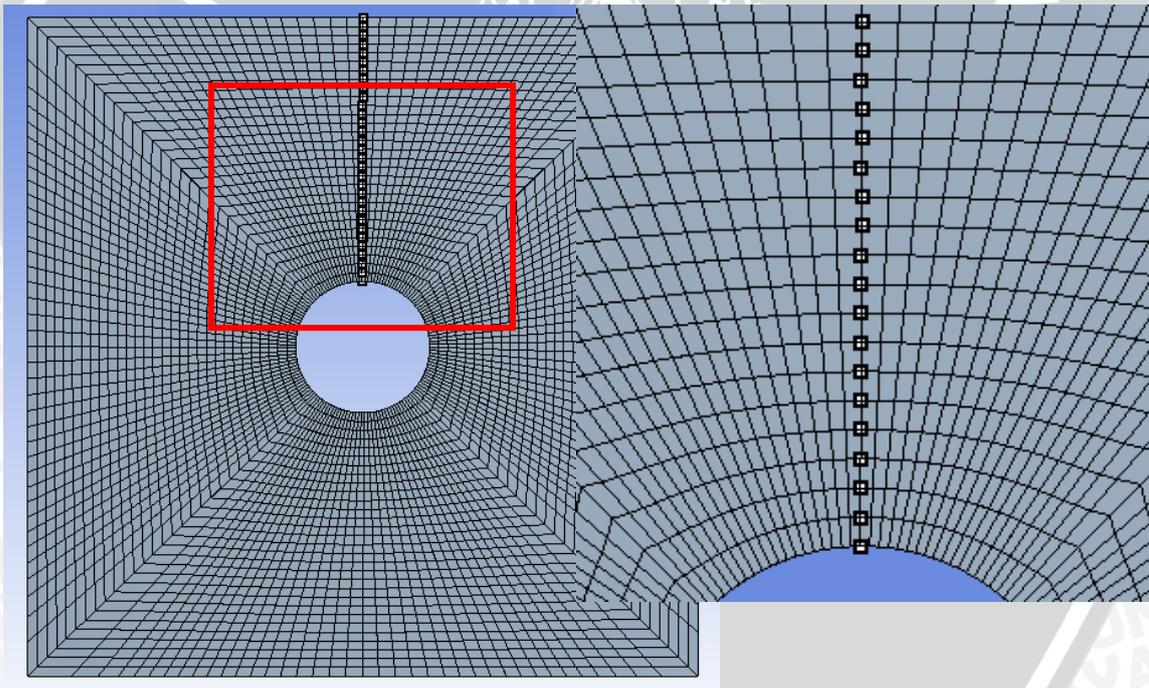
Pembebanan dilakukan dengan pemberian beban pada sisi samping pelat dan *fixed support* yang dipakai adalah sisi pelat yang lainnya. Besar beban yang diberikan sebesar 85 MPa, besar bebantegangan tarik ini kurang-lebih sepertiga dari *yield stress* material yang biasanya diaplikasikan pada kehidupan nyata. Untuk lebih detilnya dapat dilihat pada gambar 3.8 berikut ini:



Gambar 3.8 Simulasi Pembebanan

3.6 Superposisi dan Pengambilan titik Tegangan

Untuk mempermudah dalam analisa maka setelah distribusi tegangan akibat proses *Cold expansion hole* dan proses pembebanan diketahui, maka distribusi tegangan akan disuperposisikan sehingga dapat diketahui pula besar tegangan aplikatif yang dialami material (plat berlubang) saat dipakai. Selain itu tegangan hasil superposisi tadi akan diplot pada grafik sehingga akan mudah dalam menginterpretasikannya. Distribusi tegangan yang disuperposisikan adalah distribusi tegangan normal arah sumbu X. Untuk pengambilan titik tegangan (area distribusi tegangan) dibatasi hanya pada tengah pelat ke arah paralel sumbu Y positif (tegak lurus terhadap arah pembebanan). Pengambilan ini dimulai dari sisi lubang sambungan ke arah tegak lurus dari arah pembebanan sampai sisi terluar plat berlubang, karena pada daerah itu tegangan akibat pembebanan paling besar akan terjadi atau berpengaruh. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 3.9 berikut ini:



Gambar 3.9 Area pengambilan titik tegangan

Sedangkan prosesnya adalah dengan menentukan dahulu nilai tegangan pada tiap-tiap titik tersebut dengan *probe command* baik pada plat base murni maupun pada plat yang diexpandi. Kemudian nilai tegangan tersebut akan digabungkan (dijumlahkan) nilainya pada program *Microsoft Excel* sehingga dapat diketahui nilai tegangan akhir atau superposisi dari plat base murni dengan plat yang diexpandi dengan *Cold Expansion Hole*.

3.7 Tempat dan Waktu Penelitian

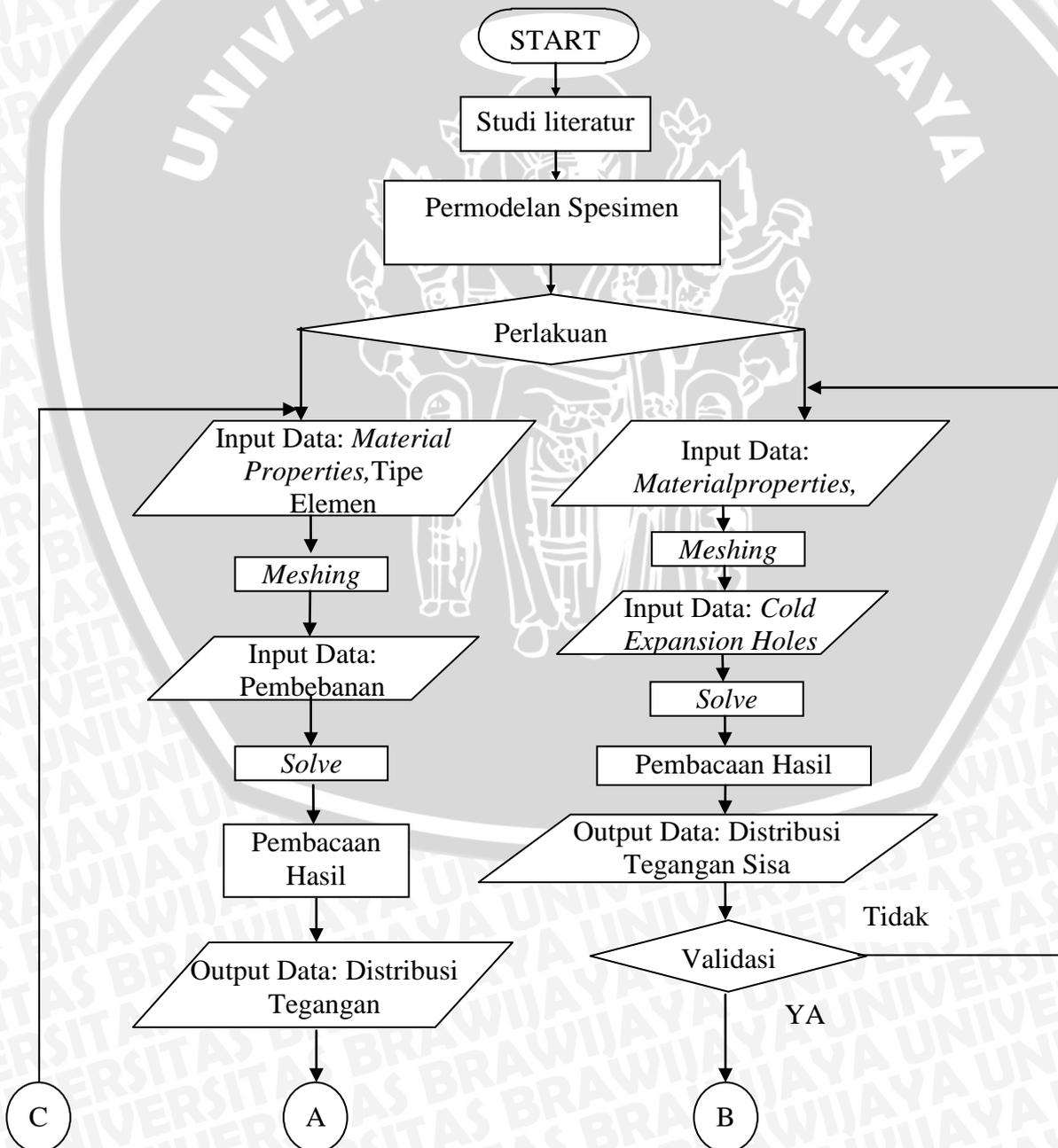
Penelitian ini dilakukan di Studio Perancangan dan Rekayasa Sistem Teknik Mesin Universitas Brawijaya dengan spesifikasi komputer sebagai berikut:

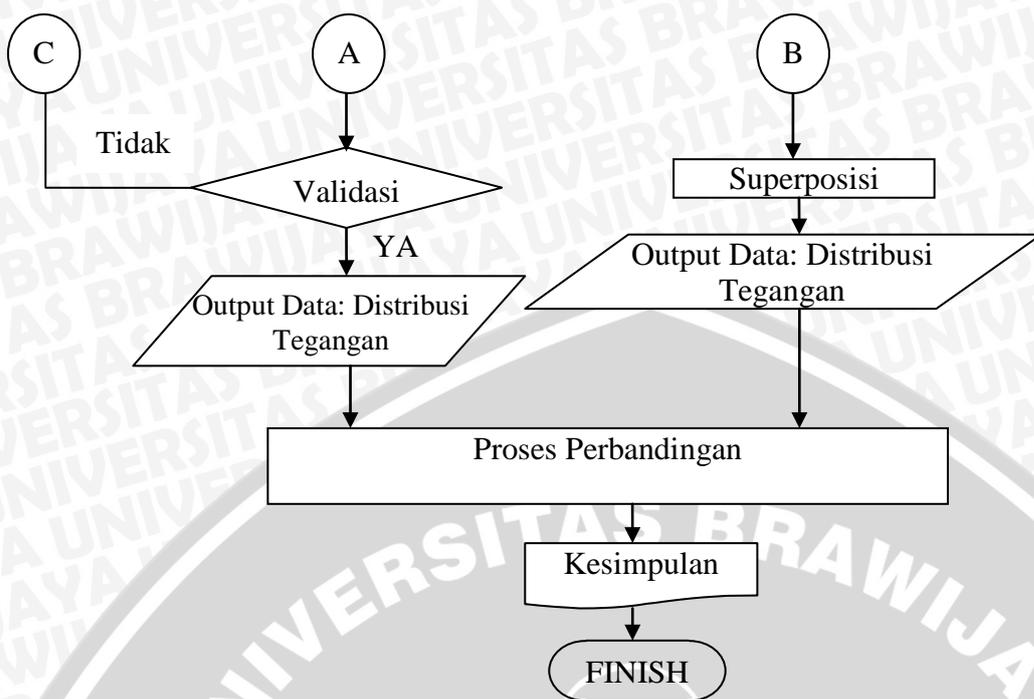
- *Processor* : AMD Athalon™ II X4 645 *processor* 3D 4CPU 3.1 Ghz
- *RAM* :2048 MB
- *Operating System* : Microsoft Windows XP Professional (5.1, Build 2600)
- *System Manufacturer* :ECS

Sedangkan waktu penelitian adalah bulan September sampai bulan Oktober 2011.

3.8 Diagram Alir Pelaksanaan Penelitian

Alur pemikiran yang dilakukan pada penelitian ini sesuai dengan diagram alir (*flow chart*) pelaksanaan penelitian sebagai berikut:



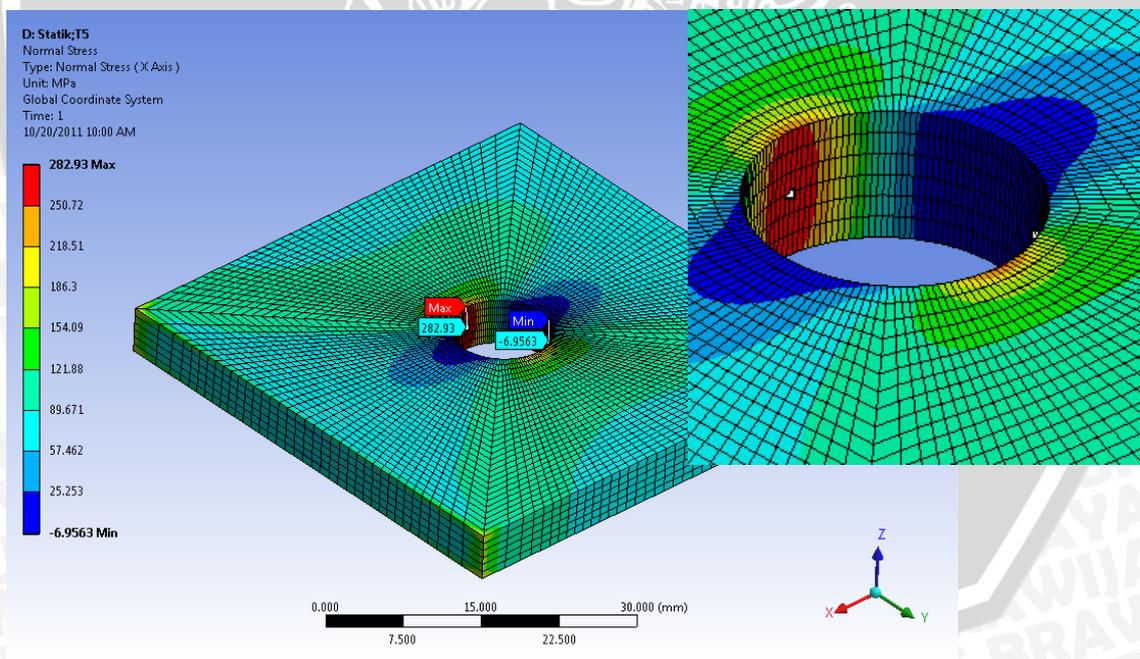


Gambar 3.10 Diagram Pelaksanaan Penelitian

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Simulasi Pembebanan

Gambar 4.1 menunjukkan *contour* distribusi tegangan pada plat berlubang dengan tebal 5 mm setelah dilakukan pembebanan tarik axial sebesar 85 MPa. 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 disisi lubang pada arah paralel sumbu Y (282,93 Mpa). Pada daerah inilah biasanya retak awal material (*fatigue crack initiation*) akan dimulai sehingga tegangan kearah 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 tekan pada plat yang dikenai beban tarik namun besarnya sangat kecil, sehingga dapat diabaikan dalam mendesain.



