



TUGAS AKHIR - TL 141584

Analisis Springback Pada Tube Titanium Berpenampang Segiempat Pada Proses Rotary Draw Bending

IMAN SATRIA SIDABUTAR
NRP. 2712 100 139

Dosen Pembimbing
Tubagus Noor Rohmannudin, S.T., M.Sc
Mas Irfan Purbawanto Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D

JURUSAN TEKNIK MATERIAL & METALURGI
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2017

“Halaman ini sengaja dikosongkan”



FINAL PROJECT - TL 141584

**Springback Analysis of Rectangular Titanium Tube in
Rotary Draw Bending**

**IMAN SATRIA SIDABUTAR
NRP. 2712 100 139**

Advisors

Tubagus Noor Rohmannudin, S.T., M.Sc

Mas Irfan Purbawanto Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D

**MATERIALS AND METALLURGICAL ENGINEERING
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA
2017**

“This page is intentionally left blank”

Analisis Springback Pada Tube Titanium Berpenampang Segiempat Pada Proses Rotary Draw Bending

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi Metalurgi Manufaktur
Program Studi S-1 Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

Iman Satria Sidabutar
NRP 2712 100 139

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Tubagus Noor R, S.T., M.Sc.....(Pembimbing)
2. Mas Irfan P. H, S.T., M.Sc., Ph.D.....(Pembimbing)



“Halaman ini sengaja dikosongkan”

**ANALISIS SPRINGBACK PADA TUBE TITANIUM
BERPENAMPANG SEGIEMPAT PADA PROSES
ROTARY DRAW BENDING**

Nama Mahasiswa : Iman Satria Sidabutar
NRP : 2712 100 139
Pembimbing : Tubagus Noor R, S.T., M.Sc
Mas Irfan P. H, S.T., M.Sc., Ph.D

ABSTRAK

Dalam memenuhi kebutuhan proses industri, khususnya penerbangan dan industri pesawat luar angkasa, titanium tube menjadi bagian yang sangat penting. Untuk mengoptimalkan proses tube bending diperlukan pengertian lebih mendalam terhadap fenomena springback, agar hasil yang didapatkan lebih presisi. Pada penelitian ini dilakukan analisis springback menggunakan Finite Element Method dengan bantuan software ANSYS 15.0. Variasi yang digunakan pada penelitian ini yaitu sudut bending, ukuran sisi tube, dan ketebalan dinding tube. Diharapkan hasil permodelan ini dapat digunakan sebagai batu loncatan untuk penelitian berikutnya. Dari hasil penelitian didapatkan hasil bahwa springback terjadi setelah proses bending dan setelah pelepasan alat (remove tooling). Semakin besar sudut bending maka springback yang dihasilkan juga semakin besar, namun apabila ketebalan dinding tube bertambah besar maka springback yang dihasilkan bertambah kecil. Pengaruh ukuran sisi tube dan ketebalan dinding tube dapat dinyatakan dengan faktor geometri atau k . Semakin besar nilai k , maka semakin besar juga nilai springbacknya.

Kata kunci: springback, titanium, rotary draw bending, metode elemen hingga

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

SPRINGBACK ANALYSIS OF RECTANGULAR TITANIUM TUBE IN ROTARY DRAW BENDING

Name : Iman Satria Sidabutar
NRP : 2712 100 139
Advisors : Tubagus Noor R, S.T., M.Sc
Mas Irfan P. H, S.T., M.Sc., Ph.D

ABSTRACT

In meeting the needs of the process industry, especially the aviation and aerospace industry, titanium tubes become a very important part. To optimize the tube bending process required a deeper understanding of the springback phenomenon, in order to obtain more precise results. In this research, the springback is analyzed using the Finite Element Method with software ANSYS 15.0. Variations used in this research are the bending angle, size dimension of the tube, and tube wall thickness. Expected results of this modeling can be used as a springboard for the next study. Results of this research showed that springback occurred after the bending process and after the remove tooling. The greater the bending angle, the produced springback is also larger, but as the tube wall thickness grows, the springback decrease. The influence of size dimension of the tube and the tube wall thickness can be expressed by the geometry factor or k . The greater the value of k , the greater the springback value.

Keywords: *springback, titanium, rotary draw bending, finite element method*

“This page is intentionally left blank”

KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa atas segala berkat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Laporan Tugas Akhir yang berjudul “**Analisis Springback Pada Tube Titanium Berpenampang Segiempat Pada Proses Rotary Draw Bending**”

Penyusunan laporan ini merupakan salah satu tugas yang harus diselesaikan untuk meraih gelar Sarjana Teknik dan memenuhi mata kuliah Tugas Akhir.

Pada kesempatan ini penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada :

1. Kedua orang tua saya yang telah memberikan doa, semangat dan nasihat yang sangat bermanfaat.
2. Kedua kakak saya yang memberikan dukungan, motivasi, dan berbagi pengalaman yang membangun.
3. Bapak Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D, Tubagus Noor R, S.T., M.Sc, dan Ir. Rochman Rochiem, M.Sc selaku dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan, fasilitas dan motivasi.
4. Seluruh dosen dan karyawan Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS.
5. Teman-teman Teknik Material dan Metalurgi angkatan 2012 dan keluarga MT 14 yang telah memberikan dukungan dan saran. Juga Veteran MT 14, sebagai saudara seperjuangan.
6. Teman-teman kontrakan saya yang sudah memberi dukungan dan hiburan disaat saya kurang motivasi.
7. Keluarga Superteam Public Relation ITS EXPO yang selalu menemani, mendukung, dan memberikan canda tawa di setiap pertemuan.
8. Teman-teman di ITS, Konseptor ITS EXPO 2015, Cak Ning Teritori 4 Gerigi ITS 2015, dan Kominfo Cinta 13/14 yang menemani dan memberikan dukungan.

9. DOTA 2, sebagai game yang selalu menemani saya saat merasa jenuh.
10. Warnet 3Kingdom, Mas Awang, dan Mas Arif, selaku OP Warnet. Juga tim BG-T, yang menemani saya selama bermain DOTA 2.
11. Bomb Me dan Guild Indonesia, yang memberikan hiburan disaat jenuh,
12. Kota Surabaya, Mas dan Mbak, dan orang-orang luar biasa yang saya temui di Surabaya, yang telah menemani, memberikan cerita dan menjadi panutan pengalaman selama saya tinggal di Surabaya; serta
13. Semua pihak yang tidak bisa disebutkan satu per satu.

Penulis menyadari adanya keterbatasan di dalam penyusunan laporan tugas akhir ini. Besar harapan penulis akan saran, dan kritik yang sifatnya membangun. Selanjutnya semoga tulisan ini dapat bermanfaat.

Surabaya, Januari 2017

Penulis

DAFTAR ISI

LEMBAR JUDUL	
TITLE	
LEMBAR PENGESAHAN	i
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	v
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xv
BAB I PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Perumusan Masalah	2
1.3. Batasan Penelitian	2
1.4. Tujuan Penelitian	2
1.5. Manfaat Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1. Penelitian Mengenai Pemodelan Proses Rotary Draw Bending.....	5
2.2. Rotary Draw Bending	11
2.3. Springback	13
2.4. Metode Elemen Hingga.....	15
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	
3.1. Metode Penelitian	17
3.2. Spesifikasi Material dan Parameter.....	18
3.2.1. Material Tube.....	18
3.2.2. Geometri Tube	19
3.2.3. Rotary Draw Bending	20
3.3. Peralatan.....	20
3.4. Proses Pemodelan	21
3.4.1. Preference dan Preprocessor	22
3.4.2. Meshing	22
3.4.3. Tipe Pembebanan.....	22
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	

4.1. Analisis Hasil	24
4.1.1. Hasil Springback	24
4.1.2. Hasil Von Mises Stress	49
4.3. Pembahasan.....	85
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1. Kesimpulan	89
5.2. Saran.....	89
DAFTAR PUSTAKA	xvii
BIODATA PENULIS	xix
LAMPIRAN.....	xxi

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Distribusi tangential stress dalam proses bending .	5
Gambar 2.2	Parameter tube bending.....	6
Gambar 2.3	Letak titik A	6
Gambar 2.4	Kurva displacement terhadap waktu pada titik A ..	7
Gambar 2.5	Sketsa springback pada tube bending	9
Gambar 2.6	Variasi sudut springback.....	10
Gambar 2.7	Rotary draw bending.....	11
Gambar 2.8	Diagram benda bebas RDB.....	12
Gambar 2.9	Bend die	13
Gambar 2.10	Pressure die	13
Gambar 2.11	Springback	14
Gambar 2.12	Kurva tegangan-regangan	15
Gambar 2.13	Proses pengerjaan pada MEH	16
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian	17
Gambar 3.2	Geometri tube - Dimensi penampang tube.....	20
Gambar 3.3	Desain Rotary Draw Bending	20
Gambar 3.4	Diagram alir pemodelan menggunakan MEH.....	21
Gambar 3.5	Meshing.....	22
Gambar 4.1	Displacement tube 4x4 cm pada sudut 30°	25
Gambar 4.2	Displacement tube 4x4 cm pada sudut 60°	26
Gambar 4.3	Displacement tube 4x4 cm pada sudut 90°	27
Gambar 4.4	Displacement tube 4x4 cm pada sudut 120°	28
Gambar 4.5	Displacement tube 4x4 cm pada sudut 180°	29
Gambar 4.6	Grafik springback hasil simulasi dan perhitungan rumus tube 4x4 cm	30
Gambar 4.7	Displacement tube 4x2 cm pada sudut 30°	31
Gambar 4.8	Displacement tube 4x2 cm pada sudut 60°	32
Gambar 4.9	Displacement tube 4x2 cm pada sudut 90°	33
Gambar 4.10	Displacement tube 4x2 cm pada sudut 120°	34
Gambar 4.11	Displacement tube 4x2 cm pada sudut 180°	35
Gambar 4.12	Grafik springback hasil simulasi dan perhitungan rumus tube 4x2 cm	36
Gambar 4.13	Displacement tube 5x3 cm pada sudut 30°	37

Gambar 4.14	Displacement tube 5x3 cm pada sudut 60°	38
Gambar 4.15	Displacement tube 5x3 cm pada sudut 90°	39
Gambar 4.16	Displacement tube 5x3 cm pada sudut 120°	40
Gambar 4.17	Displacement tube 5x3 cm pada sudut 180°	41
Gambar 4.18	Grafik springback hasil simulasi dan perhitungan rumus tube 5x3 cm	42
Gambar 4.19	Grafik springback dengan variasi ukuran sisi tube secara simulasi dan perhitungan rumus.....	44
Gambar 4.20	Displacement tube 4x4 cm pada sudut 90° dengan ketebalan 1 mm	45
Gambar 4.21	Displacement tube 4x4 cm pada sudut 90° dengan ketebalan 2 mm	46
Gambar 4.22	Displacement tube 4x4 cm pada sudut 90° dengan ketebalan 3 mm	47
Gambar 4.23	Grafik springback dengan variasi ketebalan dinding tube secara simulasi dan perhitungan rumus	48
Gambar 4.24	Von Mises stress tube 4x4 cm pada sudut 30° saat proses Loading - Unloading	50
Gambar 4.25	Von Mises stress tube 4x4 cm pada sudut 60° saat proses Loading - Unloading	52
Gambar 4.26	Von Mises stress tube 4x4 cm pada sudut 90° saat proses Loading - Unloading	54
Gambar 4.27	Von Mises stress tube 4x4 cm pada sudut 120° saat proses Loading - Unloading	56
Gambar 4.28	Von Mises stress tube 4x4 cm pada sudut 180° saat proses Loading - Unloading	58
Gambar 4.29	Von Mises stress tube 4x2 cm pada sudut 30° saat proses Loading - Unloading	60
Gambar 4.30	Von Mises stress tube 4x2 cm pada sudut 60° saat proses Loading - Unloading	62
Gambar 4.31	Von Mises stress tube 4x2 cm pada sudut 90° saat proses Loading - Unloading	64
Gambar 4.32	Von Mises stress tube 4x2 cm pada sudut 120° saat proses Loading - Unloading	66

Gambar 4.33 Von Mises stress tube 4x2 cm pada sudut 180° saat proses Loading - Unloading	68
Gambar 4.34 Von Mises stress tube 5x3 cm pada sudut 30° saat proses Loading - Unloading	70
Gambar 4.35 Von Mises stress tube 5x3 cm pada sudut 60° saat proses Loading - Unloading	72
Gambar 4.36 Von Mises stress tube 5x3 cm pada sudut 90° saat proses Loading - Unloading	74
Gambar 4.37 Von Mises stress tube 5x3 cm pada sudut 120° saat proses Loading - Unloading	76
Gambar 4.38 Von Mises stress tube 5x3 cm pada sudut 180° saat proses Loading - Unloading	78
Gambar 4.39 Von Mises stress tube 4x4 cm pada sudut 90° dengan ketebalan 1 mm saat proses Loading - Unloading	80
Gambar 4.40 Von Mises stress tube 4x4 cm pada sudut 90° dengan ketebalan 2 mm saat proses Loading - Unloading	82
Gambar 4.41 Von Mises stress tube 4x4 cm pada sudut 90° dengan ketebalan 3 mm saat proses Loading - Unloading	84
Gambar 4.42 Grafik pengaruh ketebalan dinding tube terhadap faktor geometri	86

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Komposisi kimia CP-Ti Grade 2	18
Tabel 3.2 Sifat material CP-Ti Grade 2	18
Tabel 3.3 Variasi Pemodelan.....	19
Tabel 4.1 Springback hasil simulasi dan perhitungan rumus ...	30
Tabel 4.2 Springback hasil simulasi dan perhitungan rumus ...	36
Tabel 4.3 Springback hasil simulasi dan perhitungan rumus ...	42
Tabel 4.4 Springback hasil simulasi dan perhitungan rumus ...	43
Tabel 4.5 Springback hasil simulasi dan perhitungan rumus ...	45
Tabel 4.6 Faktor geometri tiap ketebalan tube	86

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Seiring dengan perkembangan teknologi yang semakin maju, penggunaan metal tubing juga semakin banyak, terutama pada sektor industri dan komersial. Untuk memproduksi beberapa bagian/komponen struktur maupun permesinan dibutuhkan proses bending. Metode-metode untuk bending tersebut berupa: *rotary draw bending*, *compression bending*, *ram bending*, dan *roll bending*. Dimana metode *rotary draw bending* merupakan metode yang umumnya digunakan. Tube titanium banyak digunakan pada industri pesawat luar angkasa maupun dunia penerbangan mengingat kegunaannya sangat penting yaitu memiliki sifat tahan korosi yang sangat baik.

Namun setelah proses bending, terjadi fenomena *springback*. *Springback* terjadi ketika metal telah mengalami bending dan kemudian berusaha kembali ke bentuk semula. Terdapat dua pandangan mengenai fenomena ini. Pertama, ini terjadi karena adanya perpindahan molekul, sedangkan yang kedua menganggap karena keterkaitan pada diagram kurva tegangan-regangan. Salah satu alasan terjadinya *springback* karena pada material yang dibengkokan, pada bagian dalamnya mengalami tegangan dan pada bagian luar mengalami regangan.

Deformasi yang terjadi setelah proses bending tergolong cukup rumit karena dipengaruhi oleh banyak faktor. Oleh sebab itu, dilakukan penelitian mengenai analisis *springback* pada tube titanium dalam proses *rotary draw bending*.



1.2 Perumusan Masalah

Masalah pada penelitian ini yaitu:

1. Bagaimana pengaruh sudut bending terhadap *springback* yang dihasilkan pada pemodelan tube bending dengan material CP Ti-2 pada proses *rotary draw bending*?
2. Bagaimana pengaruh ukuran sisi tube terhadap *springback* yang dihasilkan pada pemodelan tube bending dengan material CP Ti-2 pada proses *rotary draw bending*?
3. Bagaimana pengaruh ketebalan dinding tube terhadap *springback* yang dihasilkan pada pemodelan tube bending dengan material CP Ti-2 pada proses *rotary draw bending*?

1.3 Batasan Penelitian

Batasan masalah yang digunakan dalam penelitian ini agar penelitian yang dilakukan menjadi lebih terarah adalah sebagai berikut:

1. Material isotropik dan homogen
2. Tidak menganalisis aktivitas termal

1.4 Tujuan Penelitian

Penelitian ini memiliki tujuan sebagai berikut:

1. Menganalisis pengaruh sudut bending terhadap *springback* yang dihasilkan pada pemodelan tube bending dengan material CP Ti-2 pada proses *rotary draw bending*?
2. Menganalisis pengaruh ukuran sisi tube terhadap *springback* yang dihasilkan pada pemodelan tube bending dengan material CP Ti-2 pada proses *rotary draw bending*?
3. Menganalisis pengaruh ketebalan dinding tube terhadap *springback* yang dihasilkan pada pemodelan tube bending dengan material CP Ti-2 pada proses *rotary draw bending*?



1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah sebagai referensi pengembangan dalam proses manufaktur lanjut (*advanced manufacturing process*) dalam dunia industri dan sebagai referensi untuk peneliti-peneliti berikutnya dalam membuat prototipe dari metode ini.



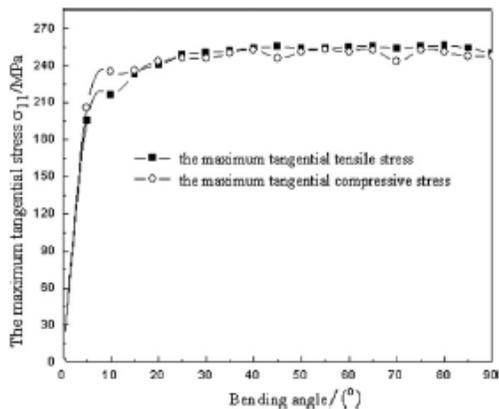
“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Mengenai Pemodelan Proses Rotary Draw Bending

Zhao (2009) melakukan pemodelan dan simulasi dengan *software* ABAQUS pada proses *rotary draw bending* dengan *tube* berpenampang segiempat. Material yang digunakan pada penelitian ini adalah paduan aluminium 3A21. Pada penelitian ini terdapat 2 kondisi simulasi dimana pada kondisi pertama tidak adanya penggunaan *mandrel*. Sedangkan pada kondisi kedua menggunakan *mandrel*. Pada kondisi pertama, didapatkan hasil bahwa pada *tube* terjadi *wrinkling*, sedangkan pada kondisi kedua, tidak ditemukan adanya *wrinkling*. Dalam analisis distribusi *tangential stress* didapatkan bahwa terjadi peningkatan pada bagian awal, namun kemudian perlahan tidak mengalami perubahan seiring dengan proses *bending*. Hasil distribusi *tangential stress*-nya ditunjukkan pada Gambar 2.1 berikut.



Gambar 2.1 Distribusi tangential stress dalam proses bending (Zhao, 2009)

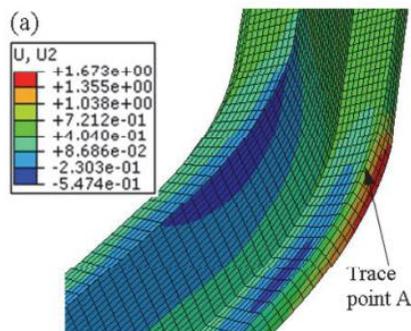


Xue (2014) melakukan analisis tentang *twist springback* dari *asymmetric thin-walled tube* dengan proses *rotary draw bending*. Material yang digunakan adalah paduan aluminium (AA6060-T4) dengan ketebalan 2 mm, Modulus Young $E = 51$ GPa, dan Poisson's ratio 0.33. Parameter *tube bending* dapat dilihat pada Gambar 2.2 di bawah ini:

No.	Parameters	Values
1	Bending velocity, ω /(rad/s)	0.523
2	Bend angle, θ ($^{\circ}$)	45
3	Speed of Mandrel retracted, V_m (mm/s)	100
4	Minimum bend radius, R /(mm)	116
5	Speed of pressure die, V_p (mm/s)	50.5
6	Clearances between tube and tools (mm)	0.1
7	Booster, P_b (MPa)	0.3
8	Wiper die rake angle, δ ($^{\circ}$)	1
9	Mandrel flexible cores	5

Gambar 2.2 Parameter tube bending (Xue, 2014)

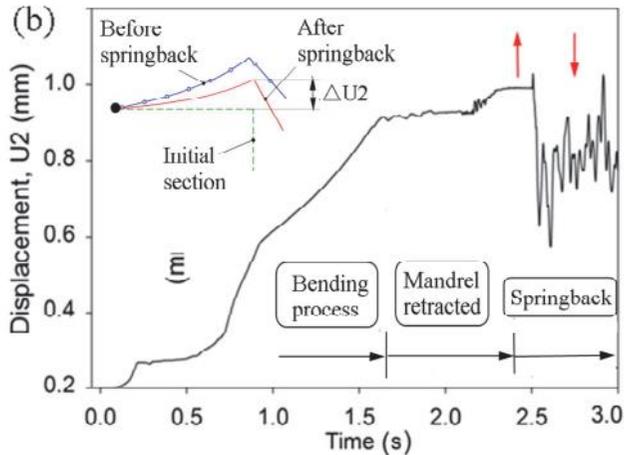
Pada proses penyelesaian diambil sebuah titik A dimana dijadikan titik yang ingin diamati untuk mengetahui *displacement*-nya. Titik A dapat dilihat pada Gambar 2.3 dibawah ini:



Gambar 2.3 Letak titik A (Xue 2014)



Setelah dilakukan pengamatan pada titik A maka dapat dibuat kurva dari displacement yang didapat yang ditunjukkan pada Gambar 2.4 dibawah ini:



Gambar 2.4 Kurva displacement terhadap waktu pada titik A (Xue, 2014)

Dengan menggunakan simulasi metode elemen hingga, Murata (2008) telah meneliti tentang *springback* pada tube paduan aluminium dan tube baja tahan karat pada proses *draw bending* dan *press bending*. Mereka menemukan bahwa pengaruh pengerasan hanya menghasilkan efek yang kecil pada *springback*. Mereka mencoba meneliti efek dari properti material yang mengalami proses pengerasan atau *hardening* pada proses bending tube. Penelitian dilakukan dengan melihat radius *bending*, distribusi regangan, *springback*, dan *flatness* sebagai parameter yang diteliti dengan analisa menggunakan metode elemen hingga dan hasil eksperimen pada proses *press bending*. Hasil dari penelitian ini adalah mengenai efek dari properti material tube, seperti *hardening exponent* n . Efek dari eksponen pengerasan sudah sangat jelas pada



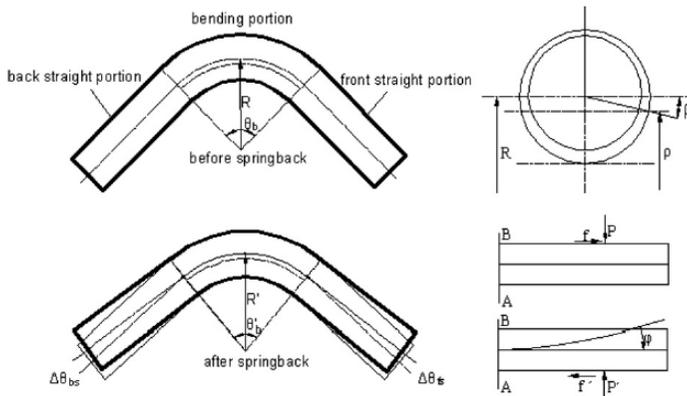
penelitian mengenai *bending tube*. Eksponen pengerasan dari n tidak memiliki efek terhadap fenomena *springback*, distribusi regangan ketebalan, dan rasio *flatness* pada dimensi tube dengan radius *bending* yang sama.

Paulsen (1996) melakukan analisa elemen hingga tiga dimensi elastis-plastis dimana fokus analisa tersebut adalah pada proses *bending* paduan aluminium. Mereka menemukan bahwa *springback* dipengaruhi oleh karakteristik dari pengerasan regangan dan jumlah dari beban aksial, termasuk penurunan pengerasan regangan dan kenaikan tegangan yang mereduksi terjadi *springback*. Fokus utama dari penelitian ini adalah efek dari sifat material, *slenderness* dari penampang, dan geometri *die* berdasarkan geometri yang ada. Pengaruh lainnya adalah dengan memberikan eksternal *pre-stretching* dan penopang internal untuk mendapatkan toleransi yang lebih baik lagi. Hasil dari penelitian sudah divalidasi dengan beberapa kali pengetestan melalui laboratorium dan juga mesin *bending* yang ada di industry. Hasil dari penelitian tersebut menyatakan bahwa *wrinkles* dapat dihindari dengan mengaplikasikan *mandrel* internal dengan kondisi statis. Dan juga dapat dilihat bahwa *pre-stretching* eksternal memiliki kelebihan tersendiri untuk mereduksi terjadinya *buckling* lokal dan *springback*. *Springback* elastis dipengaruhi oleh karakteristik *strain-hardening* dan jumlah beban aksial yang diterapkan, keduanya akan menurunkan *strain hardening* dan menaikkan tegangan yang akan mereduksi kemungkinan terjadinya *springback*.

Gu (2008) menyusun sebuah model elemen hingga untuk proses bending dari tube dinding tipis dengan material paduan aluminium yang dikontrol secara numerik dan memperoleh efek geometri, material dan parameter proses terhadap *springback*. Hasilnya menunjukkan bahwa sudut *springback* akan meningkat seiring dengan radius bending dan *Poisson's ratio*. Keseluruhan proses dari bending yang dikontrol numerik mencakup tiga proses yaitu proses bending tube, pengeluaran *mandrel*, dan *springback*. Berdasarkan pada simulasi numerik dari keseluruhan proses,



mekanisme *springback* dan aturan *bending tube* berding tipis akan terlihat. Pada saat terjadi *springback*, sudut dari bending akan menurun dan radius dari *bending* akan meningkat. Total sudut *springback* dengan mempertimbangkan proses pengeluaran mandrel akan lebih kecil dibandingkan dengan tidak dipertimbangkannya pengeluaran mandrel dan perbedaan maksimum keduanya yang ada pada penelitian adalah 107,34%. Proses pengeluaran mandrel harus dipertimbangkan untuk memprediksi secara akurat *springback* yang terjadi pada tube berding tipis. Total sudut *springback* meningkatkan secara linear dengan meningkatnya sudut *bending* saat sudut *bending* tersebut besar. Radius *springback* dapat diperoleh berdasarkan panjang lapisan netral yang tidak berubah selama mekanisme *springback* berlangsung. Perubahan panjang *bending* saat *springback* berlangsung, biasanya sangat kecil sehingga dapat diabaikan ketika radius *springback* dihitung. Radius *springback* independen terhadap sudut *bending* dan peningkatan secara linear dari sudut *springback* dengan meningkatnya sudut *bending* dapat digunakan untuk menghitung radius dari *springback*.

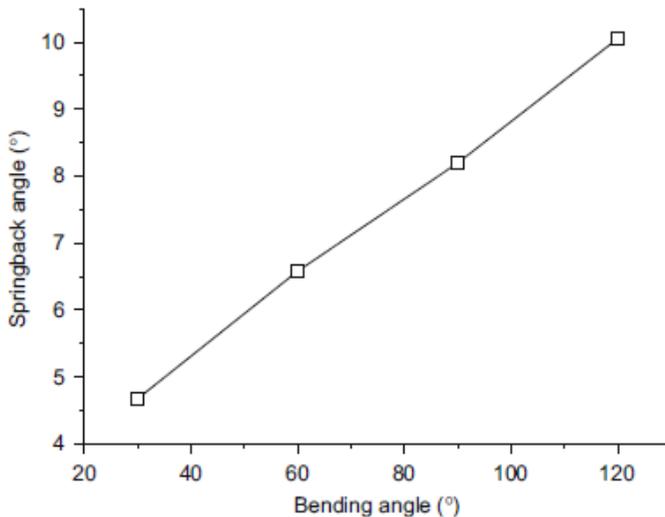


Gambar 2.5 Sketsa springback pada tube bending (Gu, 2008)



Song (2013) melakukan simulasi analisis *springback* pada HSTT (Ti-3Al-2.5V) *tube*, dengan spesifikasi geometri sebesar 9.525 mm x 0.508 mm. Dimana hasil yang didapat dari simulasi pemodelan dibandingkan dengan hasil yang didapat dari eksperimen. Terbukti bahwa simulasi dengan *software* yang dilakukan secara tepat memprediksi sesuai dengan yang dilakukan melalui metode eksperimen.

Jiang (2010) melakukan penelitian mengenai *bending* pada *titanium alloy tube* dengan menggunakan metode elemen hingga pada *software* ABAQUS. Didapatkan hasil variasi pada *springback* sesuai dengan variasi sudut *bending*. Hasilnya tampak pada Gambar 2.6 berikut



Gambar 2.6 Variasi sudut *springback* (Jiang,2010)

Penelitian berikutnya dilakukan oleh Thorat (2015) dengan menganalisis *springback* pada proses *rotary draw bending* secara simulasi dan perhitungan matematis. Kemudian didapatkan hasil bahwa *maximum stress* dan besar *springback* semakin bertambah



seiring bertambahnya sudut bending. Thorat juga merumuskan rumus untuk menghitung besarnya sudut akhir setelah proses bending sebagai berikut:

$$\theta_U = \theta_L \left(1 - \frac{R_L M_L}{EI}\right) \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

dimana, θ_U = Sudut akhir, θ_L = Sudut bending, R = Jarak bending, M = Momen bending, E = Modulus Elastisitas, dan I = Momen Inersia tube.

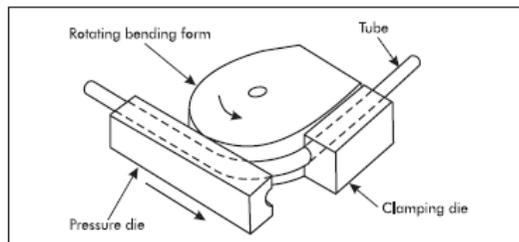
Menurut Tang (2000) besarnya Momen bending (M) dapat dinyatakan dengan

$$M = Z \sigma_s \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

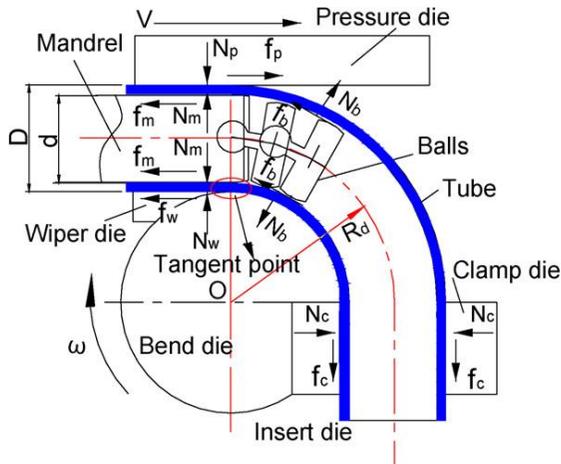
dimana, Z = Section Modulus, dan σ_s = Yield Stress.

2.2 Rotary Draw Bending

Draw bending merupakan metode yang paling umum digunakan pada mesin bending dengan putaran, dimana dapat dikontrol secara manual, menggunakan tenaga (hidrolik, pneumatik, mekanik/elektrik), ataupun numerik. Komponen yang penting pada proses ini adalah *rotating bending form*, *clamp die*, *wiper die* dan *pressure die*, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.7. Diagram benda bebas pada *rotary draw bending* ditunjukkan pada Gambar 2.8.