Gambar 4.1 *Contour* distribusi tegangan pada plat berlubang akibat pembebanan axial sumbu X

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

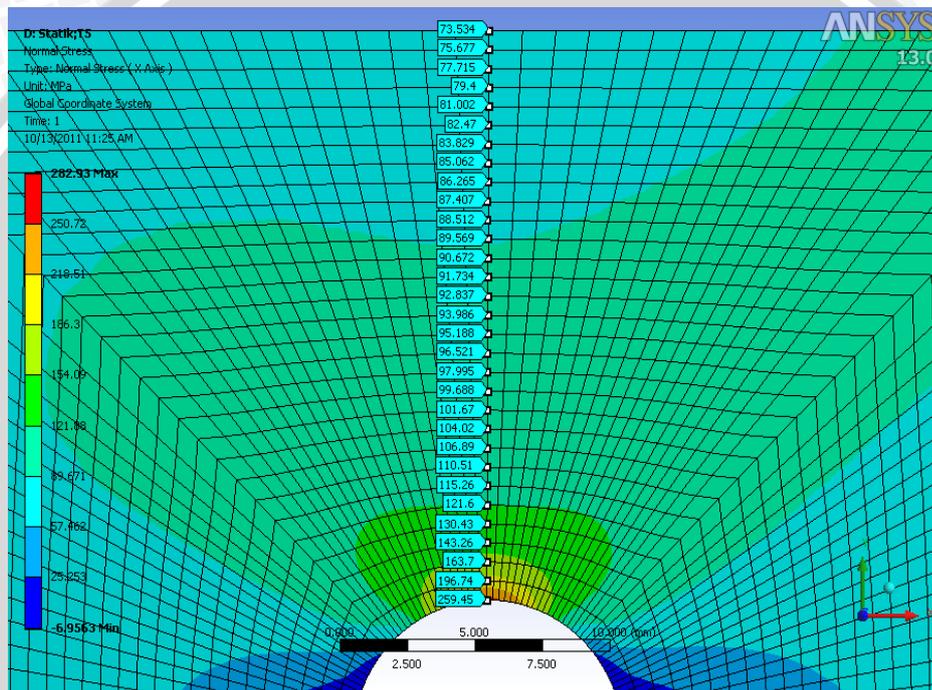
$$P = \sigma \cdot A = 85.70.5 = 29750 \text{ N}$$

$$\sigma_{nom} = P / (c \cdot t) = 29750 / (60.5) = 99,17 \text{ MPa}$$

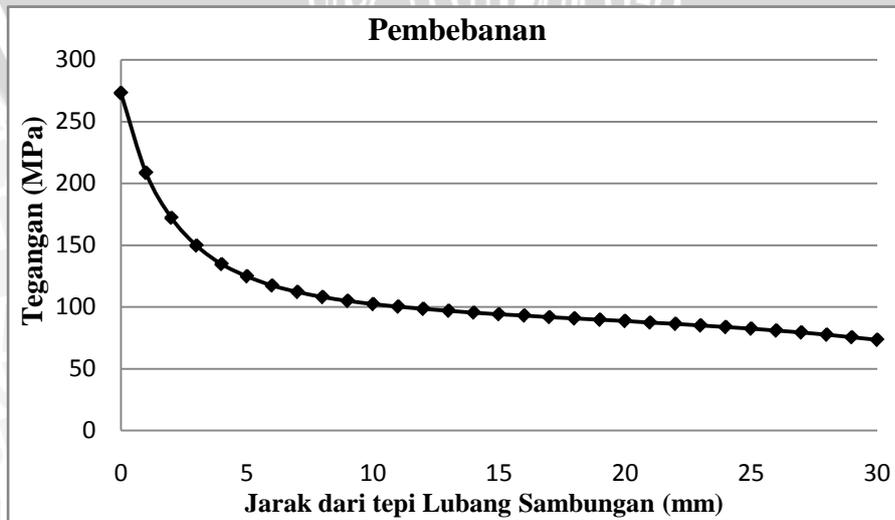
$$K = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}}, \text{ sehingga } \sigma_{max} = \sigma_{nom} \cdot K = 99,17 \cdot 2,75 = 272,72 \text{ MPa}$$

Sedangkan hasil tegangan maksimum dari simulasi dengan bantuan *software* ANSYS 13 adalah 282,93 MPa. Maka tingkat keakuratan analisis dengan *software* ANSYS 13 adalah: $100\% - \frac{282,93 - 272,72}{272,72} \cdot 100\% = 96,2\%$.

Bila distribusi tegangan tersebut diplot dalam grafik besar tegangan terhadap jarak dari lubang sambungan, maka akan didapatkan hasil berikut ini:



Gambar 4.2 Nilai tegangan terhadap jarak akibat pembebanan



Gambar 4.3 Grafik hubungan jarak lubang dengan tegangan akibat pembebanan

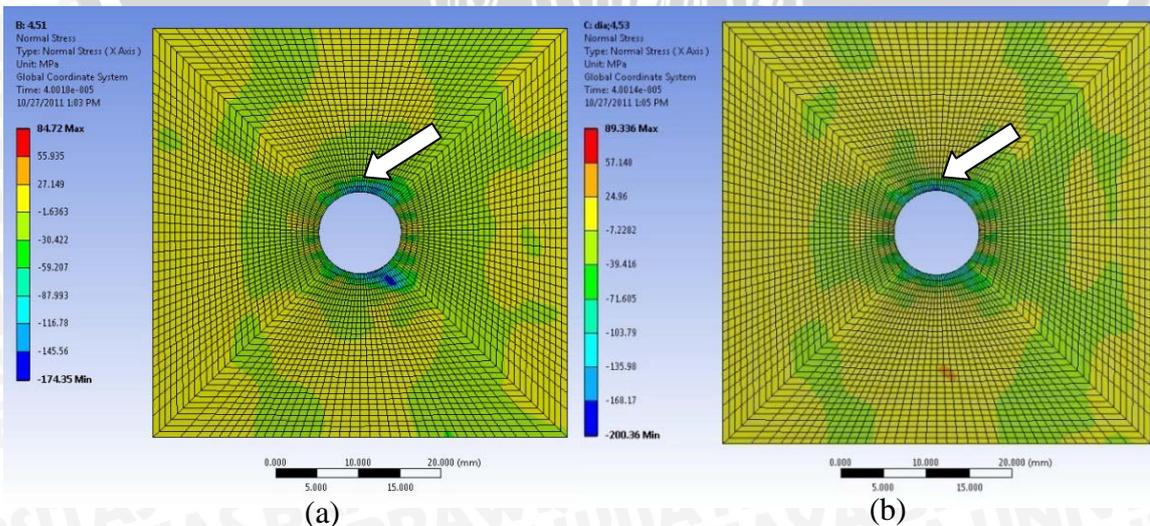


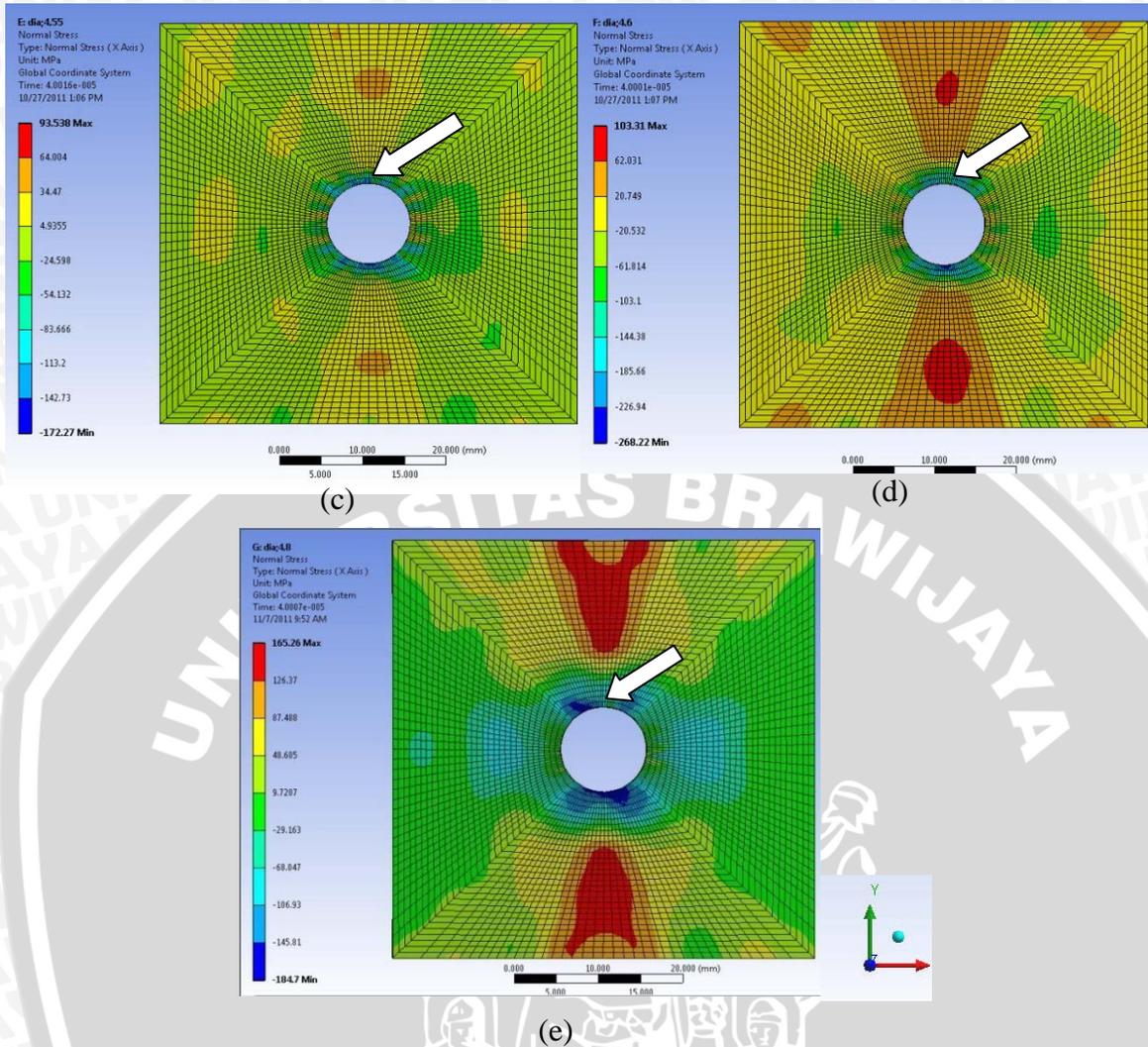
Dari hasil simulasi pembebanan axial ini dapat diketahui bahwa terjadi konsentrasi tegangan pada daerah sekitar lubang. Konsentrasi tegangan ini dikarenakan adanya ketidakaturan dimensi pada plat. Hal ini tentunya akan sangat membahayakan komponen struktur tersebut waktu digunakan tanpa ada hitungan yang cermat. Karena pada daerah tersebut akan terjadi deformasi plastis lokal dengan tegangan tarik yang dapat memicu timbulnya retak awal material, sehingga pada daerah tersebut memang perlu dilakukan perlakuan khusus sebelum perencanaan komponen struktur dilakukan.

4.2 Hasil Simulasi Proses *Cold Expansion Holes*

Setelah dilakukan simulasi dengan Ansys 13.0 akan didapatkan hasil distribusi tegangan sisa, tegangan sisa yang terjadi dalam bentuk tegangan normal kearah sumbu X. Gambar 4.4 menunjukkan *contour* distribusi tegangan sisa plat berlubang dengan diameter ekspansi D_e yang bervariasi mulai 9,02; 9,06; 9,1; 9,2 dan 9,6 mm pada ketebalan 5 mm. Dari gambar tersebut menunjukkan bahwa terdapat tegangan sisa setelah proses *Cold Expansion Holes* dilakukan, yang mana besar dan kondisi tegangan sisa yang terjadi juga bervariasi tergantung dari jarak sisi lubang dan besar D_e yang digunakan.