Gambar 2.7 Rotary draw bending



Gambar 2.8 Diagram benda bebas RDB (Yang, 2010)

Arah gaya pada komponen mesin *rotary draw bending* adalah sebagai berikut. *Bend die* yang berfungsi untuk memutar/menarik tube memberikan gaya rotasi sesuai arah bending. *Clamp die* yang berfungsi untuk mengunci bagian depan dari tube agar tidak melebar memberikan gaya normal ke bagian dalam juga memberikan gaya tekan sesuai arah bending. Sehingga memberikan gaya reaksi berupa gaya gesekan berlawanan dengan arah bending. *Pressure die* dan *wiper die* yang masing-masing merupakan penahan bagi tube baik dibagian atas maupun bawah dari tube memberikan masing-masing gaya tekan ke bagian dalam tube. Karena tube mengalami pergerakan dan terdapat *contact* dengan masing-masing die, maka terjadi reaksi yaitu gaya gesek yang berlawanan dengan arah bending.

Bend die merupakan komponen utama pada *rotary draw*. Terletak berlawanan dengan tube dan berfungsi untuk menghasilkan bengkokan pada tube. Spesifikasi yang penting karena *bend die* adalah diameter luar dan juga *bend radius* dari tube.



Gambar 2.9 Bend die

Pressure die merupakan komponen yang menahan tube saat mendapat tekanan dari mesin bending dimana terletak searah dengan tube, juga merupakan terjadinya titik awal bengkok/bend. *Pressure die* bersifat stasioner, yaitu tetap diam selama *bend die* bergerak.



Gambar 2.10 Pressure die

Clamp die merupakan bagian yang berlawanan dengan *clamping section* pada *bend die*. Bagian ini sangat penting karena bertugas mencegah terjadinya slip pada tube ketika rotasi terjadi, sehingga panjang dari clamp die ini haruslah mencukupi. Panjang dari *clamp die* ini dipengaruhi oleh diameter tube, ketebalan dinding, dan material.

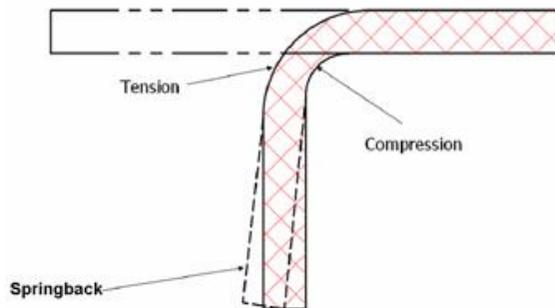


Wiper die ini berfungsi untuk membantu mencegah terjadinya wrinkling pada bagian dalam dari dinding tube.

Mandrel adalah alat yang dimasukkan ke dalam di bagian *bend tangent*. Fungsi dari *mandrel* ini ialah mencegah terjadinya *flattening* dan *wrinkling* pada tube. *Mandrel* ini terdiri dari berbagai macam jenis, namun yang umum digunakan untuk mendapatkan hasil maksimal adalah *steel ball mandrel*. (Thorat, 2015)

2.3 Springback

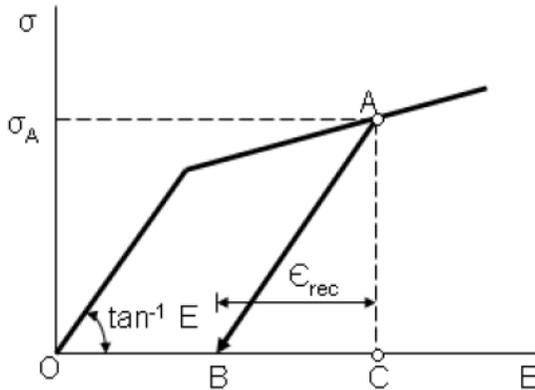
Fenomena pelepasan elastis yang terjadi dalam berbagai sudut ini terjadi saat *tooling* yang ada dilepas. Hal ini terjadi karena pada bagian *extrados* terjadi *elongation deformation* sedangkan pada bagian *intrados* terjadi *compression deformation*. Hal ini menyebabkan berkurangnya sudut *bending* dan bertambahnya radius *bending*. Fenomena *springback* ini mempengaruhi kepresisian baik secara bentuk maupun geometri dan juga menjadi penghambat dalam usaha memperoleh produk dengan kualitas *bending* yang baik, dan murah. Gambar 2.10 dibawah ini merupakan contoh dari *springback*.



Gambar 2.11 Springback (Thorat, 2015)



Mekanisme *springback* ini dapat memberikan kita persamaan untuk mencari *springback*. Gambar 2.11 dibawah ini menunjukkan kurva tegangan regangan pada material yang ter-*strain hardening* secara linear.



Gambar 2.12 Kurva tegangan-regangan

Ketika beban dilepaskan pada titik A, maka jalur pelepasan beban ditunjukkan dengan garis AB.

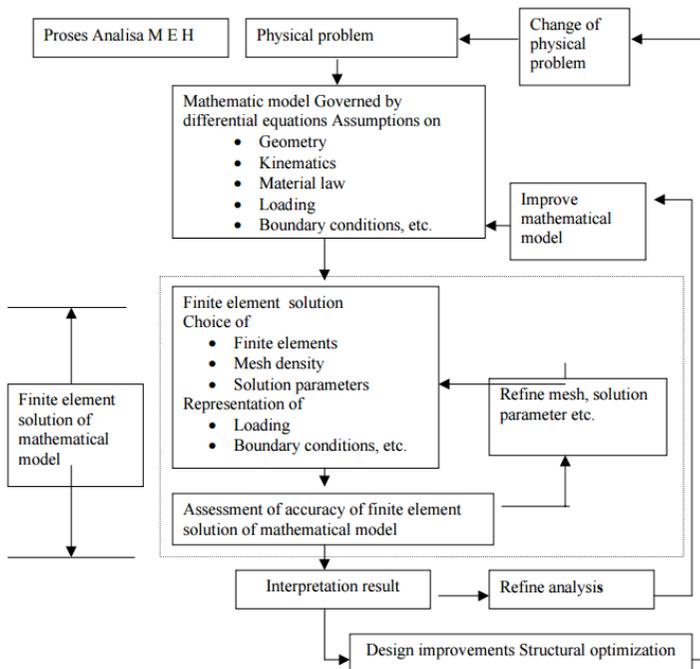
2.4 Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga merupakan metode numerik dengan basis komputasi untuk memecahkan persoalan pada bidang *engineering*.

Geometri akan dibagi menjadi elemen-elemen yang lebih kecil di mana masing-masing elemen *node* yang digunakan untuk mewakili nilai variabel (contohnya, temperatur, tegangan dan perpindahan panas) yang membawahi elemen fungsi interpolasi (disebut juga fungsi aproksimasi). Persamaan matriks menjabarkan sifat-sifat setiap elemen. Hal tersebut ditentukan dengan menggunakan salah satu dari tiga pendekatan, yaitu; pendekatan langsung, pendekatan variasional, atau pendekatan *weighted*



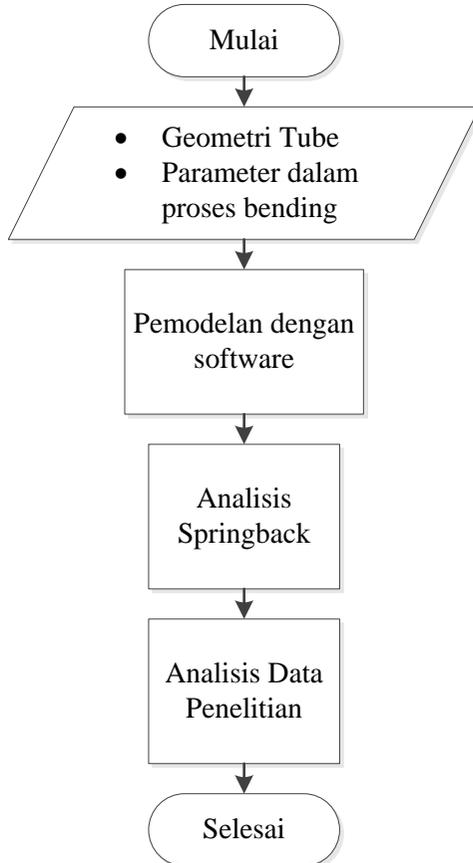
residual. Setiap persamaan matriks digabungkan untuk menemukan persamaan sistem secara keseluruhan. Nilai nodal dari variabel lapangan dimasukkan pada persamaan sistem. Nilai nodal yang tidak diketahui dari masalah akan diperoleh dengan menyelesaikan persamaan sistem. Masalah teknik yang umum ditangani oleh Metode Elemen Hingga antara lain adalah: struktural, termal, aliran fluida, listrik, magnet, kebisingan akustik dan lain - lain.



Gambar 2.13 Proses pengerjaan pada MEH

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian



3.2 Spesifikasi Material dan Parameter

3.2.1 Material Tube

Pada penelitian ini, material yang digunakan sebagai tube dalam proses bending adalah Commercially Pure Titanium Grade 2 (UNS R50400). Adapun komposisi dan sifat dari materialnya disajikan pada Tabel 3.1 dan Tabel 3.2

Tabel 3.1 Komposisi kimia CP-Ti Grade 2

Unsur	Wt. %
C	max 0.1
Fe	max 0.3
H	max 0.015
N	max 0.03
O	max 0.25
Ti	99.2

Tabel 3.2 Sifat material CP-Ti Grade 2

Density (kg/m ³)	4510
Hardness, Rockwell B	80
Poisson's Ratio	0.37
Tensile Strenght, Ultimate (MPa)	344
Tensile Strenght, Yield (MPa)	276-410
Elongation at Break	20%
Reduction of Area	35%
Modulus of Elasticity (GPa)	105
Compressive Modulus (GPa)	110

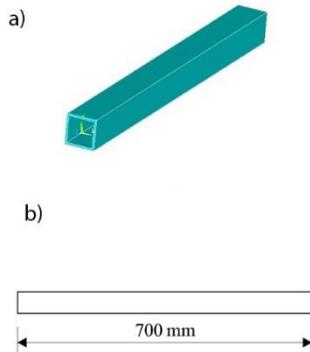


3.2.2 Geometri Tube

Geometri yang digunakan pada penelitian ini yaitu tube berpenampang segiempat. Variasi yang digunakan disajikan pada Tabel 3.3 berikut. Desain dimensi tube dapat dilihat pada Gambar 3.2 berikut

Tabel 3.3 Variasi Pemodelan

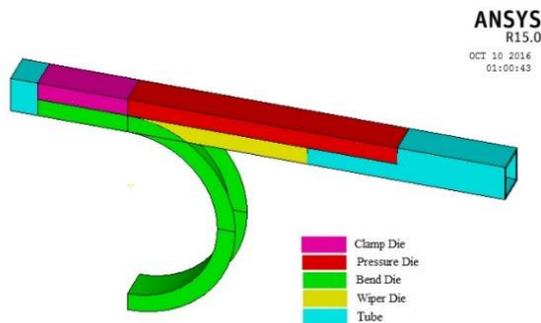
No	Ukuran Sisi Tube (cm)	Sudut Bending	Ketebalan Dinding Tube (mm)	Internal Pressure (MPa)
1	4 x 4	30	3	5
2		60		
3		90		
4		120		
5		180		
6	4 x 2	30	3	5
7		60		
8		90		
9		120		
10		180		
11	5 x 3	30	3	5
12		60		
13		90		
14		120		
15		150		
16	4 x 4	90	1	-
17			2	
18			3	



Gambar 3.2 a) Geometri tube b) Dimensi penampang tube

3.2.3 Rotary Draw Bending

Desain penampang dari alat rotary draw bending beserta komponennya ditunjukkan pada Gambar 3.3 berikut



Gambar 3.3 Desain Rotary Draw Bending

3.2 Peralatan

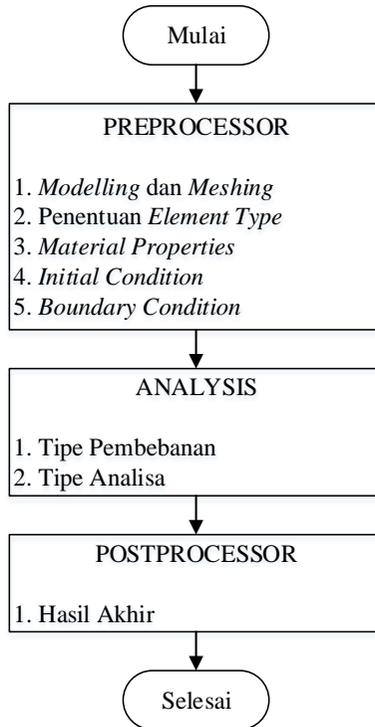
Peralatan yang digunakan dalam penelitian berupa perangkat lunak (*software*) berbasis metode elemen hingga yaitu ANSYS dengan modul Mechanical APDL Release 15.0 yang digunakan



untuk membuat pemodelan spring back dan memodelkan simulasi rotary draw bending.

3.4 Proses Pemodelan

Adapun diagram alir pemodelan *bending* dengan menggunakan ANSYS Mechanical APDL Release 15.0 dapat dilihat pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Diagram alir pemodelan menggunakan metode elemen hingga

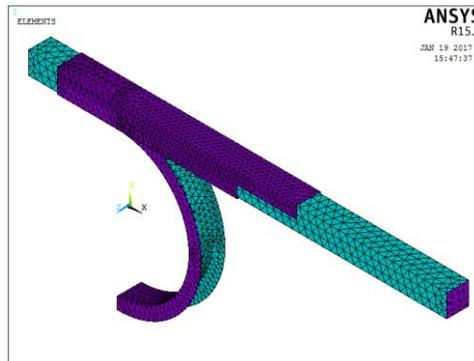


3.4.1 Preference dan Preprocessor

Tipe pemodelan pada penelitian ini yaitu menggunakan *Structural*. Element type yang digunakan pada pemodelan tube yaitu SHELL 181, sedangkan untuk die pada *rotary draw bending* dianggap rigid.

3.4.2 Meshing

Meshing yang digunakan pada penelitian ini menggunakan pola segitiga dengan ukuran *smart size* sebesar 3, dikarenakan simpel meskipun dibutuhkan lebih banyak agar lebih halus dan hasil lebih maksimal untuk *convergen*. Meshing yang digunakan pada pemodelan tube dan *rotary draw bending* ditunjukkan pada Gambar 3.5 berikut.



Gambar 3.5 Meshing

3.4.3 Tipe Pembebanan

Pembebanan yang digunakan pada penelitian ini yaitu *displacement* ke arah sumbu Z (ROTZ) dengan menggunakan *pilot node* pada *bend die*, dan *pressure* pada tube dengan nilai *face* = 1, atau *internal pressure*.

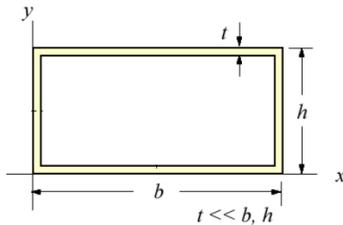
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini analisis *springback* dilakukan pada variasi geometri tube yaitu mencakup ukuran sisi dan ketebalan tube serta sudut bending. Variasi dimensi tube yang digunakan yaitu 4x4 cm, 4x2 cm, dan 5x3 cm serta ketebalan 1 mm, 2 mm, dan 3 mm. Sedangkan sudut bending yang digunakan sebesar 30°, 60°, 90°, 120° dan 180°.

Pemodelan analisis *springback* dimulai dengan mendesain geometri tube beserta seluruh die nya. Menggunakan CP-Ti Grade 2 sebagai material pada tube, sedangkan die dianggap sebagai rigid. Pada tube diberikan *internal pressure* sebesar 5 MPa untuk mencegah terjadinya *wrinkling*. Untuk analisis dengan variasi ketebalan, tidak diberikan *internal pressure*. Setelah memberikan contact pair antar bagian pada proses bending dan memberikan pembebanan berupa *displacement* arah sumbu Z (ROTZ), maka proses *solve* dilakukan. Hasil pertama menunjukkan bahwa telah terjadi *springback* namun nilainya sangat kecil. Maka selanjutnya dilakukan pelepasan atau *remove tooling*. Proses *remove tooling* mencakup mengeliminasi *internal pressure* dan juga pelepasan *pressure die* dan *clamp die* dengan menggunakan *Kill Elements*. Hasil yang didapat dari proses *remove tooling* menunjukkan adanya perubahan signifikan pada tube, tampak bahwa *springback* yang dihasilkan lebih besar dari sebelumnya.

Hasil yang didapat dari simulasi, kemudian dibandingkan dengan rumus perhitungan. Rumus perhitungan yang digunakan yaitu persamaan (2.1),

$$\theta_u = \theta_l \left(1 - \frac{R_l M_l}{EI} \right)$$



Dimana nilai M , momen bending sebesar:

$$M_l = Z\sigma_s$$

Dengan nilai Section Modulus, $Z = \frac{bh^2}{4} - (b - 2t) \left(\frac{h}{2} - t\right)^2$

4.1 Analisis Hasil

Pemodelan yang dilakukan adalah pemodelan pengaruh variasi ukuran sisi tube dan besar sudut bending terhadap besar *springback* pada proses *rotary draw bending*. Dimana variasi pemodelan terdapat pada Tabel 3.3. Hasil yang diamati yaitu besarnya *springback*, yaitu selisih antara sudut akhir yang dihasilkan ketika pelepasan alat (*remove tooling*) dan sudut bending yang diinginkan, serta besarnya *Von Mises stress* pada proses bending, atau besarnya stress yang dihasilkan selama proses bending baik sebelum dan sesudah *remove tooling*.

4.1.1 Hasil Springback

Displacement yang dilakukan pada pemodelan menunjukkan terjadinya *springback*, dimana tube mengalami ketidaksesuaian dengan besarnya sudut yang diharapkan. *Displacement* yang dianalisis adalah hasil setelah dilakukan pelepasan alat (*remove tooling*). Hasil yang didapat dari pemodelan kemudian dibandingkan dengan perhitungan rumus. Berikut hasil *springback* yang dihasilkan pada tube 4x4 cm, 4x2 cm, dan 5x3 cm dengan masing-masing ketebalan 3 mm dan diberi *internal pressure*



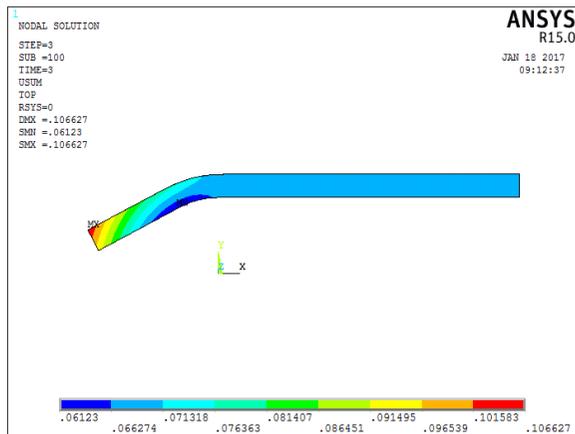
sebesar 5 MPa, serta pada tube 4x4 cm dengan ketebalan dinding tube 1 mm, 2 mm, dan 3 mm tanpa diberikan internal pressure.

4.1.1.1 Tube 4x4 cm

Berikut hasil data *springback* yang dihasilkan melalui *displacement* pada simulasi pemodelan pada tube 4x4 cm dengan ketebalan 3 mm dan diberikan internal pressure sebesar 5 MPa dengan variasi sudut bending sebesar 30°, 60°, 90°, 120° dan 180°.

a) Sudut 30°

Hasil *displacement* pada simulasi pemodelan pada tube 4x4 cm dengan ketebalan 3 mm dan diberikan *internal pressure* sebesar 5 MPa dengan besar sudut bending sebesar 30° ditunjukkan pada Gambar 4.1 berikut.



Gambar 4.1 Displacement tube 4x4 cm pada sudut 30°

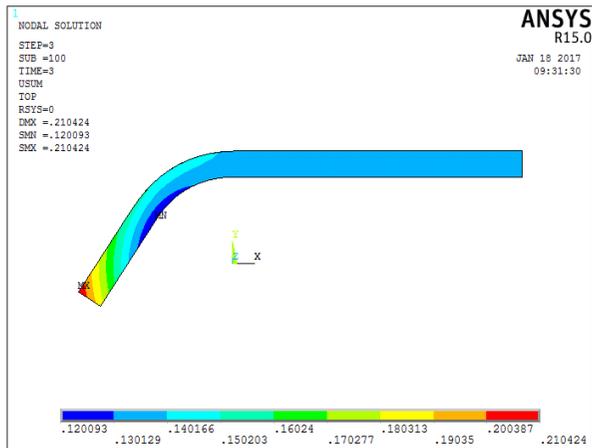
Pada Gambar 4.1 dapat dilihat bahwa proses dari bending tidak sempurna. Dapat dilihat bahwa terjadi perpindahan tube dari sudut bending yang telah ditentukan. Perpindahan ini terjadi karena adanya *recovery* elastis pada tube yang mengalami proses bending. Dari perpindahan tersebut dapat diketahui besarnya *springback* dari tube. Besarnya *springback* yang dihasilkan pada simulasi adalah



sebesar 2.164° sedangkan besarnya *springback* yang dihasilkan menurut perhitungan rumus adalah sebesar 1.065° .

b) Sudut 60°

Hasil *displacement* pada simulasi pemodelan pada tube 4x4 cm dengan ketebalan 3 mm dan diberikan *internal pressure* sebesar 5 MPa dengan besar sudut bending sebesar 60° ditunjukkan pada Gambar 4.2 berikut.



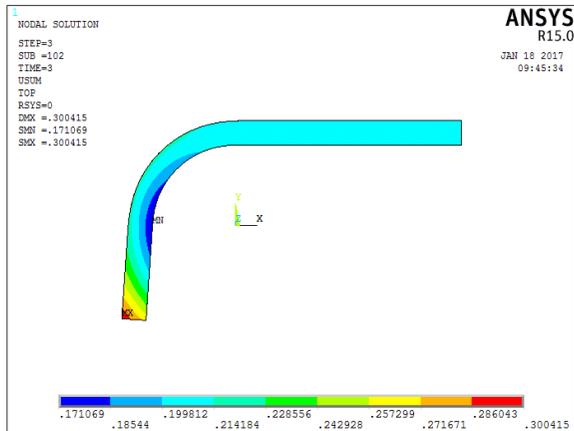
Gambar 4.2 Displacement tube 4x4 cm pada sudut 60°

Pada Gambar 4.2 dapat dilihat bahwa proses dari bending tidak sempurna. Dapat dilihat bahwa terjadi perpindahan tube dari sudut bending yang telah ditentukan. Perpindahan ini terjadi karena adanya *recovery* elastis pada tube yang mengalami proses bending. Dari perpindahan tersebut dapat diketahui besarnya *springback* dari tube. Besarnya *springback* yang dihasilkan pada simulasi adalah sebesar 3.058° sedangkan besarnya *springback* yang dihasilkan menurut perhitungan rumus adalah sebesar 2.130° .



c) Sudut 90°

Hasil *displacement* pada simulasi pemodelan pada tube 4x4 cm dengan ketebalan 3 mm dan diberikan *internal pressure* sebesar 5 MPa dengan besar sudut bending sebesar 90° ditunjukkan pada Gambar 4.3 berikut.

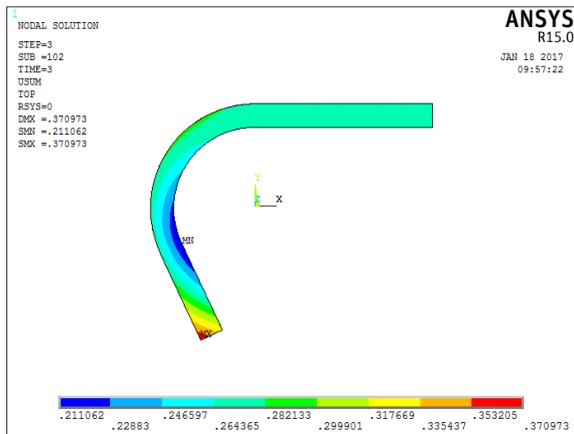


Gambar 4.3 Displacement tube 4x4 cm pada sudut 90°

Pada Gambar 4.3 dapat dilihat bahwa proses dari bending tidak sempurna. Dapat dilihat bahwa terjadi perpindahan tube dari sudut bending yang telah ditentukan. Perpindahan ini terjadi karena adanya *recovery* elastis pada tube yang mengalami proses bending. Dari perpindahan tersebut dapat diketahui besarnya *springback* dari tube. Besarnya *springback* yang dihasilkan pada simulasi adalah sebesar 3.930° sedangkan besarnya *springback* yang dihasilkan menurut perhitungan rumus adalah sebesar 3.195° .

d) Sudut 120°

Hasil *displacement* pada simulasi pemodelan pada tube 4x4 cm dengan ketebalan 3 mm dan diberikan *internal pressure* sebesar 5 MPa dengan besar sudut bending sebesar 120° ditunjukkan pada Gambar 4.4 berikut.



Gambar 4.4 Displacement tube 4x4 cm pada sudut 120°

Pada Gambar 4.4 dapat dilihat bahwa proses dari bending tidak sempurna. Dapat dilihat bahwa terjadi perpindahan tube dari sudut bending yang telah ditentukan. Perpindahan ini terjadi karena adanya *recovery* elastis pada tube yang mengalami proses bending. Dari perpindahan tersebut dapat diketahui besarnya *springback* dari tube. Besarnya *springback* yang dihasilkan pada simulasi adalah sebesar 4.709° sedangkan besarnya *springback* yang dihasilkan menurut perhitungan rumus adalah sebesar 4.260°.

e) Sudut 180°

Hasil *displacement* pada simulasi pemodelan pada tube 4x4 cm dengan ketebalan 3 mm dan diberikan *internal pressure* sebesar 5 MPa dengan besar sudut bending sebesar 180° ditunjukkan pada Gambar 4.5 berikut.



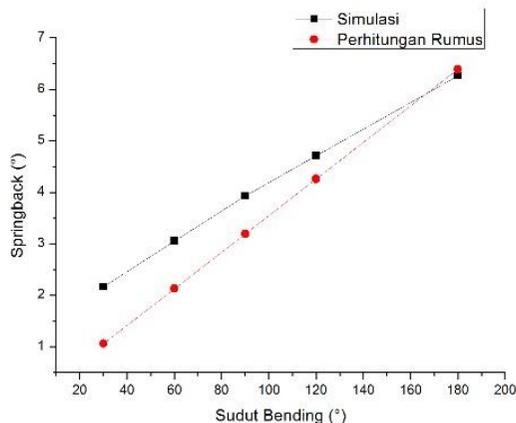
Gambar 4.5 Displacement tube 4x4 cm pada sudut 180°

Pada Gambar 4.5 dapat dilihat bahwa proses dari bending tidak sempurna. Dapat dilihat bahwa terjadi perpindahan tube dari sudut bending yang telah ditentukan. Perpindahan ini terjadi karena adanya *recovery* elastis pada tube yang mengalami proses bending. Dari perpindahan tersebut dapat diketahui besarnya *springback* dari tube. Besarnya *springback* yang dihasilkan pada simulasi adalah sebesar 6.262° sedangkan besarnya *springback* yang dihasilkan menurut perhitungan rumus adalah sebesar 6.390°.

Keseluruhan perbandingan hasil *springback* pada tube dengan ukuran sisi 4 x 4 cm secara simulasi dan perhitungan rumus dapat dilihat pada Tabel 4.1 dan Gambar 4.6 berikut. Perbandingan ini menunjukkan bahwa sebagian besar *springback* yang dihasilkan dari simulasi pemodelan menunjukkan hasil yang lebih besar daripada yang dihasilkan secara perhitungan rumus. Namun hasil keduanya menunjukkan *trend* yang sama, dimana *springback* yang dihasilkan bertambah besar seiring dengan bertambahnya sudut bending.


Tabel 4.1 Springback hasil simulasi dan perhitungan rumus

No	Sudut bending (°)	Simulasi (°)	Perhitungan Rumus (°)
1	30	2.164	1.065
2	60	3.058	2.130
3	90	3.930	3.195
4	120	4.709	4.260
5	180	6.262	6.390


Gambar 4.6 Grafik springback hasil simulasi dan perhitungan rumus tube 4x4 cm

4.1.1.2 Tube 4x2 cm

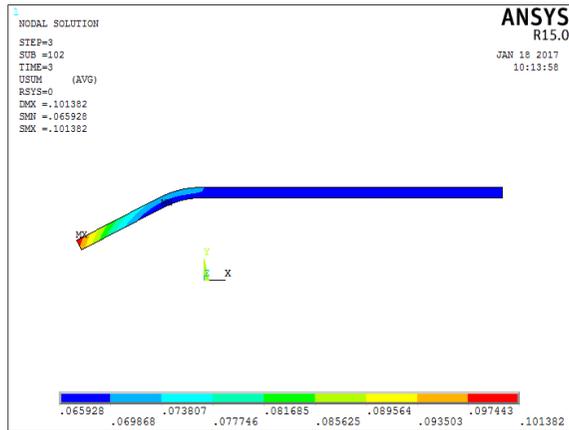
Berikut hasil data *springback* yang dihasilkan melalui *displacement* pada simulasi pemodelan pada tube 4x2 cm dengan ketebalan 3 mm dan diberikan internal pressure sebesar 5 MPa dengan variasi sudut bending sebesar 30°, 60°, 90°, 120° dan 180°.

a) Sudut 30°

Hasil *displacement* pada simulasi pemodelan pada tube 4x2 cm dengan ketebalan 3 mm dan diberikan *internal pressure* sebesar 5



MPa dengan besar sudut bending sebesar 30° ditunjukkan pada Gambar 4.7 berikut.

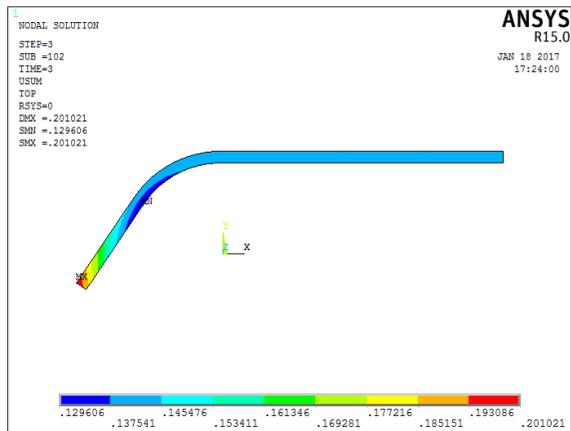


Gambar 4.7 Displacement tube 4x2 cm pada sudut 30°

Pada Gambar 4.7 dapat dilihat bahwa proses dari bending tidak sempurna. Dapat dilihat bahwa terjadi perpindahan tube dari sudut bending yang telah ditentukan. Perpindahan ini terjadi karena adanya *recovery* elastis pada tube yang mengalami proses bending. Dari perpindahan tersebut dapat diketahui besarnya *springback* dari tube. Besarnya *springback* yang dihasilkan pada simulasi adalah sebesar 2.879° sedangkan besarnya *springback* yang dihasilkan menurut perhitungan rumus adalah sebesar 1.610° .

b) Sudut 60°

Hasil *displacement* pada simulasi pemodelan pada tube 4x2 cm dengan ketebalan 3 mm dan diberikan *internal pressure* sebesar 5 MPa dengan besar sudut bending sebesar 60° ditunjukkan pada Gambar 4.8 berikut.