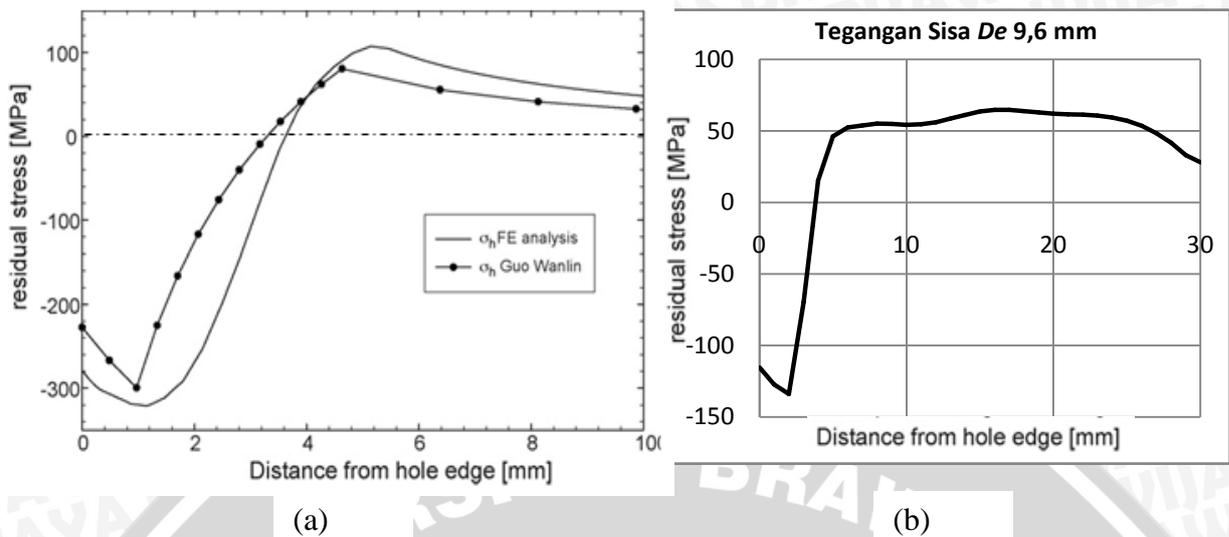
Bila diamati dalam gambar, daerah sekitar lubang sambungan (tanda panah) terlihat berwarna biru hal ini menunjukkan bahwa pada daerah sekitar lubang tersebut terjadi tegangan sisa tekan (*compressive residual stress*) walaupun *mandrel* sudah dilepaskan. Bila semakin jauh dari sisi lubang sambungan, secara granual warna biru akan berubah menjadi warna merah. Hal ini mengidentifikasi bahwa tegangan akan bertransisi dari tegangan sisa tekan menjadi tegangan sisa tarik karena warna merah mewakili tegangan sisa positif atau tegangan tarik. Berikut gambarnya:





Gambar 4.4 *Contour* distribusi Tegangan sisa plat berlubang dengan tebal 5 mm diameter ekspansi D_e berturut-turut (a) 9,02; (b) 9,06; (c) 9,1; (d) 9,2 dan (e) 9,6 mm

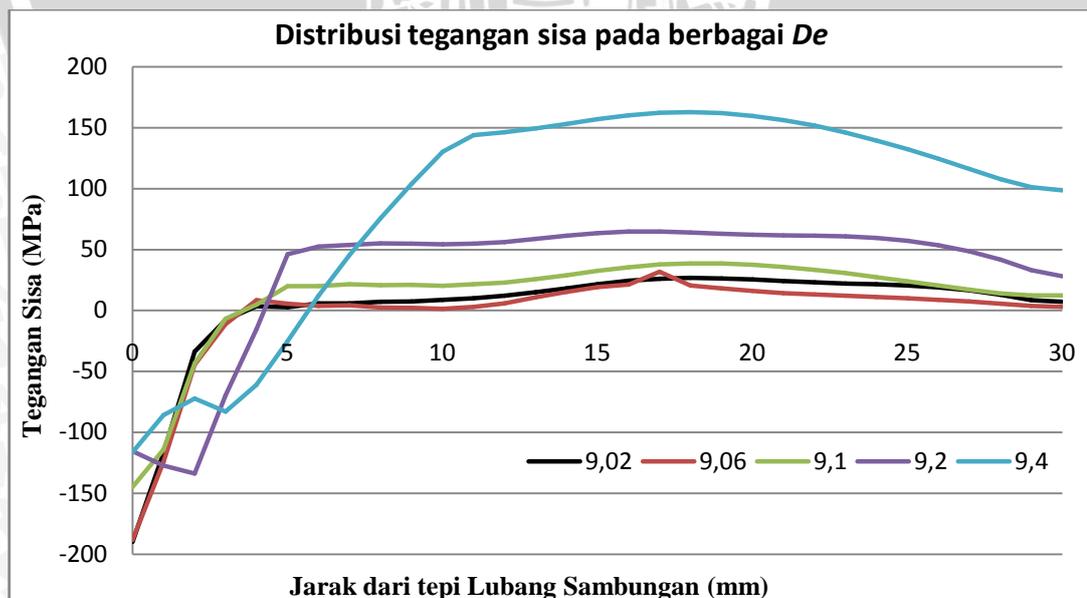
Untuk memvalidasi hasil simulasi ini maka dilakukan perbandingan hasil grafik tegangan sisa yang terjadi pada simulasi ini dengan hasil distribusi tegangan sisa hasil perhitungan pada *journal* tulisan V. Nigrelli dan Pasta.S. Pada *journal* tersebut dituliskan bahwa distribusi tegangan sisa dari *Cold Expansion Hole Ball Models* dihitung dengan cara eksak oleh Guo Wanlin. Sedangkan untuk *Cold Expansion Holes* secara Finite elemen dihitung oleh V. Nigrelli dan Pasta.S, namun pada *journal* 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 dan (b) adalah distribusi tegangan sisa hasil penelitian

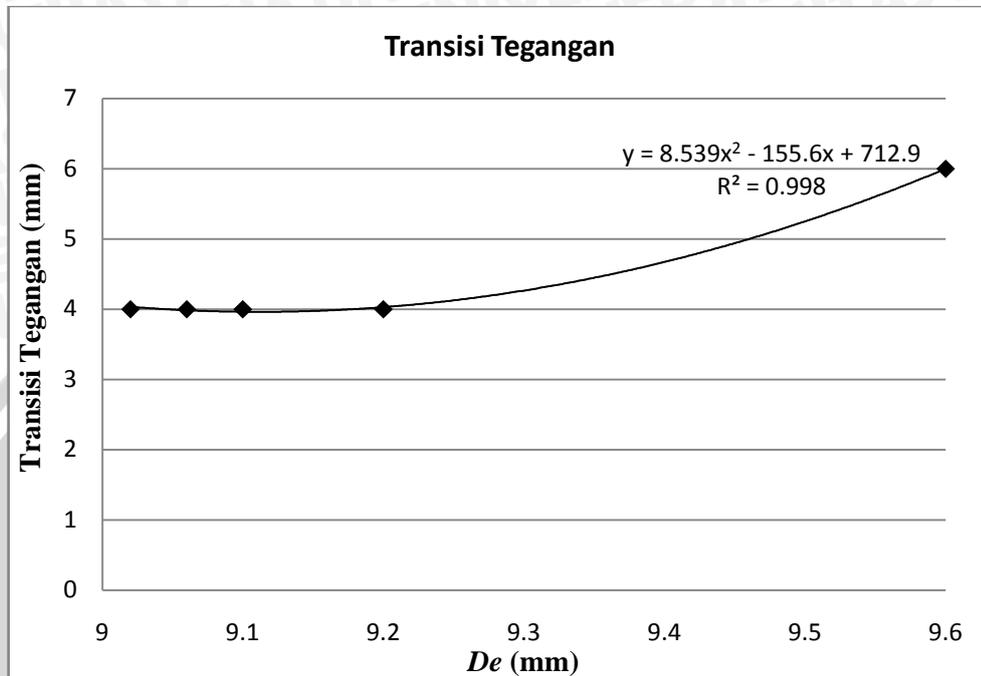
Bila dilihat pada gambar diatas bentuk grafik yang dihasilkan pada simulasi ini adalah mirip dengan grafik hasil analisa Guo dan V. Nigrelli, yaitu sama-sama terbentuk tegangan sisa tekan pada daerah sekitar lubang dan akan bertransisi menjadi tegangan sisa tarik setelah menjauhi lubang sambungan.

Untuk lebih mudah menganalisa distribusi tegangan sisa tersebut, maka semua variasi diameter ekspansi (De) diplot dalam grafik besar tegangan terhadap jarak dari lubang sambungan, maka akan didapatkan hasil berikut ini:



Gambar 4.6 Grafik hubungan jarak lubang sambungan dengan distribusi tegangan sisa yang terjadi.

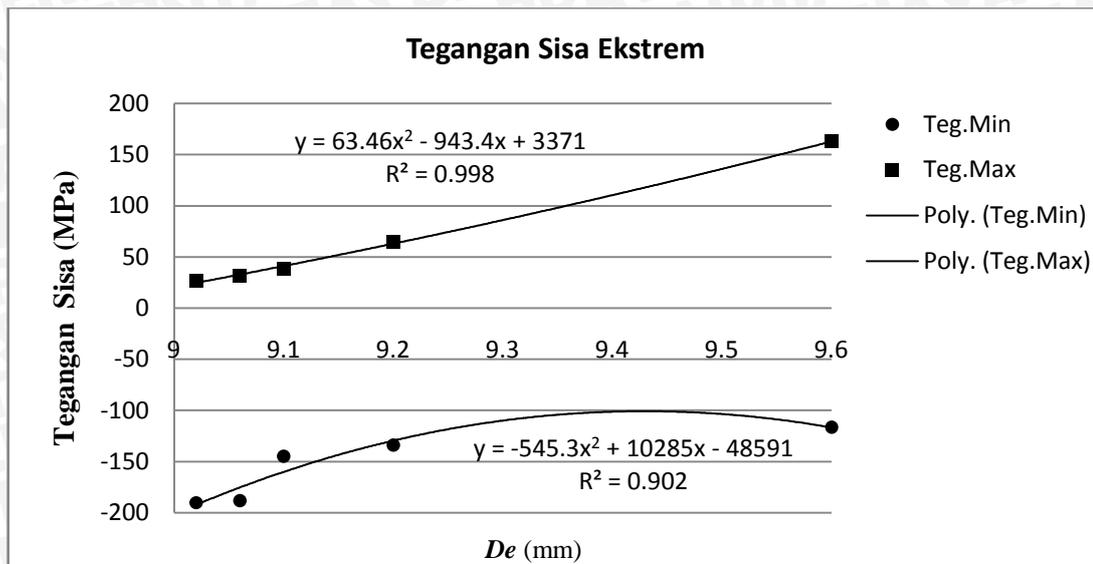
Dari gambar grafik 4.6 tersebut dapat dilihat transisi tegangan dari tegangan sisa tekan menjadi tegangan sisa tarik yang terjadi pada plat setelah proses *Cold Expansion Holes*, untuk lebih detail mengenai titik transisi tersebut dapat dilihat pada gambar grafik berikut ini:



Gambar 4.7 Titik transisi tegangan sisa pada berbagai *De*

Dapat diketahui dari gambar grafik 4.7 tersebut, titik transisi tegangan sisa berbagai *De*, untuk *De* 9,02 sampai 9,2 mm transisi tegangan sisa tekan menjadi tegangan sisa tarik berada pada jarak sekitar 4 mm atau 0,5*De* dari sisi lubang sambungan. *De* 9,6 mm berada pada jarak sekitar 6 mm (0,7*De*) dari sisi lubang sambungan. Sehingga dalam mendesain suatu struktur yang dalam penggunaannya menggunakan *Cold Expansion Process* pada jarak setelah titik transisi tersebut perlu perhatian khusus, mengingat tegangan yang dihasilkan sudah menjadi tegangan sisa tarik yang merugikan. Tegangan sisa tarik ini akan menambah tegangan material pada saat material tersebut dibebani (waktu aplikasi).