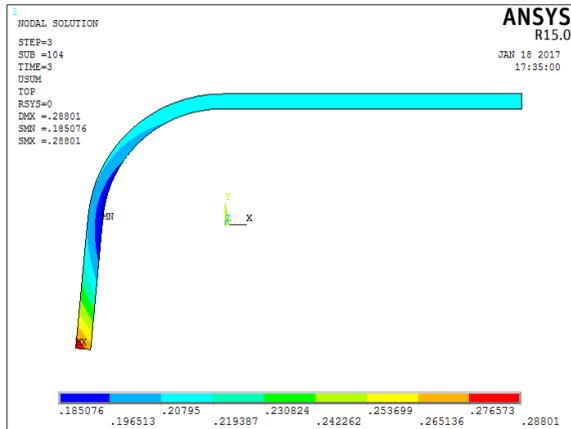


Gambar 4.8 Displacement tube 4x2 cm pada sudut 60°

Pada Gambar 4.8 dapat dilihat bahwa proses dari bending tidak sempurna. Dapat dilihat bahwa terjadi perpindahan tube dari sudut bending yang telah ditentukan. Perpindahan ini terjadi karena adanya *recovery* elastis pada tube yang mengalami proses bending. Dari perpindahan tersebut dapat diketahui besarnya *springback* dari tube. Besarnya *springback* yang dihasilkan pada simulasi adalah sebesar 4.114° sedangkan besarnya *springback* yang dihasilkan menurut perhitungan rumus adalah sebesar 3.221°.

c) Sudut 90°

Hasil *displacement* pada simulasi pemodelan pada tube 4x2 cm dengan ketebalan 3 mm dan diberikan *internal pressure* sebesar 5 MPa dengan besar sudut bending sebesar 90° ditunjukkan pada Gambar 4.9 berikut.

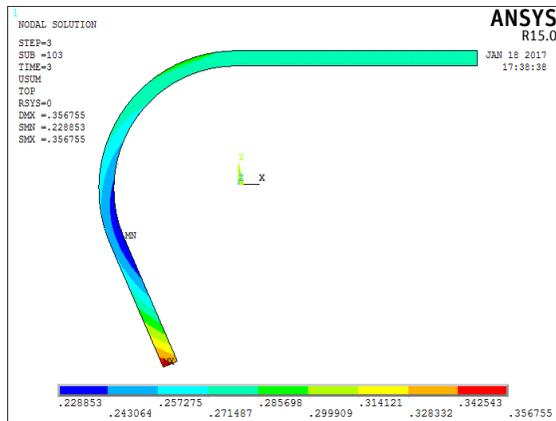


Gambar 4.9 Displacement tube 4x2 cm pada sudut 90°

Pada Gambar 4.9 dapat dilihat bahwa proses dari bending tidak sempurna. Dapat dilihat bahwa terjadi perpindahan tube dari sudut bending yang telah ditentukan. Perpindahan ini terjadi karena adanya *recovery* elastis pada tube yang mengalami proses bending. Dari perpindahan tersebut dapat diketahui besarnya *springback* dari tube. Besarnya *springback* yang dihasilkan pada simulasi adalah sebesar 5.340° sedangkan besarnya *springback* yang dihasilkan menurut perhitungan rumus adalah sebesar 4.831°.

d) Sudut 120°

Hasil *displacement* pada simulasi pemodelan pada tube 4x2 cm dengan ketebalan 3 mm dan diberikan *internal pressure* sebesar 5 MPa dengan besar sudut bending sebesar 120° ditunjukkan pada Gambar 4.10 berikut.

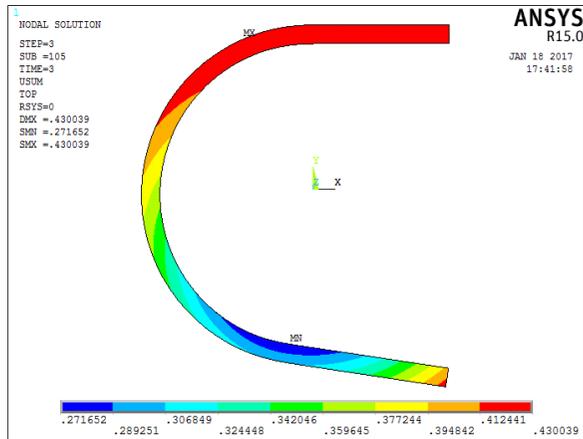


Gambar 4.10 Displacement tube 4x2 cm pada sudut 120°

Pada Gambar 4.10 dapat dilihat bahwa proses dari bending tidak sempurna. Dapat dilihat bahwa terjadi perpindahan tube dari sudut bending yang telah ditentukan. Perpindahan ini terjadi karena adanya *recovery* elastis pada tube yang mengalami proses bending. Dari perpindahan tersebut dapat diketahui besarnya *springback* dari tube. Besarnya *springback* yang dihasilkan pada simulasi adalah sebesar 6.468° sedangkan besarnya *springback* yang dihasilkan menurut perhitungan rumus adalah sebesar 6.442°.

e) Sudut 180°

Hasil *displacement* pada simulasi pemodelan pada tube 4x2 cm dengan ketebalan 3 mm dan diberikan *internal pressure* sebesar 5 MPa dengan besar sudut bending sebesar 180° ditunjukkan pada Gambar 4.11 berikut.



Gambar 4.11 Displacement tube 4x2 cm pada sudut 180°

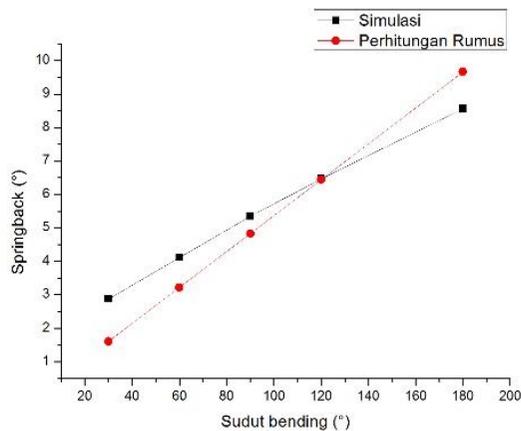
Pada Gambar 4.11 dapat dilihat bahwa proses dari bending tidak sempurna. Dapat dilihat bahwa terjadi perpindahan tube dari sudut bending yang telah ditentukan. Perpindahan ini terjadi karena adanya *recovery* elastis pada tube yang mengalami proses bending. Dari perpindahan tersebut dapat diketahui besarnya *springback* dari tube. Besarnya *springback* yang dihasilkan pada simulasi adalah sebesar 8.560° sedangkan besarnya *springback* yang dihasilkan menurut perhitungan rumus adalah sebesar 9.663°.

Keseluruhan perbandingan hasil *springback* pada tube dengan ukuran sisi 4 x 2 cm secara simulasi dan perhitungan rumus dapat dilihat pada Tabel 4.2 dan Gambar 4.12 berikut. Perbandingan ini menunjukkan bahwa sebagian besar *springback* yang dihasilkan dari simulasi pemodelan menunjukkan hasil yang lebih besar daripada yang dihasilkan secara perhitungan rumus. Namun hasil keduanya menunjukkan *trend* yang sama, dimana *springback* yang dihasilkan bertambah besar seiring dengan bertambahnya sudut bending.



Tabel 4.2 Springback hasil simulasi dan perhitungan rumus

No	Sudut bending (°)	Simulasi (°)	Perhitungan Rumus (°)
1	30	2.879	1.610
2	60	4.114	3.221
3	90	5.340	4.831
4	120	6.468	6.442
5	180	8.560	9.663



Gambar 4.12 Grafik springback hasil simulasi dan perhitungan rumus tube 4x2 cm

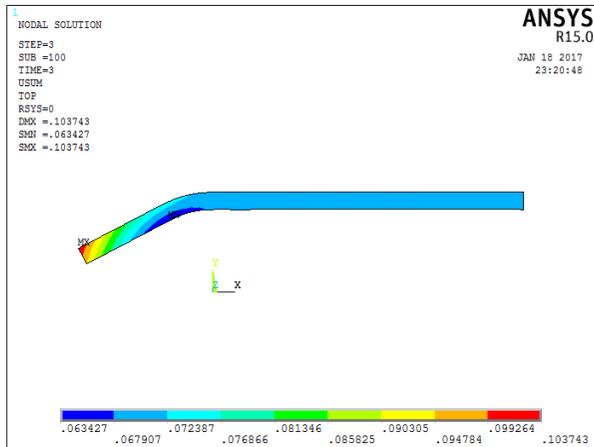
4.1.1.3 Tube 5x3 cm

Berikut hasil data *springback* yang dihasilkan melalui *displacement* pada simulasi pemodelan pada tube 5x3 cm dengan ketebalan 3 mm dan diberikan internal pressure sebesar 5 MPa dengan variasi sudut bending sebesar 30°, 60°, 90°, 120° dan 180°.



a) Sudut 30°

Hasil *displacement* pada simulasi pemodelan pada tube 5x3 cm dengan ketebalan 3 mm dan diberikan *internal pressure* sebesar 5 MPa dengan besar sudut bending sebesar 30° ditunjukkan pada Gambar 4.13 berikut.



Gambar 4.13 Displacement tube 5x3 cm pada sudut 30°

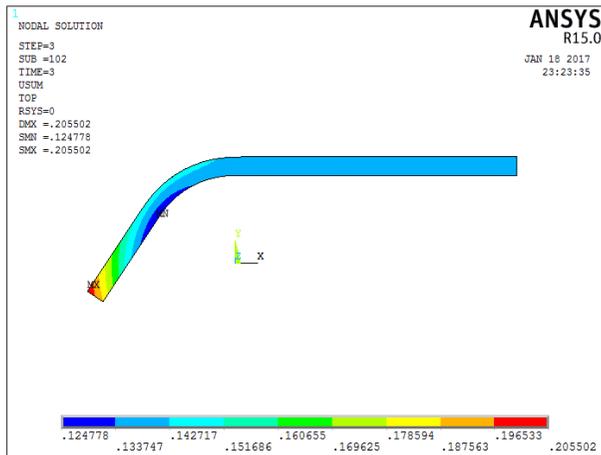
Pada Gambar 4.13 dapat dilihat bahwa proses dari bending tidak sempurna. Dapat dilihat bahwa terjadi perpindahan tube dari sudut bending yang telah ditentukan. Perpindahan ini terjadi karena adanya *recovery* elastis pada tube yang mengalami proses bending. Dari perpindahan tersebut dapat diketahui besarnya *springback* dari tube. Besarnya *springback* yang dihasilkan pada simulasi adalah sebesar 2.571° sedangkan besarnya *springback* yang dihasilkan menurut perhitungan rumus adalah sebesar 1.206° .

b) Sudut 60°

Hasil *displacement* pada simulasi pemodelan pada tube 5x3 cm dengan ketebalan 3 mm dan diberikan *internal pressure* sebesar 5



MPa dengan besar sudut bending sebesar 60° ditunjukkan pada Gambar 4.14 berikut.

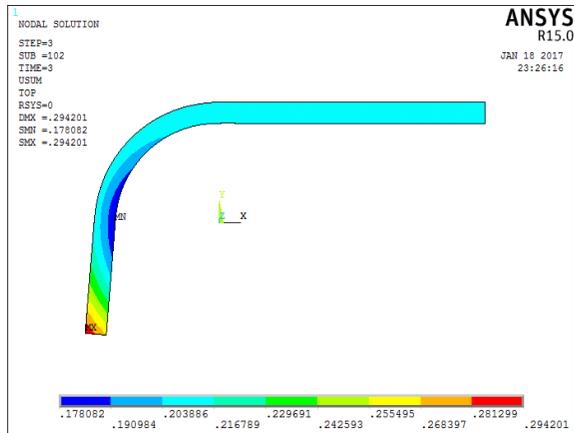


Gambar 4.14 Displacement tube 5x3 cm pada sudut 60°

Pada Gambar 4.14 dapat dilihat bahwa proses dari bending tidak sempurna. Dapat dilihat bahwa terjadi perpindahan tube dari sudut bending yang telah ditentukan. Perpindahan ini terjadi karena adanya *recovery* elastis pada tube yang mengalami proses bending. Dari perpindahan tersebut dapat diketahui besarnya *springback* dari tube. Besarnya *springback* yang dihasilkan pada simulasi adalah sebesar 3.654° sedangkan besarnya *springback* yang dihasilkan menurut perhitungan rumus adalah sebesar 2.411° .

c) Sudut 90°

Hasil *displacement* pada simulasi pemodelan pada tube 5x3 cm dengan ketebalan 3 mm dan diberikan *internal pressure* sebesar 5 MPa dengan besar sudut bending sebesar 90° ditunjukkan pada Gambar 4.15 berikut.



Gambar 4.15 Displacement tube 5x3 cm pada sudut 90°

Pada Gambar 4.15 dapat dilihat bahwa proses dari bending tidak sempurna. Dapat dilihat bahwa terjadi perpindahan tube dari sudut bending yang telah ditentukan. Perpindahan ini terjadi karena adanya *recovery* elastis pada tube yang mengalami proses bending. Dari perpindahan tersebut dapat diketahui besarnya *springback* dari tube. Besarnya *springback* yang dihasilkan pada simulasi adalah sebesar 4.664° sedangkan besarnya *springback* yang dihasilkan menurut perhitungan rumus adalah sebesar 3.617°.

d) Sudut 120°

Hasil *displacement* pada simulasi pemodelan pada tube 5x3 cm dengan ketebalan 3 mm dan diberikan *internal pressure* sebesar 5 MPa dengan besar sudut bending sebesar 120° ditunjukkan pada Gambar 4.16 berikut.

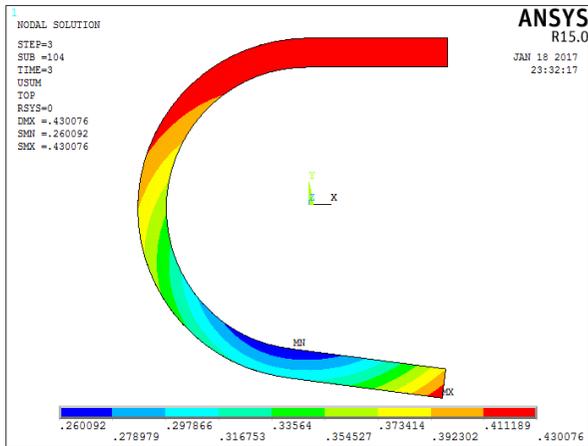


Gambar 4.16 Displacement tube 5x3 cm pada sudut 120°

Pada Gambar 4.16 dapat dilihat bahwa proses dari bending tidak sempurna. Dapat dilihat bahwa terjadi perpindahan tube dari sudut bending yang telah ditentukan. Perpindahan ini terjadi karena adanya *recovery* elastis pada tube yang mengalami proses bending. Dari perpindahan tersebut dapat diketahui besarnya *springback* dari tube. Besarnya *springback* yang dihasilkan pada simulasi adalah sebesar 5.580° sedangkan besarnya *springback* yang dihasilkan menurut perhitungan rumus adalah sebesar 4.822°.

e) Sudut 180°

Hasil *displacement* pada simulasi pemodelan pada tube 5x3 cm dengan ketebalan 3 mm dan diberikan *internal pressure* sebesar 5 MPa dengan besar sudut bending sebesar 180° ditunjukkan pada Gambar 4.17 berikut.