Selain titik transisi, pada gambar grafik 4.6 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 diameter ekspansi (*De*) yang berbeda-beda:



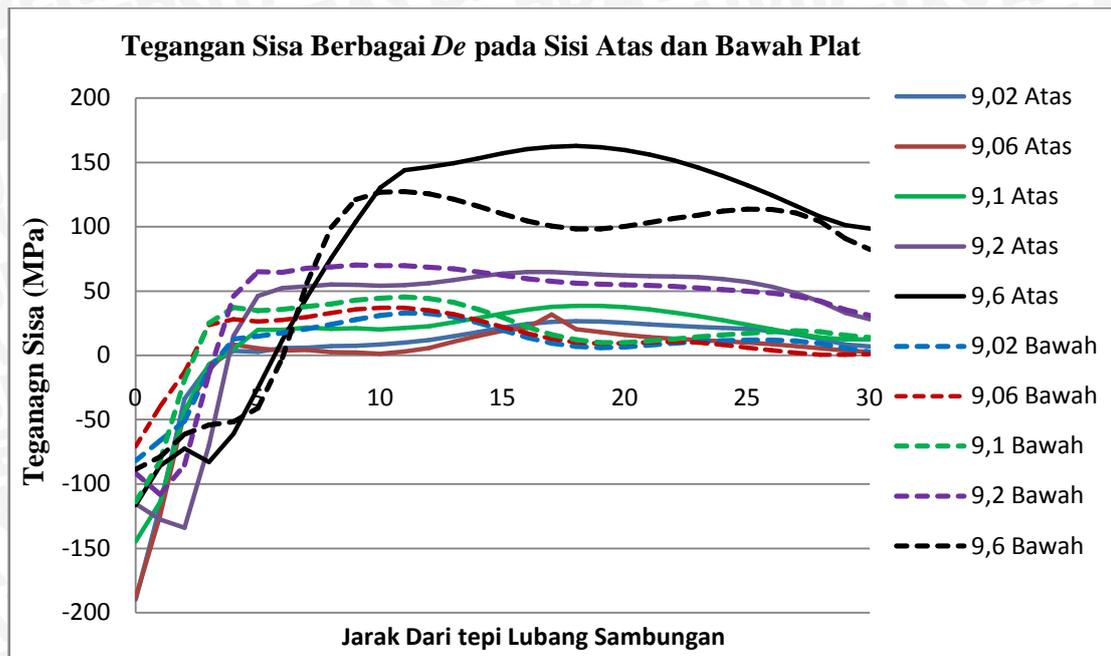
Gambar 4.8 Tegangan sisa *extreme* pada berbagai *De*

Pada gambar 4.8 di atas dapat ditunjukkan tegangan sisa tekan minimum dan tarik maksimum dari berbagai *De*. Bila diamati dari berbagai *De* yang berbeda maka tegangan maksimum yang dihasilkan juga berbeda. Berikut ini kecenderungan bahwa semakin besar diameter ekspansi (*De*) yang digunakan maka semakin besar pula tegangan sisa tarik yang terbentuk setelah jarak transisi dimulai. Ini dapat diketahui pada *De* 9,02 mm tegangan sisa tarik maksimumnya sebesar 26,74 MPa dan pada *De* 9,6 mm meningkat menjadi 162,76 MPa. Demikian juga untuk tegangan sisa tekan yang dihasilkan pada sekitar lubang, semakin besar *De* yang digunakan maka tegangan sisa minimumnya juga semakin besar. Ini terlihat pada *De* 9,02 tegangan sisa tekan minimumnya -189,84 MPa dan pada *De* 9,2mm menjadi -133,86 MPa.

Sehingga dari uraian daerah transisi dan tegangan sisa *extreme* yang terjadi tersebut dapat diambil kesimpulan bahwa parameter *De* dalam *Cold Expansion Process* memang perlu diperhatikan. Oleh karena itu dalam memilih diameter ekspansi (*De*) pada *Cold Expansion Process* agar disesuaikan supaya titik transisi tegangan sisa tekan menjadi sisa tarik besar (jauh) dan tegangan sisa tekan yang terjadi seminimum mungkin serta tidak menghasilkan tegangan sisa tarik yang terlalu besar.

4.3 Arah Ketebalan

Untuk menganalisa arah ketebalan dari distribusi tegangan sisa yang terbentuk maka ditunjukkan besar distribusi tegangan sisa pada sisi bawah plat. Plot grafiknya adalah sebagai berikut:

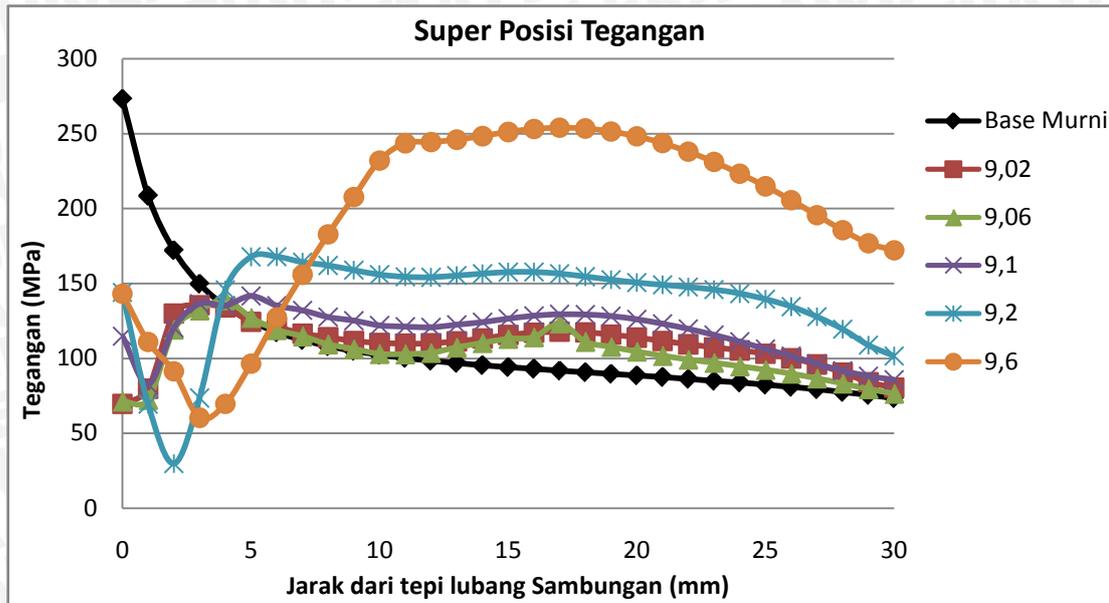


Gambar 4.9 Grafik jarak lubang terhadap distribusi tegangan sisa pada sisi atas dan bawah plat berlubang.

Grafik 4.9 di atas adalah grafik distribusi tegangan sisa yang terjadi terhadap jarak dari sisi lubang sambungan dengan berbagai ketebalan dan juga besar distribusi tegangan pada sisi atas dan bawah dari plat berlubang. Dalam grafik tersebut dapat dilihat, daerah sekitar lubang sambungan nilai tegangan yang terjadi negatif, hal tersebut menunjukkan tegangan sisa tekan terjadi dan akan bertransisi nilainya menjadi positif yang mengindikasikan tegangan sisa tarik juga mulai terbentuk. Juga dapat dilihat pada seluruh variasi *De* yang berbeda-beda distribusi tegangan pada sisi atas dan sisi bawah permukaan plat berlubang bentuk grafiknya mirip dengan nilai yang juga relatif sama. Sebagai contoh, pada plat *De* 9,1 mm tegangan sisa yang terjadi disisi lubang sambungan ($x = 0\text{mm}$) sisi atas adalah -144,67 Mpa dan pada sisi bawah plat -113,84 MPa. Dengan mengganti bola penekan dengan pasak maka penekanan terhadap lubang sambungan akan merata pada seluruh ketebalan sehingga tegangan sisa tekan yang terjadi juga akan terbentuk pada sisi bawah plat sesuai dengan harapan.

4.4 Superposisi Tegangan Sisa dengan Tegangan Aplikasi

Hasil ini diperoleh dengan menjumlahkan tegangan sisa yang terjadi dengan tegangan akibat pembebanan. 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:



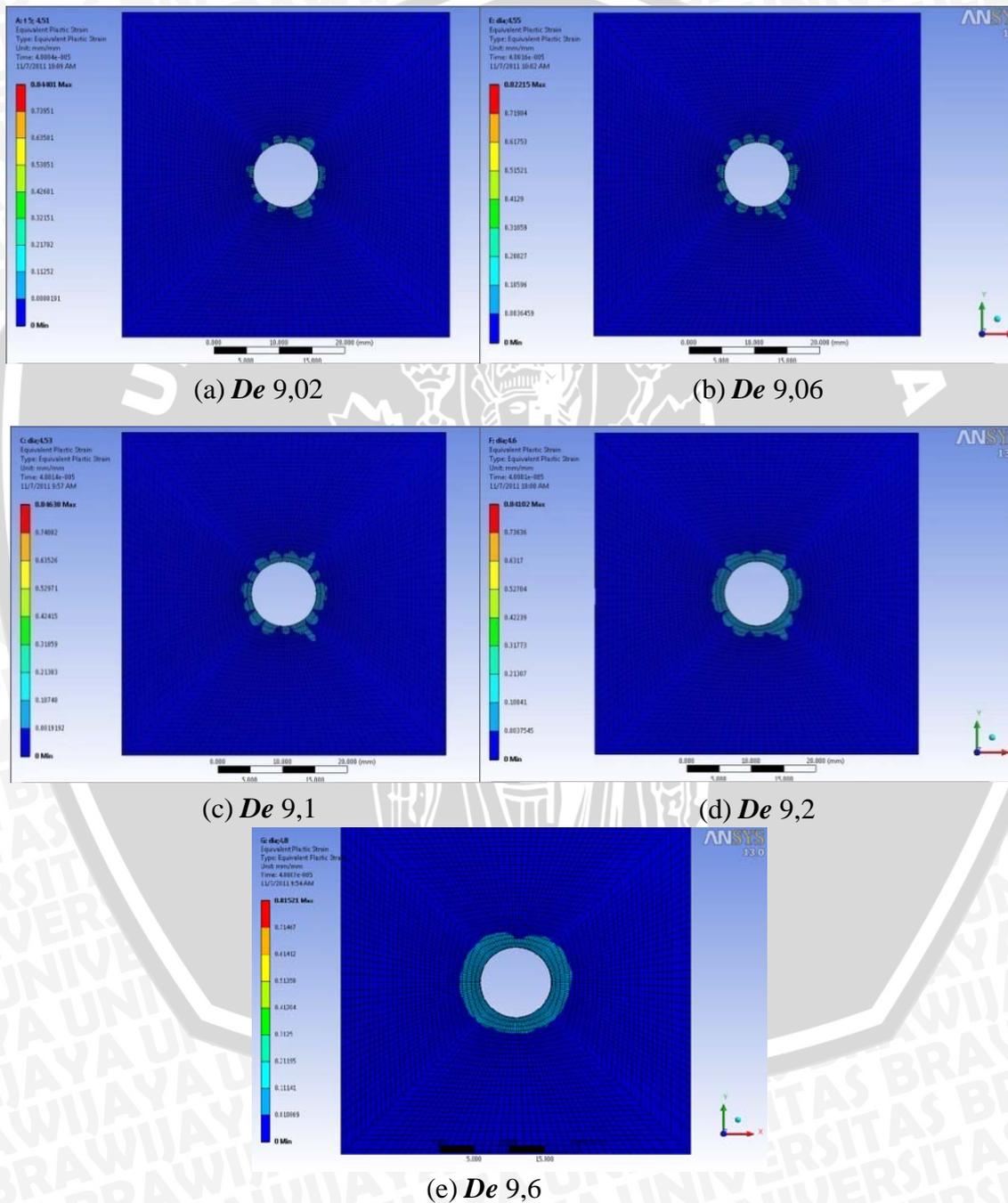
Gambar 4.10 Grafik Superposisi *base* murni dengan plat yang diexpansi

Gambar grafik 4.10 di atas adalah hasil superposisi dari tegangan akibat pembebanan dengan tegangan sisa pada tebal 5 mm dengan diameter ekspansi (De) yang berbeda-beda. Dari gambar ini dapat dilihat walaupun plat berlubang yang diekspansi diberi beban axial sebesar 85 MPa, disekitar lubang sambungan tidak terjadi konsentrasi tegangan seperti pada plat yang tidak diberi perlakuan *Cold Expansion Hole* (*base* murni). Sebagai contoh pada De 9,2 bila tidak di ekspansi tegangan yang terjadi adalah 259,45 MPa sedangkan pada ekspansi adalah 144,07 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.

Selain hal itu juga dapat dilihat bahwa setelah jarak dari sisi lubang semakin jauh (lebih dari $0,5De$ sampai $0,7De$) maka tegangan dari komponen yang diproses dengan *Cold Expansion Holes* (diexpansi) akan lebih besar dari pada yang tidak diexpansi, hal ini diakibatkan terjadinya tegangan sisa tarik seperti yang dijelaskan di atas. Tegangan sisa tarik bernilai positif, jika tegangan ini dijumlahkan dengan tegangan akibat pembebanan yang nilainya juga positif sehingga tegangan hasilnya juga besar. Hal ini mencolok sekali ketika diameter ekspansi yang digunakan 9,6 mm. Pada plat yang tidak diproses dengan *Cold Expansion Hole* di jarak 15 mm dari sisi lubang sambungan besar tegangan yang terjadi adalah 95,19 MPa sedangkan pada plat yang diexpansi akan membesar menjadi 248,32 MPa. Tentunya ini akan sangat membahayakan komponen atau plat tersebut waktu digunakan.

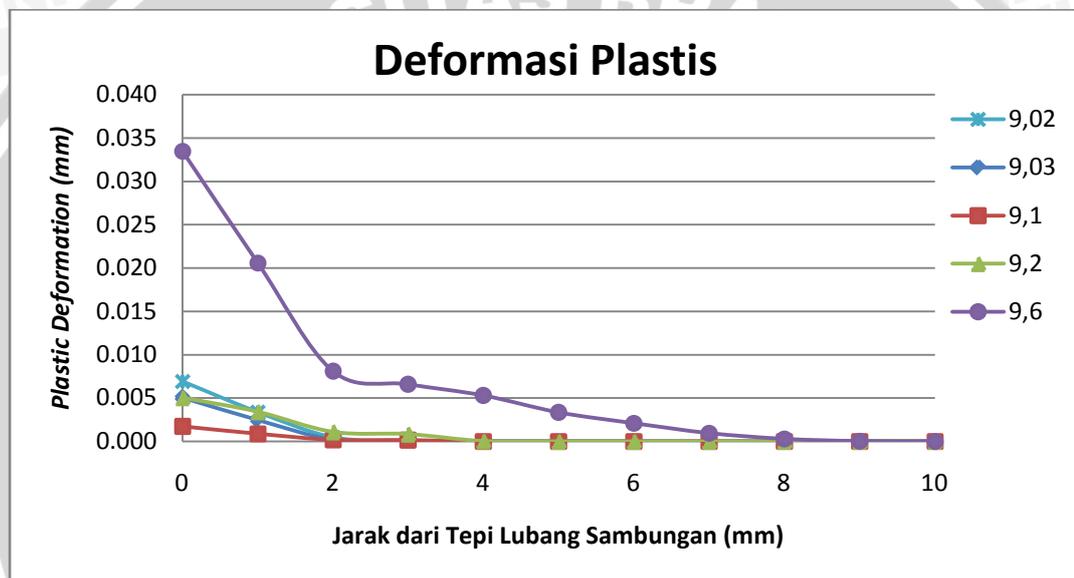
4.5 Pembahasan

Untuk mengetahui penyebab terjadinya distribusi tegangan sisa yang terjadi pada plat berlubang yang telah diekspansi, 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* pada tebal plat 5 mm dengan berbagai *De* yang berbeda-beda adalah sebagai berikut:



Gambar 4.11 Distribusi regangan plastis pada plat berlubang setelah *Cold Expansion Holes* dilakukan

Dari gambar 4.11 tersebut dapat dilihat regangan plastis yang terjadi hanya terjadi disekitar lubang, hal ini diindikasikan dengan warna hijau kekuning-kuningan 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. 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 4.12 berikut ini:



Gambar 4.12 Plot grafik distribusi regangan plastis tebal plat 5 dengan berbagai De yang berbeda-beda.

Gambar 4.12 di atas adalah rangkuman distribusi regangan plastis yang terjadi pada material setelah *Cold Expansion Hole* dilakukan dengan diameter ekspansi (De) yang berbeda-beda, mulai dari 9,02; 9,06; 9,1; 9,2, dan 9,6 mm sedangkan ketebalan yang digunakan adalah sama, yaitu 5 mm. Pada gambar grafik tersebut dapat dilihat setelah jarak sekitar 4-8 mm regangan plastis sudah bernilai nol.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Setelah melakukan penelitian didapatkan suatu kesimpulan sebagai berikut:

1. Besar dan kondisi tegangan sisa tergantung dari diameter pasak (De) yang digunakan untuk ekspansi lubang sambungan.
2. *Cold Expansion Holes* mencegah terjadinya konsentrasi tegangan pada area sekitar lubang sambungan.
3. Modifikasi bola penekan menjadi pasak mampu menciptakan tegangan sisa tekan sampai arah ketebalan.
4. Tegangan sisa tekan pada area sekitar lubang sambungan terjadi pada *plastic zone*.
5. Tegangan sisa tarik terjadi pada daerah elastis material, tegangan ini terjadi karena *reyileding* material yang tidak mengalami deformasi plastis.

5.2 Saran

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

1. Menggunakan material paduan aluminium yang lainnya yang juga sering dipakai dalam penyambungan keling (*rivet*).
2. 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.



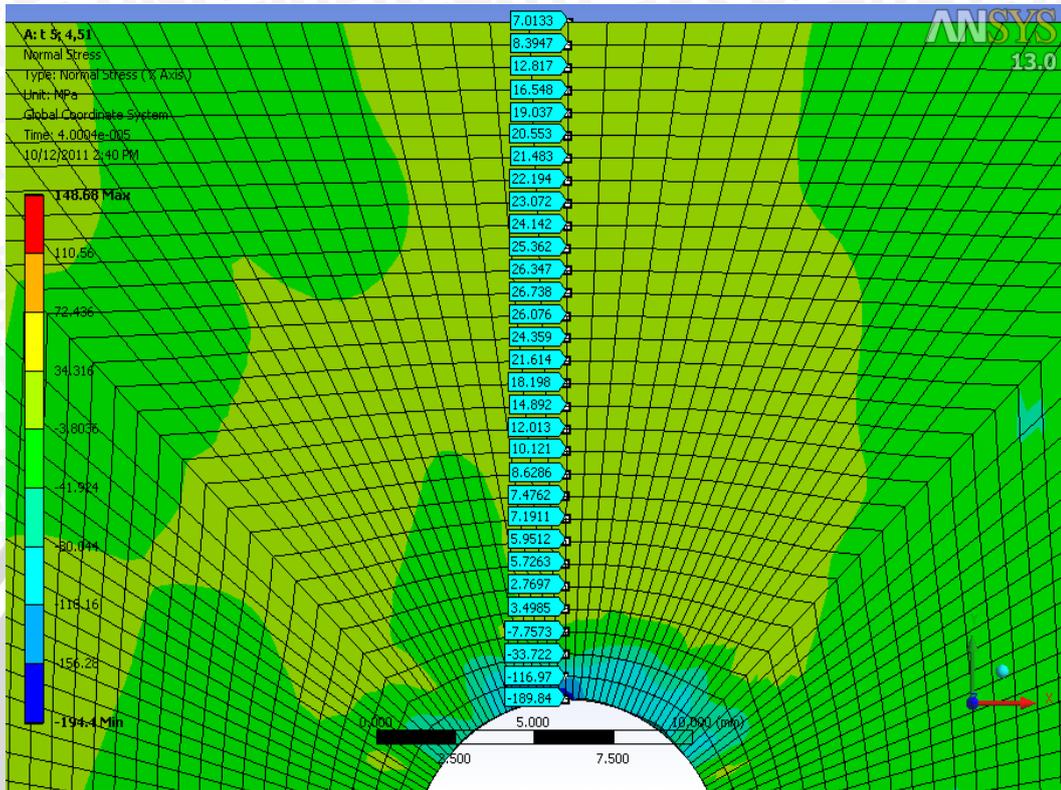
DAFTAR PUSTAKA

- Bannantine, Julie A. 1990. *Fundamentals of Metal Fatigue Analysis*. New Jersey: Prentice Hall, Inc.
- Bathe, Klaus-Jurgen. 1996. *Finite Element Procedures*. New Jersey: Prentice Hall
- D, Orlikowski. A, Correa. E, Schwegler. dan J, Klepeis. 2007. *A Steinberg-Guinan model for High-Pressure Carbon*. United States: Lawrence Livermore National Laboratory
- D, Zeljko. 1995. *Comparasion of Fatigue Crack Retardation Methods*. *Journal Engineering Failure Analysis* Volume 3. Great Britain: Elsevier Science Ltd.
- Danyluk, James. 2010. *An Analysis of Multi-Material Plates Under Explosive Loading*. Hartford: Rensselaer Polytechnic Institute at Hartford.
- Dowling, Norman E. 1998. *Mechanical Behavior of Materials*. New Jersey: Prentice-Hall Inc.
- Finney, JM. 1993. *Cold Expansion and Interference for Extending the Fatigue Life of Multi-Layer Metal Joint*. Jurnal tidak dipublikasikan. Victoria: Departement of defance Science and Technology Organisation Aeronautical Research Laboratory.
- Gere, James N. & Timshenko, Stephen P. 1987. *Mekanika Bahan*. Alih bahasa oleh Hans J. Wospakrik. Jakarta: Erlangga.
- Iremonger, MJ. 1990. *Dasar Analisis Tegangan*. Alih bahasa oleh Sardi S. Jakarta: UI-Press.
- 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.
- Modul ANSYS. 2009. Malang: Studio Perancangan dan Rekayasa Sistem Fakultas Teknik Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya.
- 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.
- R, Ghfiri. A, Amroche. A, Imad & G, Mesmacque. 2000. *Fatigue 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.
- Radaj, D. (1992). *Heat Effects of Welding: Temperature Field, Residual Stress, Distortion*. Berlin: Springer-Verlag.

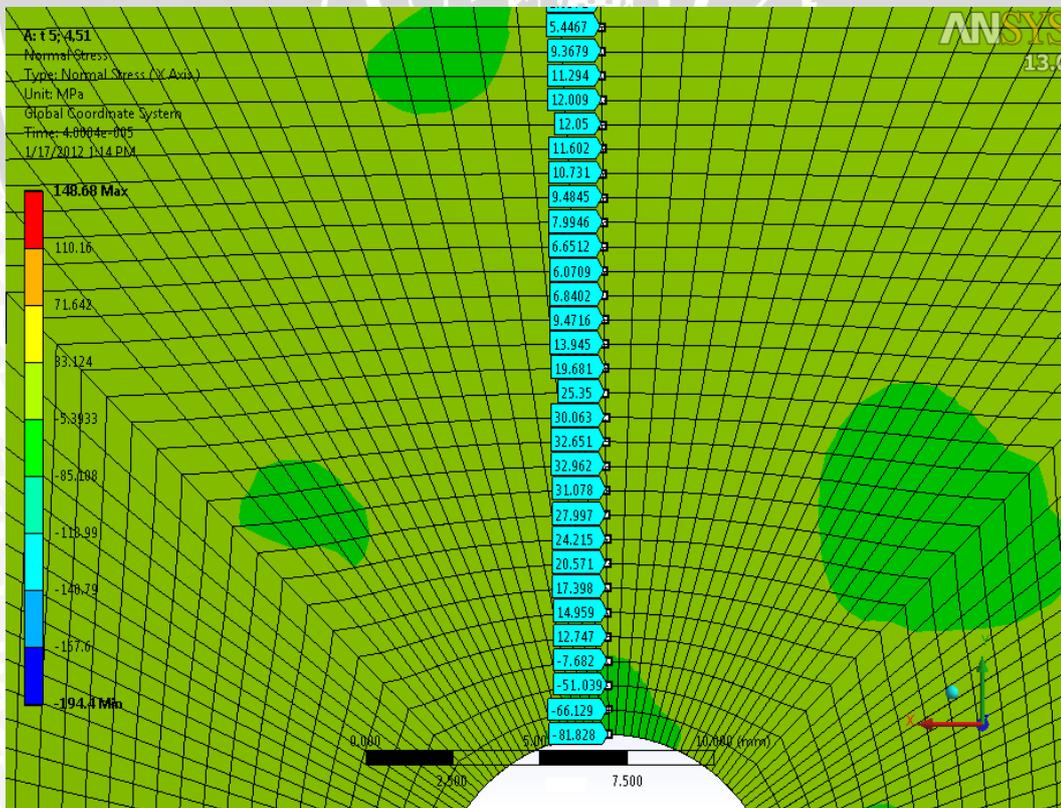
- Robert, D Cook. 1990. *Metode Elemen Hingga*. Alih bahasa oleh Bambang Surya A. Bandung: PT. Eresco
- Shigley, Joseph.E. 1986. *Perencanaan Teknik Mesin Edisi Keempat*. Jakarta : Erlangga
- Stephens, Ralph I. & Fatemi, Ali. 2001. *Metal Fatigue in Engineering (Second Edition)*. New York: A Wiley-Interscience Publication.
- Timoshenko, SP. & Goodier, JN. 1986.*Teori Elastisitas*. Alih bahasa oleh Darwin Sebayang. Jakarta: Erlangga.
- Wijayanto, Jarot & Ilman, MN.2008.*Studi Korosi Dan Sifat Mekanis Sambungan Las Busur Rendam Untuk Kontruksi Baja Melalui Flame Stress Relieving.Seminar Nasional Aplikasi Sains Dan Teknologi 2008*.Yogyakarta: Ist Akprind.
- Y, Nakasone. S, Yoshimoto dan TA, Stolarski.2006. *Engineering Analysis With ANSYS Software*. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann.
- Zahavi, Eliahu.1992.*The Finite Element Method in Machine Design*. USA: A Solomon Press Book.