Gambar 4.17 Displacement tube 5x3 cm pada sudut 180°

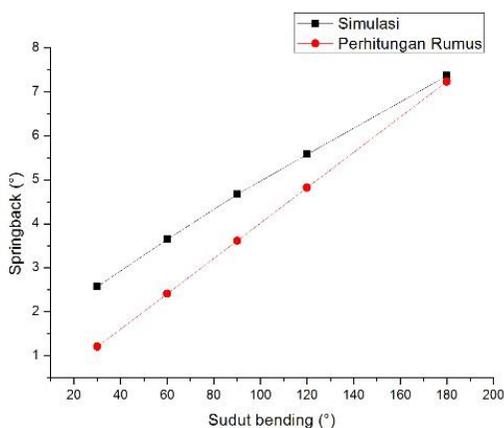
Pada Gambar 4.17 dapat dilihat bahwa proses dari bending tidak sempurna. Dapat dilihat bahwa terjadi perpindahan tube dari sudut bending yang telah ditentukan. Perpindahan ini terjadi karena adanya *recovery* elastis pada tube yang mengalami proses bending. Dari perpindahan tersebut dapat diketahui besarnya *springback* dari tube. Besarnya *springback* yang dihasilkan pada simulasi adalah sebesar 7.373° sedangkan besarnya *springback* yang dihasilkan menurut perhitungan rumus adalah sebesar 7.233° .

Keseluruhan perbandingan hasil *springback* pada tube dengan ukuran sisi 5 x 3 cm secara simulasi dan perhitungan rumus dapat dilihat pada Tabel 4.3 dan Gambar 4.18 berikut. Perbandingan ini menunjukkan bahwa *springback* yang dihasilkan dari simulasi pemodelan menunjukkan hasil yang lebih besar daripada yang dihasilkan secara perhitungan rumus. Namun hasil keduanya menunjukkan *trend* yang sama, dimana *springback* yang dihasilkan bertambah besar seiring dengan bertambahnya sudut bending.



Tabel 4.3 Springback hasil simulasi dan perhitungan rumus

No	Sudut bending (°)	Simulasi (°)	Perhitungan Rumus (°)
1	30	2.571	1.206
2	60	3.654	2.411
3	90	4.664	3.617
4	120	5.580	4.822
5	180	7.373	7.233



Gambar 4.18 Grafik springback hasil simulasi dan perhitungan rumus tube 5x3 cm

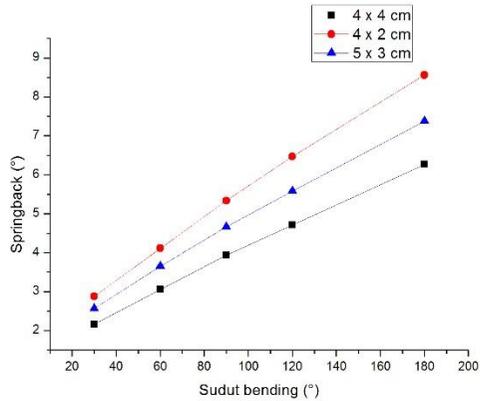
Perbandingan hasil keseluruhan besarnya springback yang dihasilkan setelah pelepasan alat (*remove tooling*) tiap variasi ukuran sisi tube dibandingkan dengan perhitungan rumus dapat dilihat pada Tabel 4.4 dan Gambar 4.19 berikut. Perbandingan ini menunjukkan bahwa sebagian besar *springback* yang dihasilkan dari simulasi pemodelan menunjukkan hasil yang lebih besar daripada yang dihasilkan secara perhitungan rumus. Namun hasil



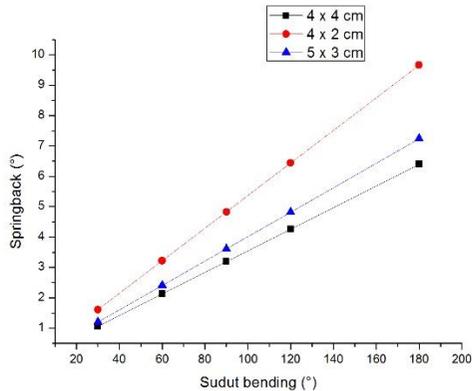
keduanya menunjukkan *trend* yang sama, dimana springback yang dihasilkan bertambah besar seiring dengan bertambahnya sudut bending.

Tabel 4.4 Springback hasil simulasi dan perhitungan rumus

	Sudut bending (°)	Simulasi (°)	Perhitungan Rumus (°)
4x4	30	2.164	1.065
	60	3.058	2.130
	90	3.930	3.195
	120	4.709	4.260
	180	6.262	6.390
4x2	30	2.879	1.610
	60	4.114	3.221
	90	5.340	4.831
	120	6.468	6.442
	180	8.560	9.663
5x3	30	2.571	1.206
	60	3.654	2.411
	90	4.664	3.617
	120	5.580	4.822
	180	7.373	7.233



(a)



(b)

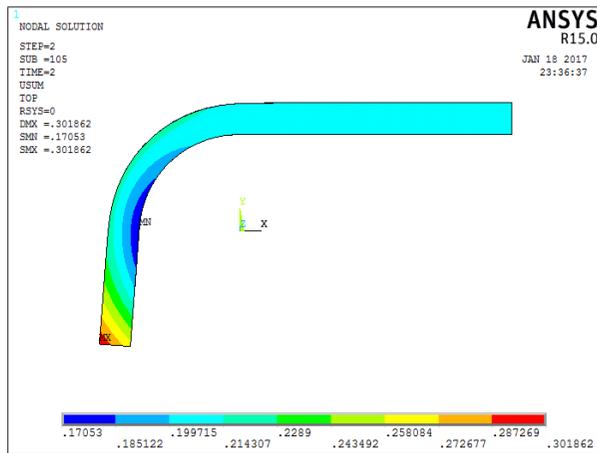
Gambar 4.19 Grafik perbandingan springback yang dihasilkan pada tube 4x4 dengan variasi ukuran sisi tube secara a) simulasi b) perhitungan rumus



Pemodelan berikutnya adalah pemodelan pengaruh variasi ketebalan dinding tube terhadap besar *springback*. Masing-masing menggunakan tube dengan ukuran sisi 4x4 cm dan tidak diberikan *internal pressure* serta sudut bending yang diberikan sebesar 90° . Variasi ketebalan dinding tube yang digunakan yaitu sebesar 1 mm, 2 mm, dan 3 mm.

4.1.1.4 Ketebalan 1 mm

Hasil *displacement* pada simulasi pemodelan pada tube 4x4 cm dengan ketebalan 1 mm dan tanpa diberikan *internal pressure* dengan besar sudut bending sebesar 90° ditunjukkan pada Gambar 4.20 berikut.



Gambar 4.20 Displacement tube 4x4 cm pada sudut 90° dengan ketebalan 1 mm

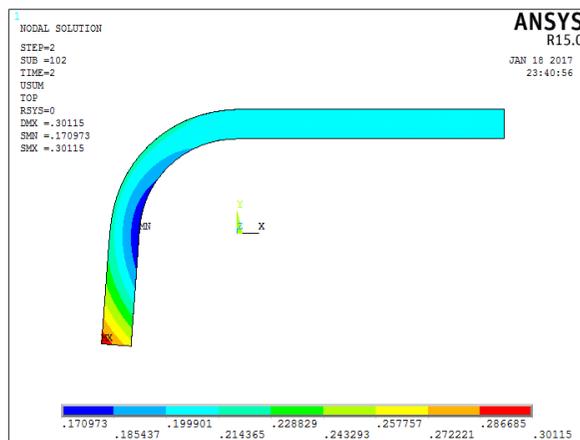
Pada Gambar 4.20 dapat dilihat bahwa proses dari bending tidak sempurna. Dapat dilihat bahwa terjadi perpindahan tube dari sudut bending yang telah ditentukan. Perpindahan ini terjadi karena adanya *recovery* elastis pada tube yang mengalami proses bending. Dari perpindahan tersebut dapat diketahui besarnya *springback* dari



tube. Besarnya *springback* yang dihasilkan pada simulasi adalah sebesar 4.486° sedangkan besarnya *springback* yang dihasilkan menurut perhitungan rumus adalah sebesar 3.543° .

4.1.1.5 Ketebalan 2 mm

Hasil *displacement* pada simulasi pemodelan pada tube 4x4 cm dengan ketebalan 2 mm dan tanpa diberikan *internal pressure* dengan besar sudut bending sebesar 90° ditunjukkan pada Gambar 4.21 berikut.



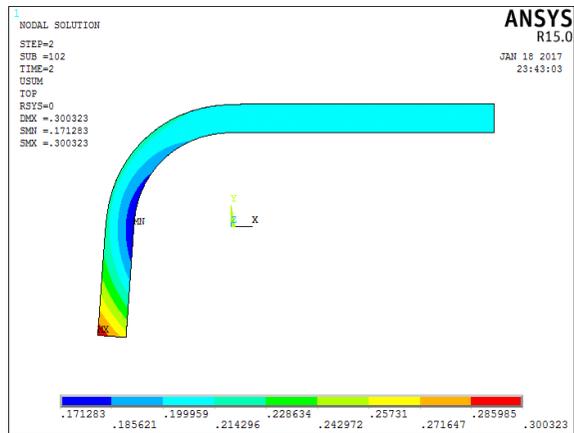
Gambar 4.21 Displacement tube 4x4 cm pada sudut 90° dengan ketebalan 2 mm

Pada Gambar 4.21 dapat dilihat bahwa proses dari bending tidak sempurna. Dapat dilihat bahwa terjadi perpindahan tube dari sudut bending yang telah ditentukan. Perpindahan ini terjadi karena adanya *recovery* elastis pada tube yang mengalami proses bending. Dari perpindahan tersebut dapat diketahui besarnya *springback* dari tube. Besarnya *springback* yang dihasilkan pada simulasi adalah sebesar 4.222° sedangkan besarnya *springback* yang dihasilkan menurut perhitungan rumus adalah sebesar 3.366° .



4.1.1.6 Ketebalan 3 mm

Hasil *displacement* pada simulasi pemodelan pada tube 4x4 cm dengan ketebalan 3 mm dan tanpa diberikan *internal pressure* dengan besar sudut bending sebesar 90° ditunjukkan pada Gambar 4.22 berikut.



Gambar 4.22 Displacement tube 4x4 cm pada sudut 90° dengan ketebalan 3 mm

Pada Gambar 4.22 dapat dilihat bahwa proses dari bending tidak sempurna. Dapat dilihat bahwa terjadi perpindahan tube dari sudut bending yang telah ditentukan. Perpindahan ini terjadi karena adanya *recovery* elastis pada tube yang mengalami proses bending. Dari perpindahan tersebut dapat diketahui besarnya *springback* dari tube. Besarnya *springback* yang dihasilkan pada simulasi adalah sebesar 4.119° sedangkan besarnya *springback* yang dihasilkan menurut perhitungan rumus adalah sebesar 3.195° .

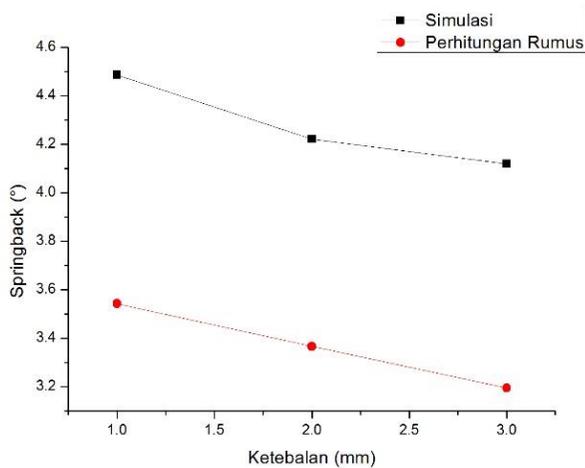
Perbandingan hasil keseluruhan besarnya *springback* tiap variasi ketebalan dinding tube dibandingkan dengan perhitungan rumus, dapat dilihat pada Tabel 4.5 dan Gambar 4.23. Perbandingan ini menunjukkan bahwa besarnya *springback* yang



dihasilkan dari simulasi pemodelan menunjukkan hasil yang lebih besar daripada yang dihasilkan secara perhitungan rumus. Namun hasil keduanya menunjukkan *trend* yang sama, dimana springback yang dihasilkan berbanding terbalik dengan bertambahnya ketebalan dinding tube.

Tabel 4.5 Springback hasil simulasi dan perhitungan rumus

No	Ketebalan	Simulasi (°)	Perhitungan Rumus (°)
1	1 mm	4.486	3.543
2	2 mm	4.222	3.366
3	3 mm	4.119	3.195



Gambar 4.23 Grafik perbandingan springback dengan variasi ketebalan dinding tube secara simulasi dan perhitungan rumus



4.1.2 Hasil Von Mises Stress

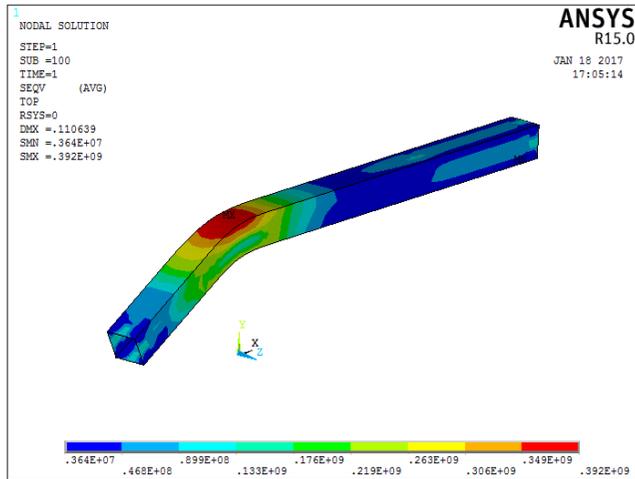
Analisis *Von Mises stress* dilakukan untuk melihat besarnya tegangan yang terjadi selama proses bending pada pemodelan tube bending pada *rotary draw bending* baik proses sebelum pelepasan alat (*loading*) maupun proses setelah pelepasan alat (*unloading*). Dari hasil tersebut dapat diamati bagaimana persebaran tegangan yang bekerja pada proses *rotary draw bending* dan juga dapat dilihat dimana letak pembebanan maksimum dan pembebanan minimum pada proses bending. Berikut hasil analisis *Von Mises stress* yang dihasilkan pada tube 4x4 cm, 4x2 cm, dan 5x3 cm dengan masing-masing ketebalan 3 mm dan diberi *internal pressure* sebesar 5 MPa, serta pada tube 4x4 cm dengan ketebalan dinding tube 1 mm, 2 mm, dan 3 mm tanpa diberikan internal pressure.

4.1.2.1 Tube 4x4 cm

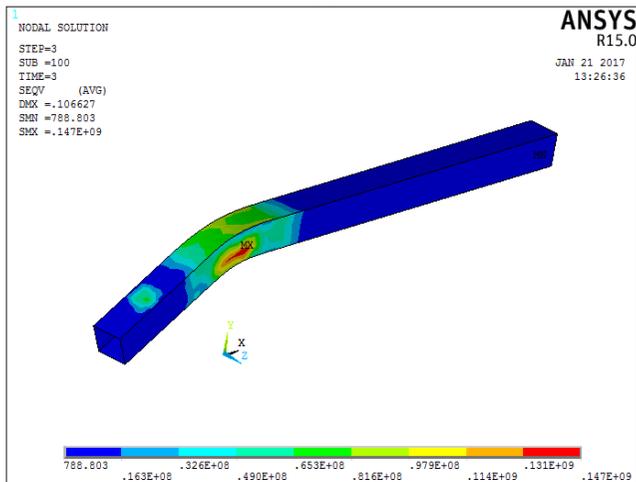
Berikut hasil data analisis *Von Mises stress* yang dihasilkan baik proses sebelum pelepasan alat (*loading*) maupun proses setelah pelepasan alat (*unloading*) pada simulasi pemodelan pada tube 4x4 cm dengan ketebalan 3 mm dan diberikan internal pressure sebesar 5 MPa dengan variasi sudut bending sebesar 30°, 60°, 90°, 120° dan 180°.

a) Sudut 30°

Hasil persebaran *Von Mises stress* pada simulasi pemodelan pada tube 4x4 cm dengan ketebalan 3 mm dan diberikan *internal pressure* sebesar 5 MPa dengan besar sudut bending sebesar 30° pada proses sebelum pelepasan alat (*loading*) maupun proses setelah pelepasan alat (*unloading*) ditunjukkan pada Gambar 4.24 berikut.