Lampiran 1: Distribusi Tegangan Sisa Paralel Sumbu Y Pada Plat Berlubang
 1. De 9,02 mm

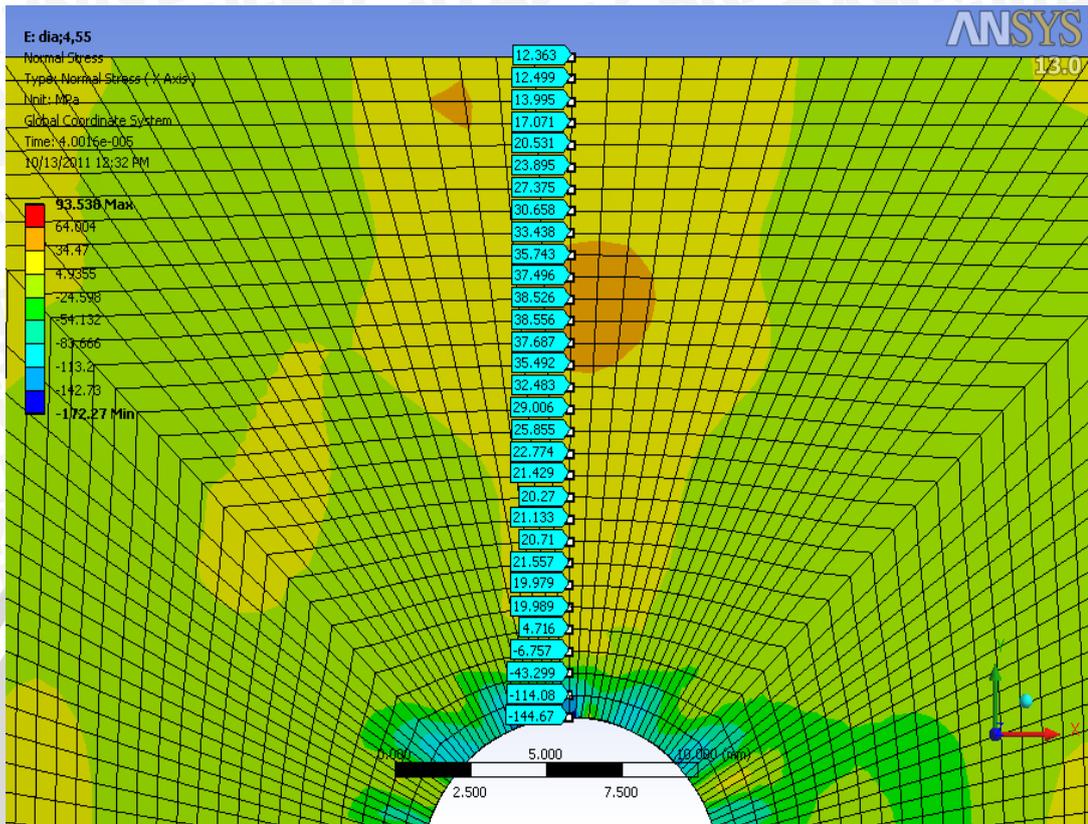


(a) Sisi atas

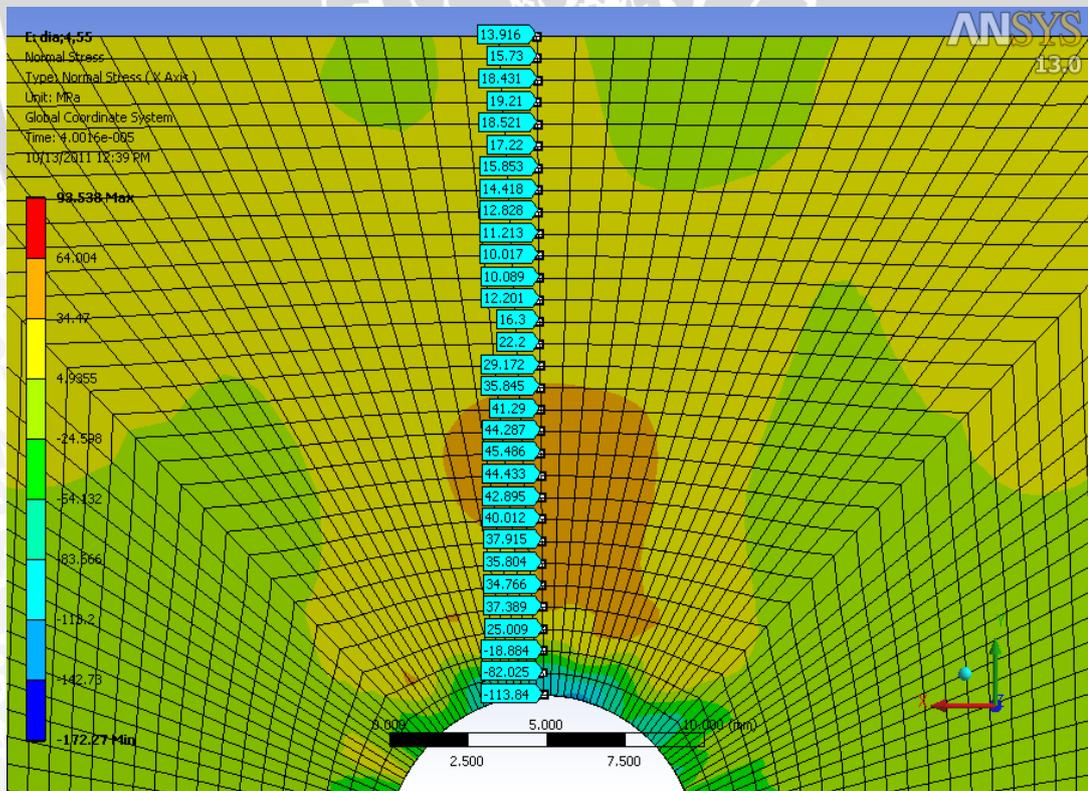


(b) Sisi bawah

3. De 9,1 mm

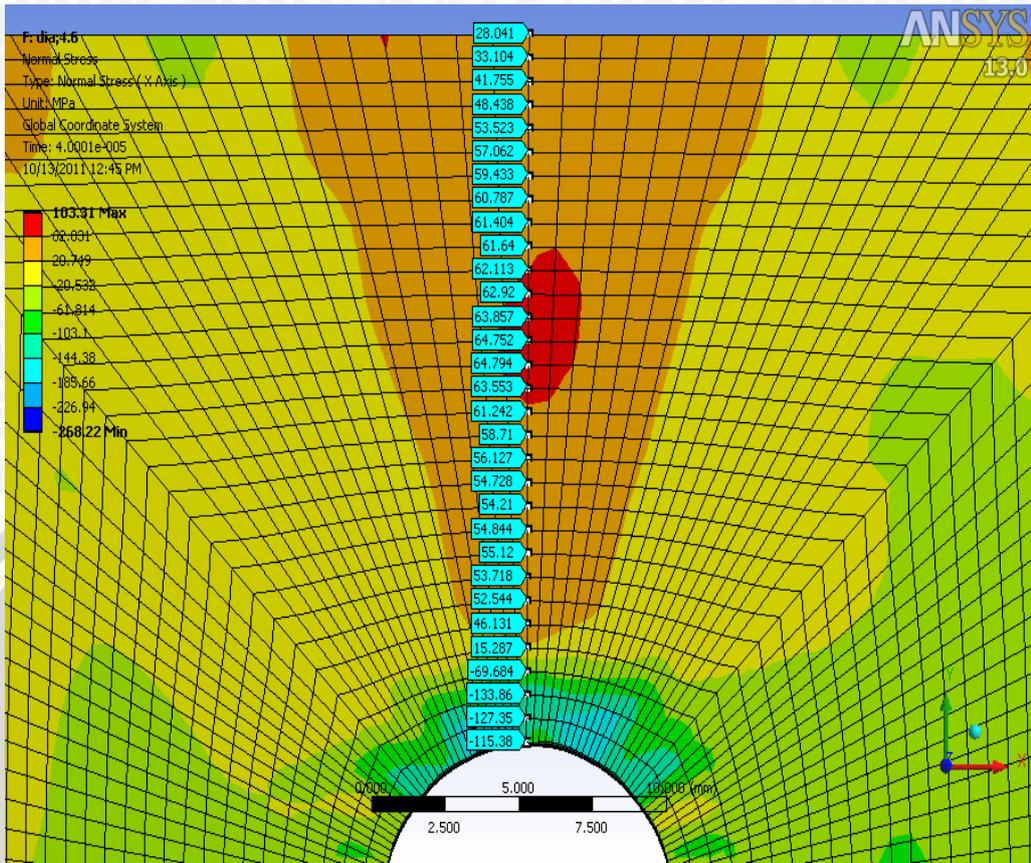


(a) Sisi atas

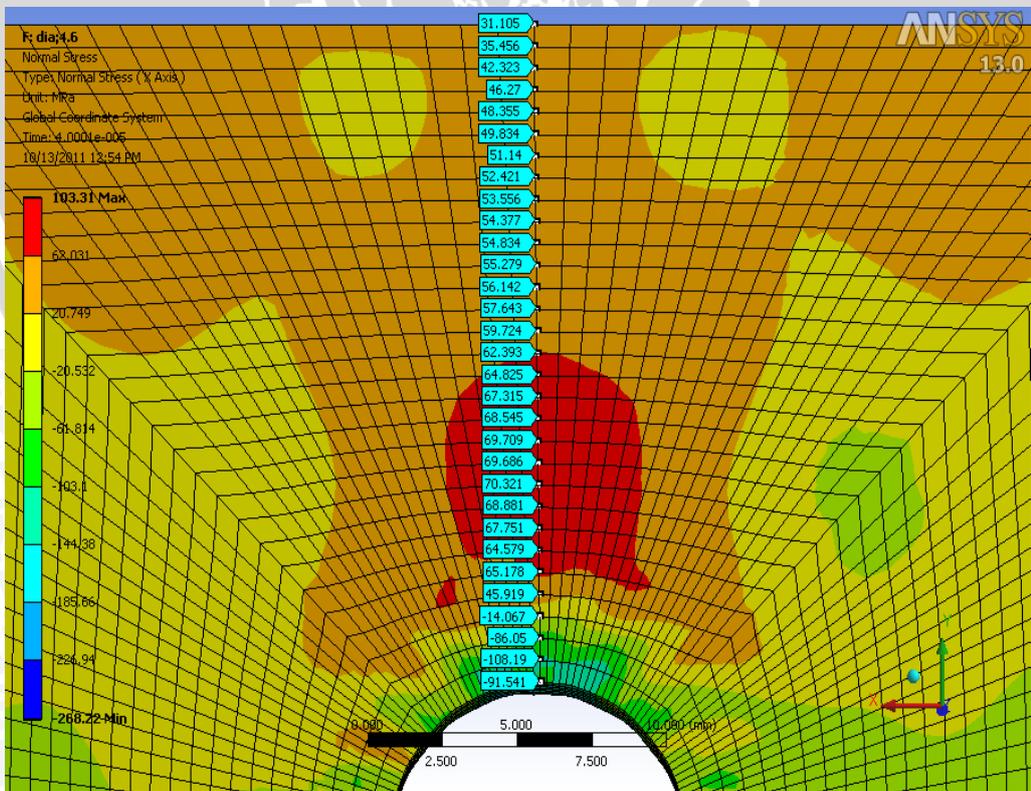


(b) Sisi bawah

4. De 9,2 mm



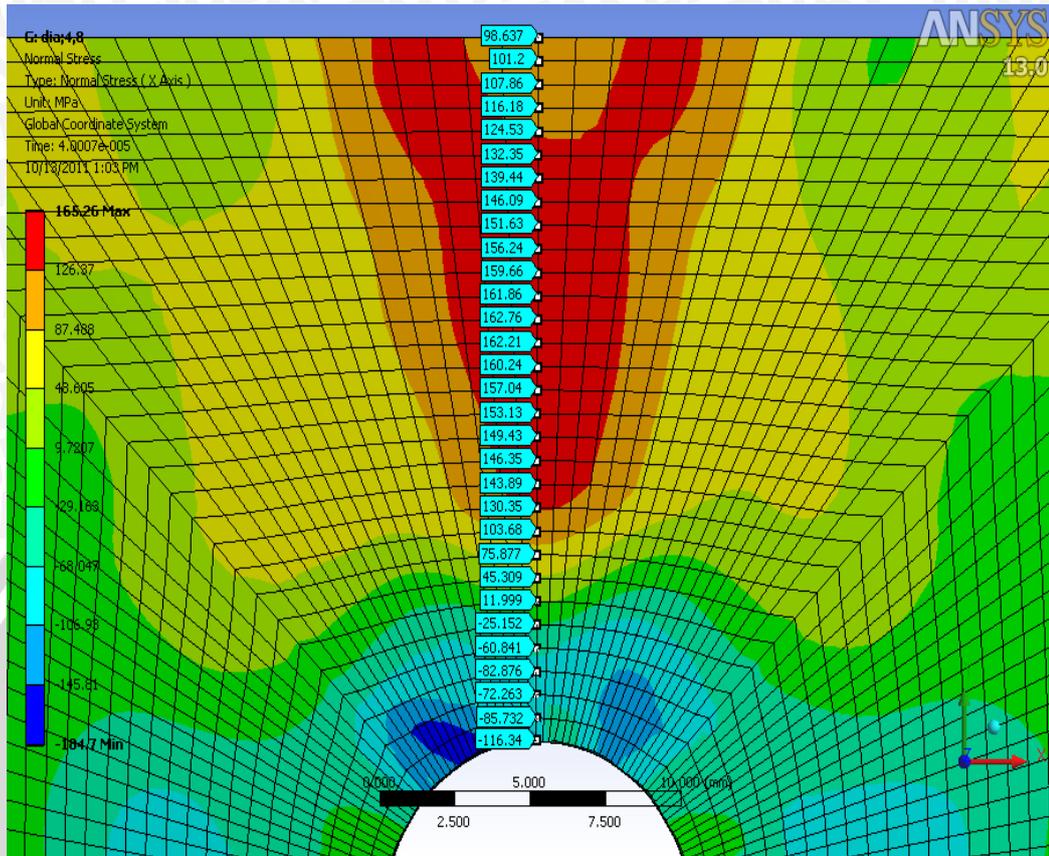
(a) Sisi atas



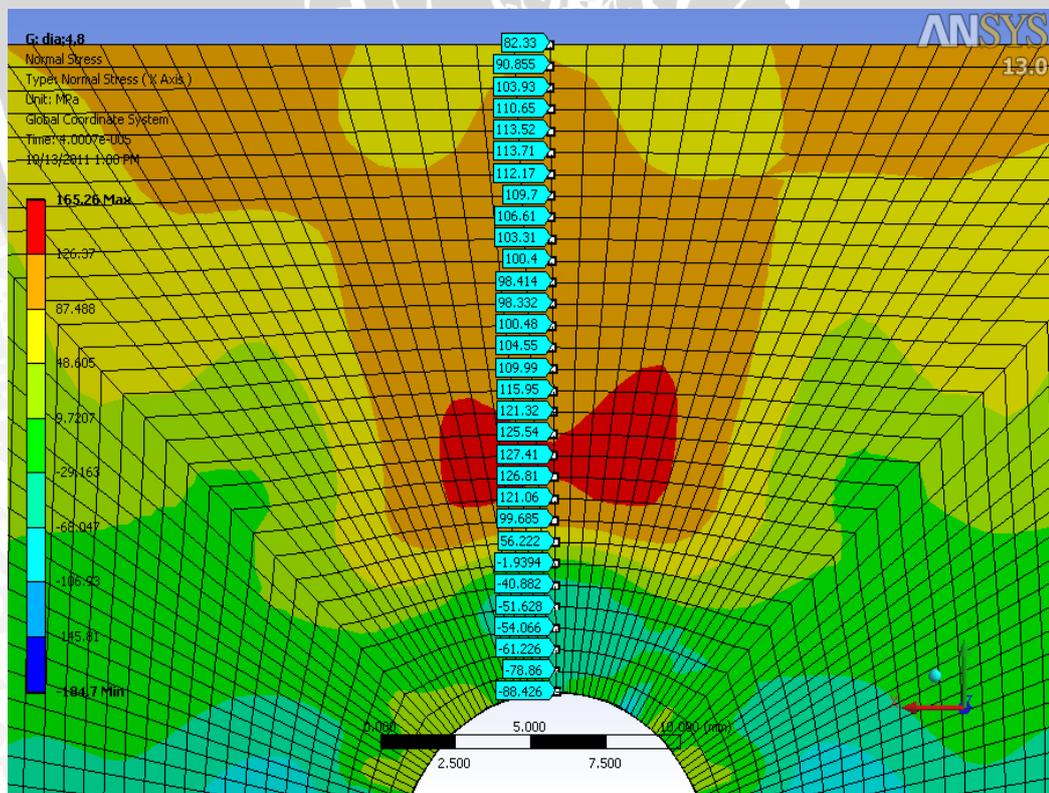
(b) Sisi bawah



5. $D = 9,6 \text{ mm}$



(a) Sisi atas



(b) Sisi bawah

Lampiran 2: Tabel Distribusi Tegangan sisa terhadap jarak dari lubang

1. D_e 9,02 mm

No.	Distance (mm)	Tegangan sisa (Mpa)	
		Atas	Sisi Bawah
1	0	-189.84	-81.83
2	1	-116.97	-66.13
3	2	-33.72	-51.04
4	3	-7.76	-7.68
5	4	3.5	12.75
6	5	2.77	14.96
7	6	5.73	17.4
8	7	5.95	20.57
9	8	7.19	24.22
10	9	7.48	27.93
11	10	8.63	31.08
12	11	10.12	32.96
13	12	12.01	32.65
14	13	14.89	30.06
15	14	18.2	25.35
16	15	21.61	19.68
17	16	24.36	13.95
18	17	26.08	9.47
19	18	26.74	6.84
20	19	26.35	6.07
21	20	25.36	6.65
22	21	24.14	7.99
23	22	23.08	9.48
24	23	22.19	10.73
25	24	21.48	11.29
26	25	20.56	12.01
27	26	19.04	11.97
28	27	16.55	11.29
29	28	12.82	9.37
30	29	8.4	5.45
31	30	7.01	2.91

2. *De* 9,06 mm

No.	Distance (mm)	Tegangan sisa (Mpa)	
		Atas	Sisi Bawah
1	0	-188.2	-79.59
2	1	-124.44	-39.66
3	2	-44.46	-12.85
4	3	-11.26	23.59
5	4	8.48	28.19
6	5	5.62	26.27
7	6	3.74	27.61
8	7	4.19	29.92
9	8	2.52	33.01
10	9	2.28	35.81
11	10	1.29	36.93
12	11	3.07	37.1
13	12	5.79	35.09
14	13	10.85	32.04
15	14	15.17	27.38
16	15	19.06	22.18
17	16	21.36	17.11
18	17	31.71	12.99
19	18	20.39	10.25
20	19	18.27	9.27
21	20	16.03	9.61
22	21	14.33	10.35
23	22	13.05	10.62
24	23	12	9.93
25	24	11.01	8.247
26	25	9.93	6.14
27	26	8.82	3.93
28	27	7.33	1.99
29	28	5.62	0.65
30	29	3.85	0.68
31	30	2.87	1.19

3. *De* 9,1 mm

No.	Distance (mm)	Tegangan sisa (Mpa)	
		Atas	Sisi Bawah
1	0	-144.67	-113.84
2	1	-114.08	-82.03
3	2	-43.29	-18.88
4	3	-6.76	25.01
5	4	4.72	37.39
6	5	19.99	34.77
7	6	19.98	35.8
8	7	21.56	37.92
9	8	20.71	40.01
10	9	21.13	42.89
11	10	20.27	44.43
12	11	21.43	45.49
13	12	22.77	44.29
14	13	25.86	41.29
15	14	29.01	35.85
16	15	32.48	29.72
17	16	35.49	22.2
18	17	37.68	16.3
19	18	38.56	12.2
20	19	38.53	10.09
21	20	37.49	10.02
22	21	35.74	11.21
23	22	33.44	12.83
24	23	30.67	14.42
25	24	27.38	15.85
26	25	23.89	17.22
27	26	20.53	18.52
28	27	17.07	19.21
29	28	13.99	18.43
30	29	12.49	15.73
31	30	12.36	13.92

4. *De* 9,2 mm

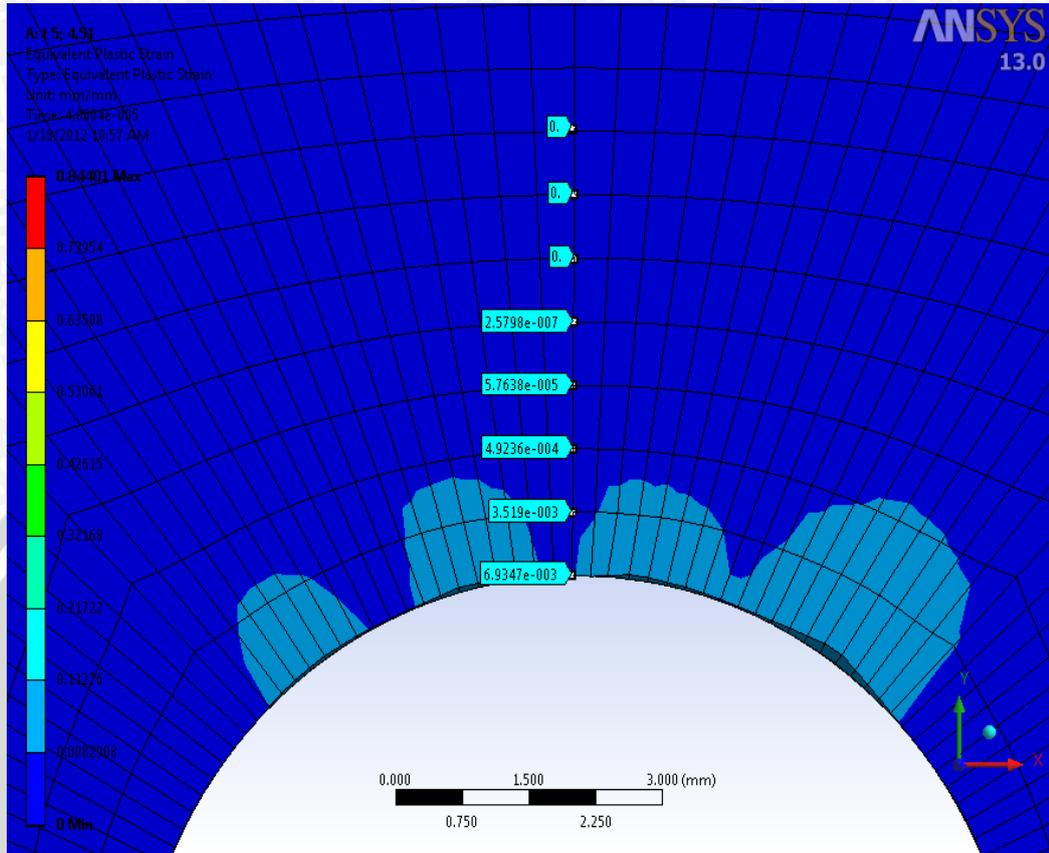
No.	Distance (mm)	Tegangan sisa (Mpa)	
		Sisi Atas	Sisi Bawah
1	0	-115.38	-91.54
2	1	-127.35	-108.19
3	2	-133.86	-85.05
4	3	-69.68	-14.07
5	4	15.29	45.92
6	5	46.13	65.18
7	6	52.54	64.58
8	7	53.72	67.75
9	8	55.12	68.88
10	9	54.84	70.32
11	10	54.21	69.69
12	11	54.73	69.71
13	12	56.13	68.55
14	13	58.71	67.32
15	14	61.24	64.83
16	15	63.55	62.39
17	16	64.79	59.72
18	17	64.75	57.64
19	18	63.86	56.14
20	19	62.92	55.28
21	20	62.11	54.83
22	21	61.64	54.38
23	22	61.4	53.56
24	23	60.79	52.42
25	24	59.43	51.14
26	25	57.06	49.83
27	26	53.52	48.36
28	27	48.44	46.27
29	28	41.76	42.32
30	29	33.1	35.46
31	30	28.04	31.1

5. De 9,6 mm

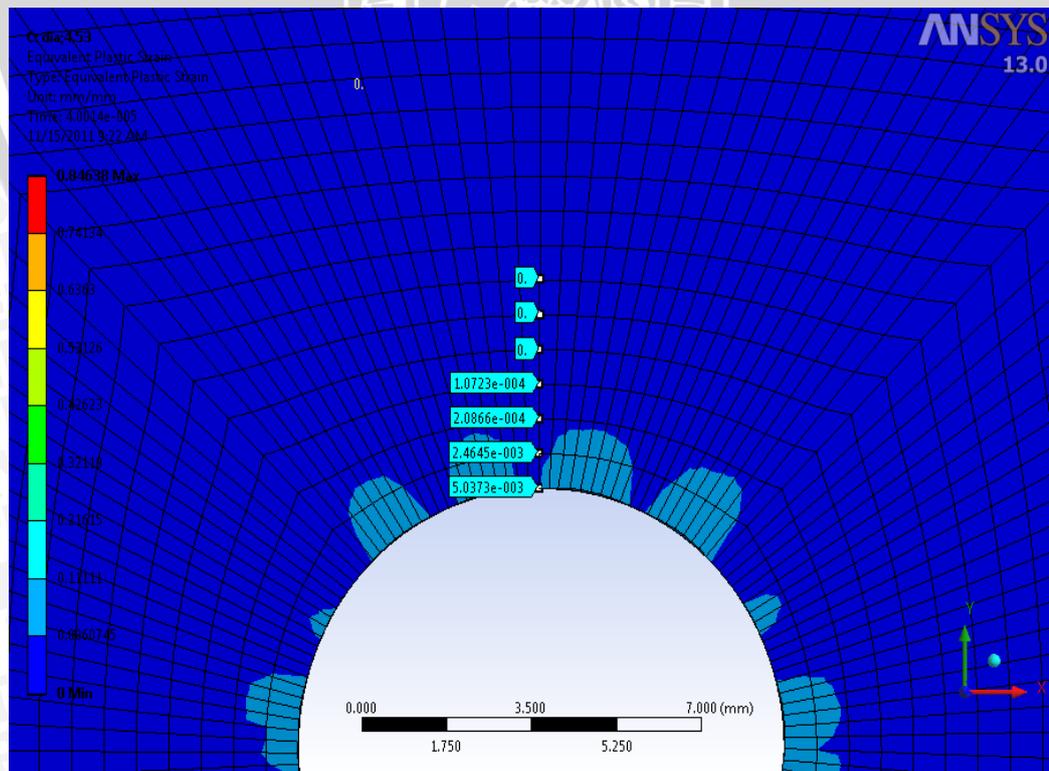
No.	Distance (mm)	Tegangan sisa (Mpa)	
		Sisi Atas	Sisi Bawah
1	0	-116.34	-88.43
2	1	-85.73	-78.86
3	2	-72.26	-61.23
4	3	-82.87	-54.07
5	4	-60.84	-51.63
6	5	-25.15	-40.88
7	6	11.99	-1.94
8	7	45.3	56.22
9	8	75.87	99.48
10	9	103.68	121.06
11	10	130.35	126.81
12	11	143.89	127.41
13	12	146.35	125.54
14	13	149.43	121.32
15	14	153.13	115.95
16	15	157.04	109.99
17	16	160.24	104.55
18	17	162.21	100.48
19	18	162.76	98.32
20	19	161.86	98.44
21	20	159.66	100.4
22	21	156.24	103.31
23	22	151.63	106.61
24	23	146.09	109.07
25	24	139.44	112.17
26	25	132.35	113.71
27	26	124.53	113.52
28	27	116.18	110.65
29	28	107.86	103.93
30	29	101.2	90.85
31	30	98.63	82.33