(a)



(b)

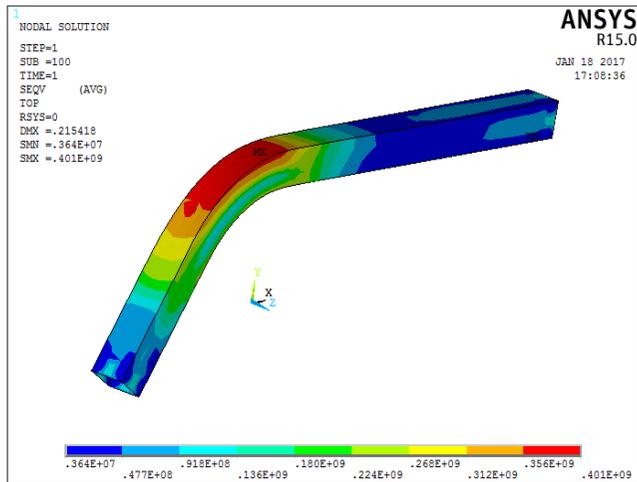
Gambar 4.24 Von Mises stress tube 4x4 cm pada sudut 30° saat proses **a)** Loading **b)** Unloading



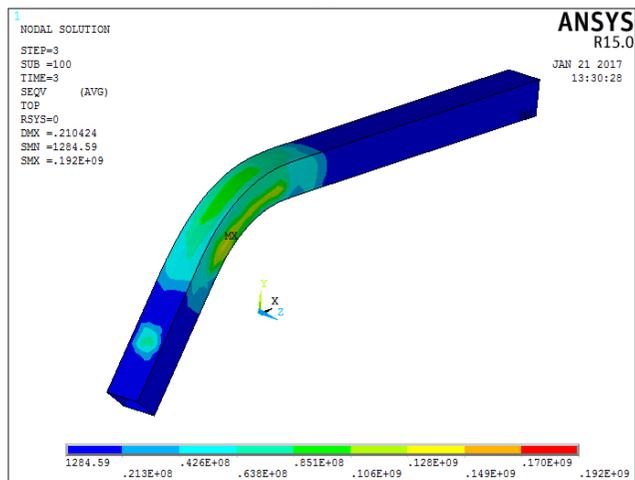
Gambar 4.24 merupakan *Von Mises stress* yang didapat dari pemodelan simulasi proses *rotary draw bending* yang telah dilakukan. Dari gambar hasil yang ada dapat dilihat persebaran tegangan yang terjadi pada proses *rotary draw bending* tersebut. Dari persebaran tersebut dapat dilihat bahwa tegangan tertinggi yang terjadi pada proses *rotary draw bending* ditunjukkan dengan daerah yang berwarna merah saat proses *loading* atau sebelum terjadinya pelepasan alat (*remove tooling*). Daerah yang berwarna merah ini merupakan daerah dimana proses awal dari bending terjadi. Nilai maksimum *Von Mises stress* pada proses *loading* saat proses *bending* adalah sebesar 392 MPa. Pada saat proses *unloading* atau setelah pelepasan alat (*remove tooling*), besarnya *Von Mises stress* yang terdapat pada proses menjadi 147 MPa. Selisih besarnya *stress* saat proses *loading* dan *unloading* yaitu sebesar 245 MPa. Hal ini menunjukkan adanya pelepasan gaya yang terjadi pada saat pelepasan alat (*remove tooling*) atau penghilangan beban yang ada pada proses tersebut. Tegangan maksimum yang terdapat pada saat proses *loading* dan *unloading* juga berbeda dari sisi letaknya.

b) Sudut 60°

Hasil persebaran *Von Mises stress* pada simulasi pemodelan pada tube 4x4 cm dengan ketebalan 3 mm dan diberikan *internal pressure* sebesar 5 MPa dengan besar sudut bending sebesar 60° pada proses sebelum pelepasan alat (*loading*) maupun proses setelah pelepasan alat (*unloading*) ditunjukkan pada Gambar 4.25 berikut.



(a)



(b)

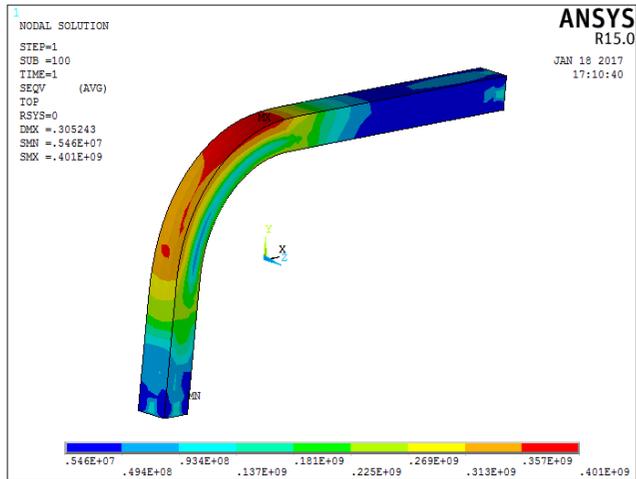
Gambar 4.25 Von Mises stress tube 4x4 cm pada sudut 60° saat proses **a)** Loading **b)** Unloading



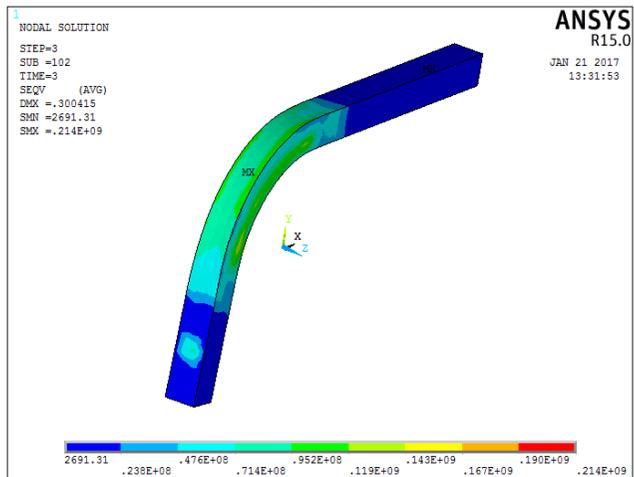
Gambar 4.25 merupakan *Von Mises stress* yang didapat dari pemodelan simulasi proses *rotary draw bending* yang telah dilakukan. Dari gambar hasil yang ada dapat dilihat persebaran tegangan yang terjadi pada proses *rotary draw bending* tersebut. Dari persebaran tersebut dapat dilihat bahwa tegangan tertinggi yang terjadi pada proses *rotary draw bending* ditunjukkan dengan daerah yang berwarna merah saat proses *loading* atau sebelum terjadinya pelepasan alat (*remove tooling*). Daerah yang berwarna merah ini merupakan daerah dimana proses awal dari bending terjadi. Nilai maksimum *Von Mises stress* pada proses *loading* saat proses *bending* adalah sebesar 401 MPa. Pada saat proses *unloading* atau setelah pelepasan alat (*remove tooling*), besarnya *Von Mises stress* yang terdapat pada proses menjadi 192 MPa. Selisih besarnya *stress* saat proses *loading* dan *unloading* yaitu sebesar 209 MPa. Hal ini menunjukkan adanya pelepasan gaya yang terjadi pada saat pelepasan alat (*remove tooling*) atau penghilangan beban yang ada pada proses tersebut. Tegangan maksimum yang terdapat pada saat proses *loading* dan *unloading* juga berbeda dari sisi letaknya.

c) Sudut 90°

Hasil persebaran *Von Mises stress* pada simulasi pemodelan pada tube 4x4 cm dengan ketebalan 3 mm dan diberikan *internal pressure* sebesar 5 MPa dengan besar sudut bending sebesar 90° pada proses sebelum pelepasan alat (*loading*) maupun proses setelah pelepasan alat (*unloading*) ditunjukkan pada Gambar 4.26 berikut.



(a)



(b)

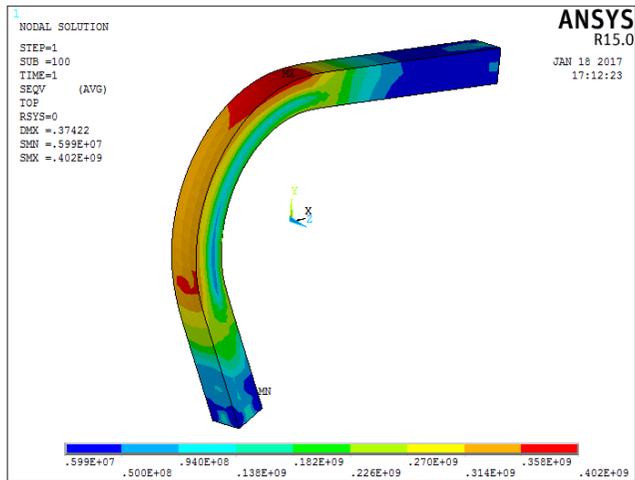
Gambar 4.26 Von Mises stress tube 4x4 cm pada sudut 90° saat proses **a)** Loading **b)** Unloading



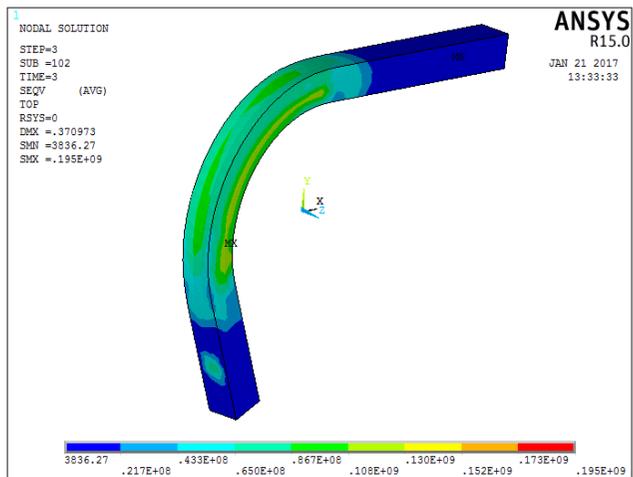
Gambar 4.26 merupakan *Von Mises stress* yang didapat dari pemodelan simulasi proses *rotary draw bending* yang telah dilakukan. Dari gambar hasil yang ada dapat dilihat persebaran tegangan yang terjadi pada proses *rotary draw bending* tersebut. Dari persebaran tersebut dapat dilihat bahwa tegangan tertinggi yang terjadi pada proses *rotary draw bending* ditunjukkan dengan daerah yang berwarna merah saat proses *loading* atau sebelum terjadinya pelepasan alat (*remove tooling*). Daerah yang berwarna merah ini merupakan daerah dimana proses awal dari bending terjadi. Nilai maksimum *Von Mises stress* pada proses *loading* saat proses *bending* adalah sebesar 401 MPa. Pada saat proses *unloading* atau setelah pelepasan alat (*remove tooling*), besarnya *Von Mises stress* yang terdapat pada proses menjadi 214 MPa. Selisih besarnya *stress* saat proses *loading* dan *unloading* yaitu sebesar 187 MPa. Hal ini menunjukkan adanya pelepasan gaya yang terjadi pada saat pelepasan alat (*remove tooling*) atau penghilangan beban yang ada pada proses tersebut. Tegangan maksimum yang terdapat pada saat proses *loading* dan *unloading* juga berbeda dari sisi letaknya.

d) Sudut 120°

Hasil persebaran *Von Mises stress* pada simulasi pemodelan pada tube 4x4 cm dengan ketebalan 3 mm dan diberikan *internal pressure* sebesar 5 MPa dengan besar sudut bending sebesar 120° pada proses sebelum pelepasan alat (*loading*) maupun proses setelah pelepasan alat (*unloading*) ditunjukkan pada Gambar 4.27 berikut.



(a)



(b)

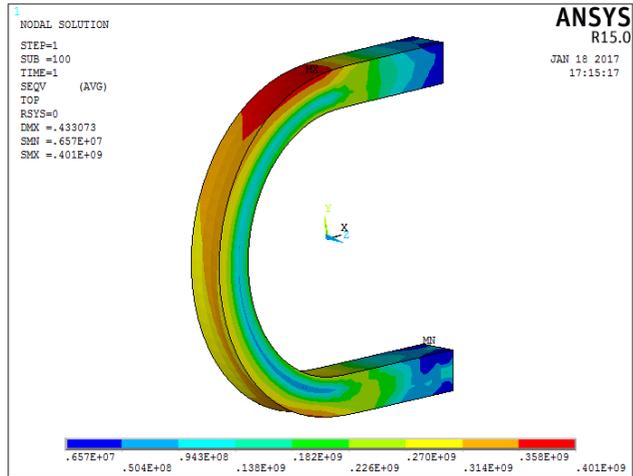
Gambar 4.27 Von Mises stress tube 4x4 cm pada sudut 120° saat proses **a)** Loading **b)** Unloading



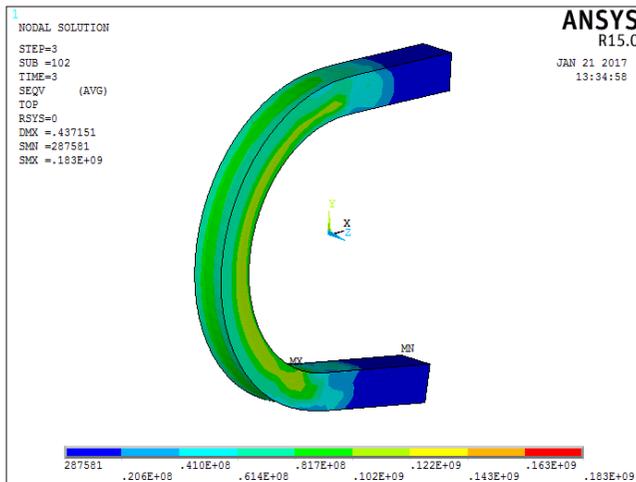
Gambar 4.27 merupakan *Von Mises stress* yang didapat dari pemodelan simulasi proses *rotary draw bending* yang telah dilakukan. Dari gambar hasil yang ada dapat dilihat persebaran tegangan yang terjadi pada proses *rotary draw bending* tersebut. Dari persebaran tersebut dapat dilihat bahwa tegangan tertinggi yang terjadi pada proses *rotary draw bending* ditunjukkan dengan daerah yang berwarna merah saat proses *loading* atau sebelum terjadinya pelepasan alat (*remove tooling*). Daerah yang berwarna merah ini merupakan daerah dimana proses awal dari bending terjadi. Nilai maksimum *Von Mises stress* pada proses *loading* saat proses *bending* adalah sebesar 402 MPa. Pada saat proses *unloading* atau setelah pelepasan alat (*remove tooling*), besarnya *Von Mises stress* yang terdapat pada proses menjadi 195 MPa. Selisih besarnya *stress* saat proses *loading* dan *unloading* yaitu sebesar 207 MPa. Hal ini menunjukkan adanya pelepasan gaya yang terjadi pada saat pelepasan alat (*remove tooling*) atau penghilangan beban yang ada pada proses tersebut. Tegangan maksimum yang terdapat pada saat proses *loading* dan *unloading* juga berbeda dari sisi letaknya.

e) Sudut 180°

Hasil persebaran *Von Mises stress* pada simulasi pemodelan pada tube 4x4 cm dengan ketebalan 3 mm dan diberikan *internal pressure* sebesar 5 MPa dengan besar sudut bending sebesar 180° pada proses sebelum pelepasan alat (*loading*) maupun proses setelah pelepasan alat (*unloading*) ditunjukkan pada Gambar 4.28 berikut.