Lampiran 3: Regangan Plastic

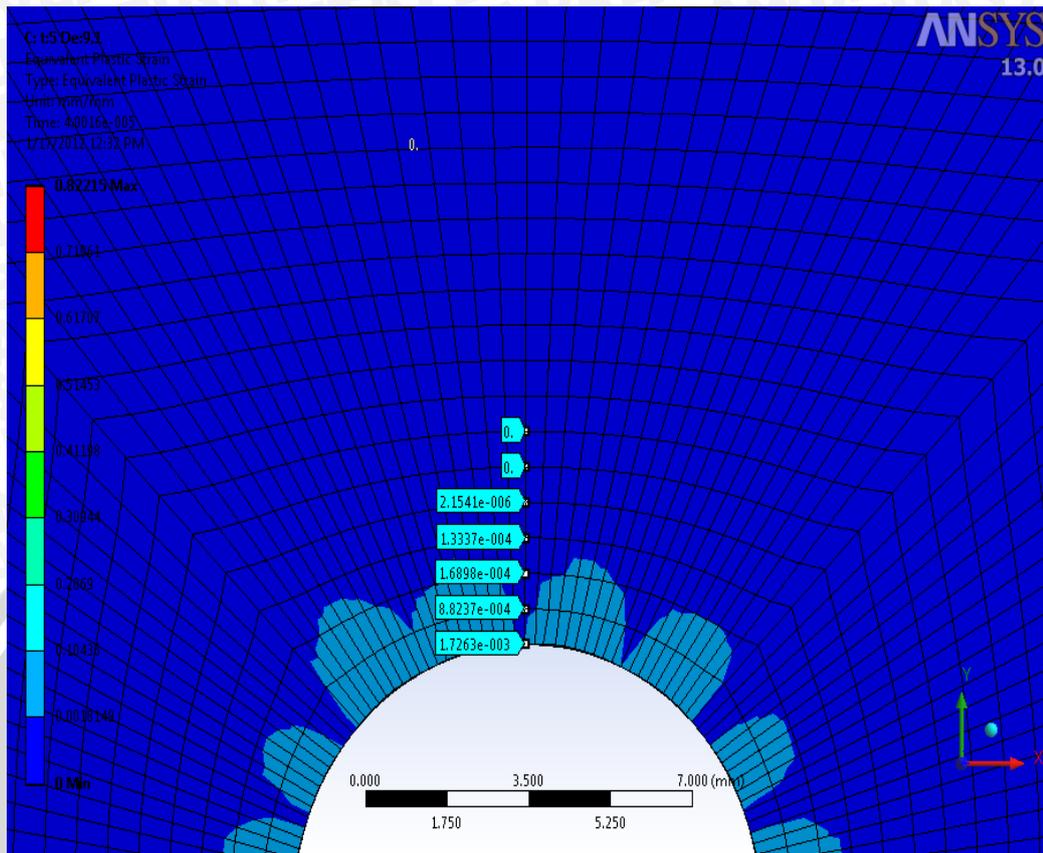
(a) De 9,02



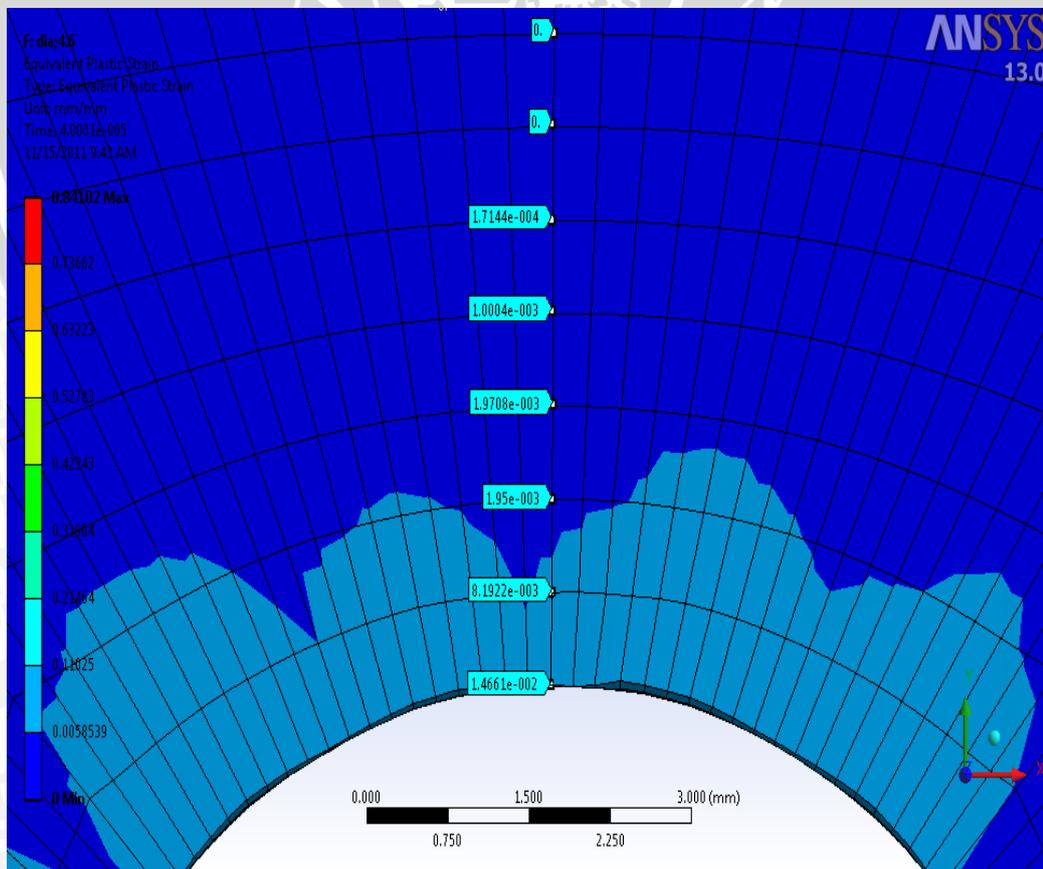
(b) De 9,06



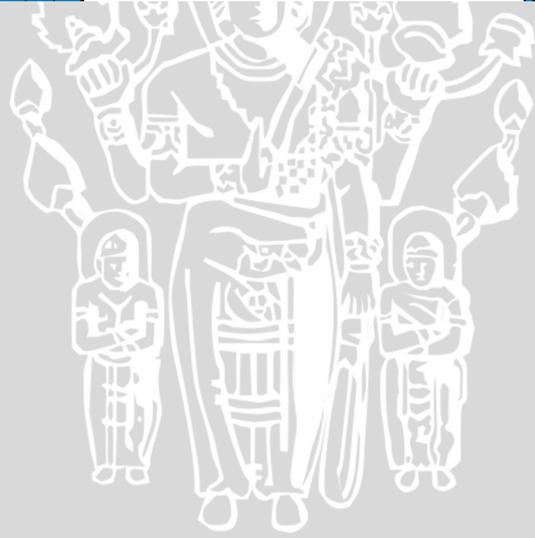
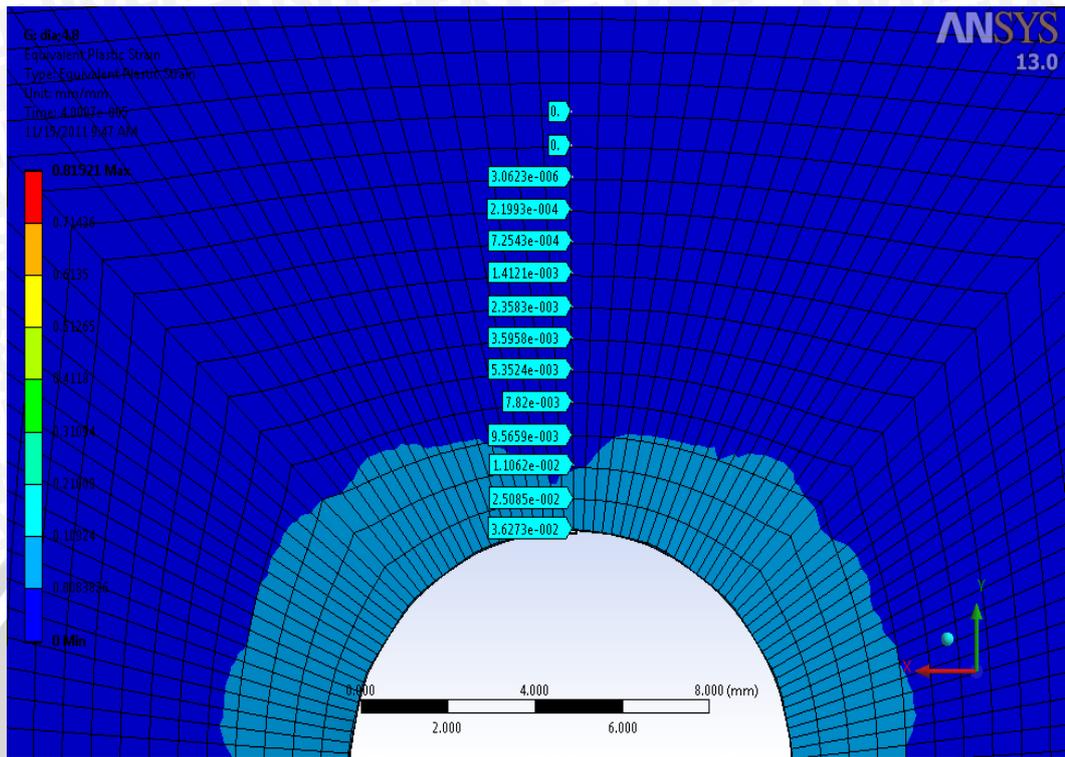
(c) De 9,1



(d) De 9,2



(e) De 9,6



Lampiran 4: Tabel Regangan Plastic

NO.	Distance (mm)	Regangan Plastik				
		De 9,02	De 9,06	De 9,1	De 9,2	De 9,6
1	0	0.00693	0.005037	0.001724	0.01466	0.036273
2	1	0.00352	0.00246	0.000885	0.0082	0.025085
3	2	0.000492	0.000208	0.000169	0.00195	0.011062
4	3	0.000058	0.000107	0.000132	0.001971	0.009568
5	4	0	0	0	0.001	0.009566
6	5	0	0	0	0.000171	0.00782
7	6	0	0	0	0	0.005352
8	7	0	0	0	0	0.0003596
9	8	0	0	0	0	0.0002358
10	9	0	0	0	0	0.0001412
11	10	0	0	0	0	0



Lampiran 5: Tabel Superposisi Tegangan

No.	Distance (mm)	Superposisi Tegangan (MPa)				
		De 9,02	De 9,06	De 9,1	De 9,2	De 9,6
1	0	69.61	71.25	114.78	144.07	143.11
2	1	79.77	72.3	82.66	69.39	111.01
3	2	129.98	119.24	120.41	29.84	91.44
4	3	135.5	132	136.5	73.58	60.39
5	4	133.93	138.91	135.15	145.72	69.59
6	5	124.37	127.22	141.59	167.73	96.45
7	6	120.99	119	135.24	167.8	127.25
8	7	116.46	114.7	132.07	164.23	155.81
9	8	114.08	109.41	127.6	162.01	182.76
10	9	111.5	106.3	125.15	158.86	207.7
11	10	110.3	102.96	121.94	155.88	232.02
12	11	109.81	102.76	121.12	154.42	243.58
13	12	110	103.78	120.76	154.12	244.34
14	13	111.41	107.37	122.38	155.23	245.95
15	14	113.39	110.36	124.2	156.43	248.32
16	15	115.6	113.05	126.47	157.54	251.03
17	16	117.2	114.2	128.33	157.63	253.08
18	17	117.81	123.44	129.41	156.48	253.94
19	18	117.41	111.06	129.23	154.53	253.43
20	19	115.92	107.84	128.1	152.49	251.43
21	20	113.87	104.54	126	150.62	248.17
22	21	111.55	101.74	123.15	149.05	243.65
23	22	109.35	99.32	119.71	147.67	237.9
24	23	107.25	97.06	115.73	145.85	231.15
25	24	105.31	94.84	111.21	143.26	223.27
26	25	103.03	92.4	106.36	139.53	214.82
27	26	100.04	89.82	101.53	134.52	205.53
28	27	95.95	86.73	96.47	127.84	195.58
29	28	90.54	83.34	91.71	119.48	185.58
30	29	84.08	79.53	88.17	108.78	176.88
31	30	80.54	76.4	85.89	101.57	172.16