(a)



(b)

Gambar 4.28 Von Mises stress tube 4x4 cm pada sudut 180° saat proses **a)** Loading **b)** Unloading



Gambar 4.28 merupakan *Von Mises stress* yang didapat dari pemodelan simulasi proses *rotary draw bending* yang telah dilakukan. Dari gambar hasil yang ada dapat dilihat persebaran tegangan yang terjadi pada proses *rotary draw bending* tersebut. Dari persebaran tersebut dapat dilihat bahwa tegangan tertinggi yang terjadi pada proses *rotary draw bending* ditunjukkan dengan daerah yang berwarna merah saat proses *loading* atau sebelum terjadinya pelepasan alat (*remove tooling*). Daerah yang berwarna merah ini merupakan daerah dimana proses awal dari bending terjadi. Nilai maksimum *Von Mises stress* pada proses *loading* saat proses *bending* adalah sebesar 401 MPa. Pada saat proses *unloading* atau setelah pelepasan alat (*remove tooling*), besarnya *Von Mises stress* yang terdapat pada proses menjadi 183 MPa. Selisih besarnya *stress* saat proses *loading* dan *unloading* yaitu sebesar 218 MPa. Hal ini menunjukkan adanya pelepasan gaya yang terjadi pada saat pelepasan alat (*remove tooling*) atau penghilangan beban yang ada pada proses tersebut. Tegangan maksimum yang terdapat pada saat proses *loading* dan *unloading* juga berbeda dari sisi letaknya.

4.1.2.2 Tube 4x2 cm

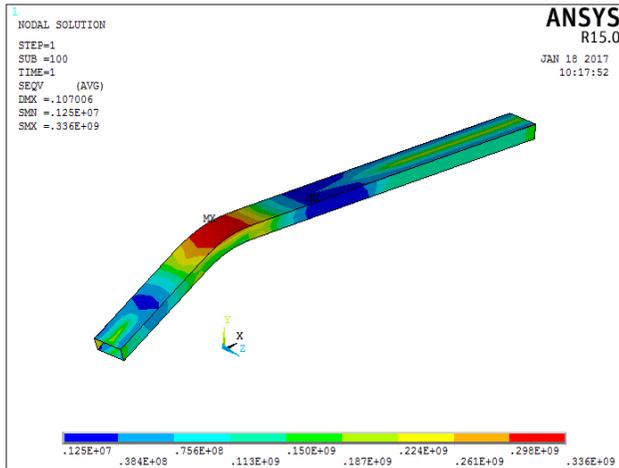
Berikut hasil data analisis *Von Mises stress* yang dihasilkan baik proses sebelum pelepasan alat (*loading*) maupun proses setelah pelepasan alat (*unloading*) pada simulasi pemodelan pada tube 4x2 cm dengan ketebalan 3 mm dan diberikan internal pressure sebesar 5 MPa dengan variasi sudut bending sebesar 30°, 60°, 90°, 120° dan 180°.

a) Sudut 30°

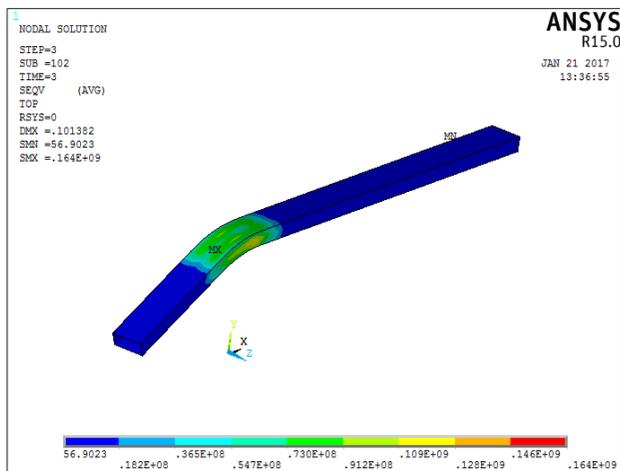
Hasil persebaran *Von Mises stress* pada simulasi pemodelan pada tube 4x2 cm dengan ketebalan 3 mm dan diberikan *internal pressure* sebesar 5 MPa dengan besar sudut bending sebesar 30° pada proses sebelum pelepasan alat (*loading*) maupun proses



setelah pelepasan alat (*unloading*) ditunjukkan pada Gambar 4.29 berikut.



(a)



(b)

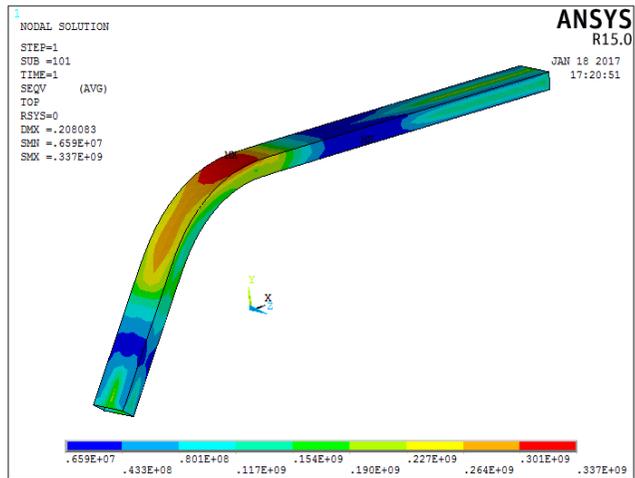
Gambar 4.29 Von Mises stress tube 4x2 cm pada sudut 30° saat proses a) Loading b) Unloading



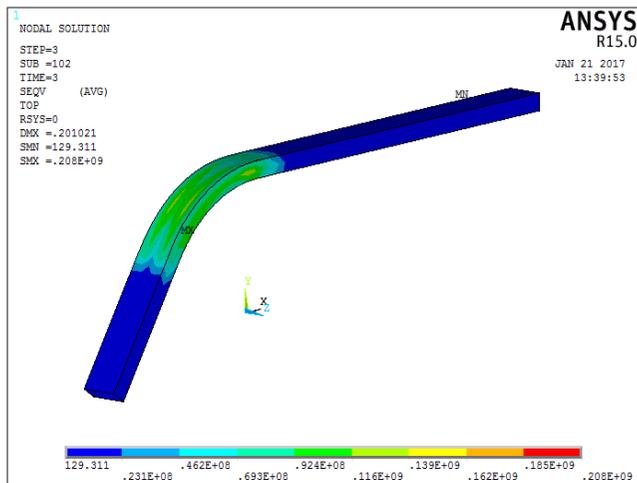
Gambar 4.29 merupakan *Von Mises stress* yang didapat dari pemodelan simulasi proses *rotary draw bending* yang telah dilakukan. Dari gambar hasil yang ada dapat dilihat persebaran tegangan yang terjadi pada proses *rotary draw bending* tersebut. Dari persebaran tersebut dapat dilihat bahwa tegangan tertinggi yang terjadi pada proses *rotary draw bending* ditunjukkan dengan daerah yang berwarna merah saat proses *loading* atau sebelum terjadinya pelepasan alat (*remove tooling*). Daerah yang berwarna merah ini merupakan daerah dimana proses awal dari bending terjadi. Nilai maksimum *Von Mises stress* pada proses *loading* saat proses *bending* adalah sebesar 336 MPa. Pada saat proses *unloading* atau setelah pelepasan alat (*remove tooling*), besarnya *Von Mises stress* yang terdapat pada proses menjadi 164 MPa. Selisih besarnya *stress* saat proses *loading* dan *unloading* yaitu sebesar 172 MPa. Hal ini menunjukkan adanya pelepasan gaya yang terjadi pada saat pelepasan alat (*remove tooling*) atau penghilangan beban yang ada pada proses tersebut. Tegangan maksimum yang terdapat pada saat proses *loading* dan *unloading* juga berbeda dari sisi letaknya.

b) Sudut 60°

Hasil persebaran *Von Mises stress* pada simulasi pemodelan pada tube 4x2 cm dengan ketebalan 3 mm dan diberikan *internal pressure* sebesar 5 MPa dengan besar sudut bending sebesar 60° pada proses sebelum pelepasan alat (*loading*) maupun proses setelah pelepasan alat (*unloading*) ditunjukkan pada Gambar 4.30 berikut.



(a)



(b)

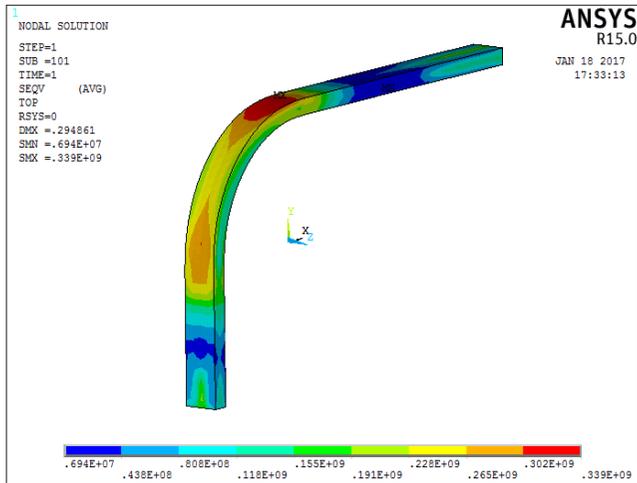
Gambar 4.30 Von Mises stress tube 4x2 cm pada sudut 60° saat proses a) Loading b) Unloading



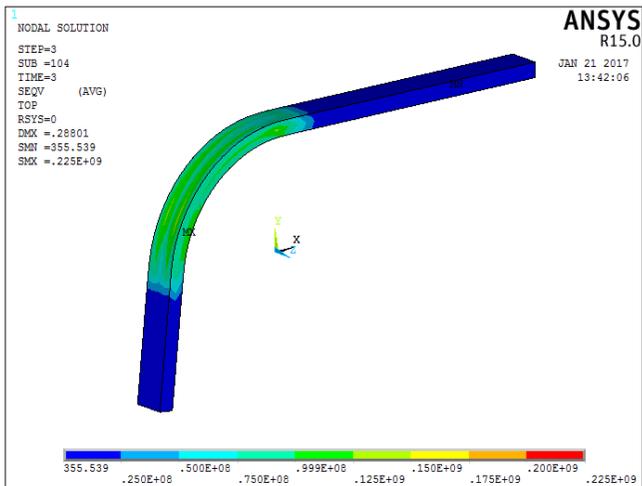
Gambar 4.30 merupakan *Von Mises stress* yang didapat dari pemodelan simulasi proses *rotary draw bending* yang telah dilakukan. Dari gambar hasil yang ada dapat dilihat persebaran tegangan yang terjadi pada proses *rotary draw bending* tersebut. Dari persebaran tersebut dapat dilihat bahwa tegangan tertinggi yang terjadi pada proses *rotary draw bending* ditunjukkan dengan daerah yang berwarna merah saat proses *loading* atau sebelum terjadinya pelepasan alat (*remove tooling*). Daerah yang berwarna merah ini merupakan daerah dimana proses awal dari bending terjadi. Nilai maksimum *Von Mises stress* pada proses *loading* saat proses *bending* adalah sebesar 337 MPa. Pada saat proses *unloading* atau setelah pelepasan alat (*remove tooling*), besarnya *Von Mises stress* yang terdapat pada proses menjadi 208 MPa. Selisih besarnya *stress* saat proses *loading* dan *unloading* yaitu sebesar 129 MPa. Hal ini menunjukkan adanya pelepasan gaya yang terjadi pada saat pelepasan alat (*remove tooling*) atau penghilangan beban yang ada pada proses tersebut. Tegangan maksimum yang terdapat pada saat proses *loading* dan *unloading* juga berbeda dari sisi letaknya.

c) Sudut 90°

Hasil persebaran *Von Mises stress* pada simulasi pemodelan pada tube 4x2 cm dengan ketebalan 3 mm dan diberikan *internal pressure* sebesar 5 MPa dengan besar sudut bending sebesar 90° pada proses sebelum pelepasan alat (*loading*) maupun proses setelah pelepasan alat (*unloading*) ditunjukkan pada Gambar 4.31 berikut.



(a)



(b)

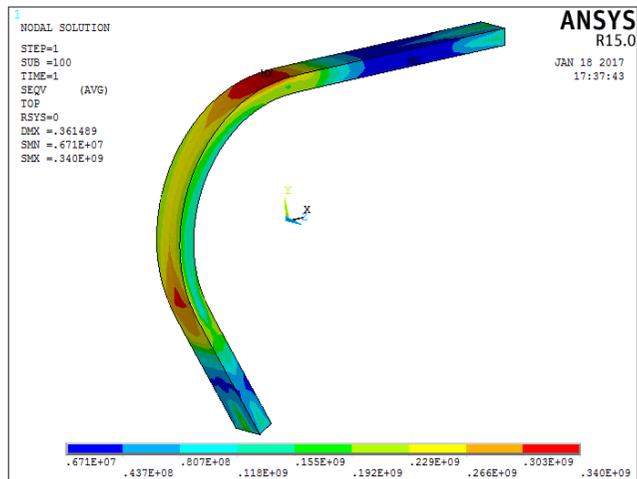
Gambar 4.31 Von Mises stress tube 4x2 cm pada sudut 90° saat proses **a)** Loading **b)** Unloading



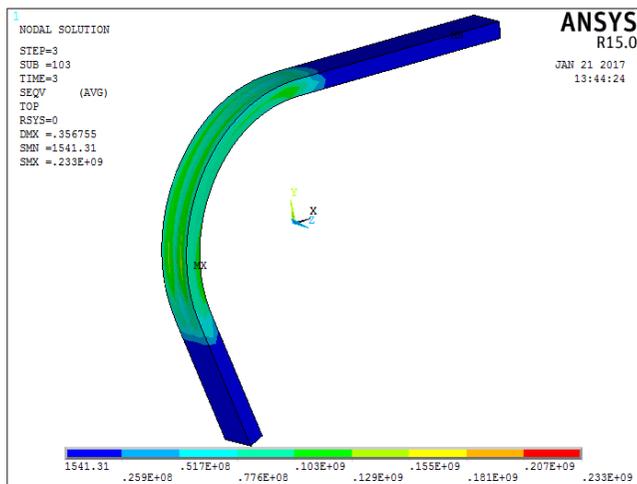
Gambar 4.31 merupakan *Von Mises stress* yang didapat dari pemodelan simulasi proses *rotary draw bending* yang telah dilakukan. Dari gambar hasil yang ada dapat dilihat persebaran tegangan yang terjadi pada proses *rotary draw bending* tersebut. Dari persebaran tersebut dapat dilihat bahwa tegangan tertinggi yang terjadi pada proses *rotary draw bending* ditunjukkan dengan daerah yang berwarna merah saat proses *loading* atau sebelum terjadinya pelepasan alat (*remove tooling*). Daerah yang berwarna merah ini merupakan daerah dimana proses awal dari bending terjadi. Nilai maksimum *Von Mises stress* pada proses *loading* saat proses *bending* adalah sebesar 339 MPa. Pada saat proses *unloading* atau setelah pelepasan alat (*remove tooling*), besarnya *Von Mises stress* yang terdapat pada proses menjadi 225 MPa. Selisih besarnya *stress* saat proses *loading* dan *unloading* yaitu sebesar 114 MPa. Hal ini menunjukkan adanya pelepasan gaya yang terjadi pada saat pelepasan alat (*remove tooling*) atau penghilangan beban yang ada pada proses tersebut. Tegangan maksimum yang terdapat pada saat proses *loading* dan *unloading* juga berbeda dari sisi letaknya.

d) Sudut 120°

Hasil persebaran *Von Mises stress* pada simulasi pemodelan pada tube 4x2 cm dengan ketebalan 3 mm dan diberikan *internal pressure* sebesar 5 MPa dengan besar sudut bending sebesar 120° pada proses sebelum pelepasan alat (*loading*) maupun proses setelah pelepasan alat (*unloading*) ditunjukkan pada Gambar 4.32 berikut.



(a)



(b)

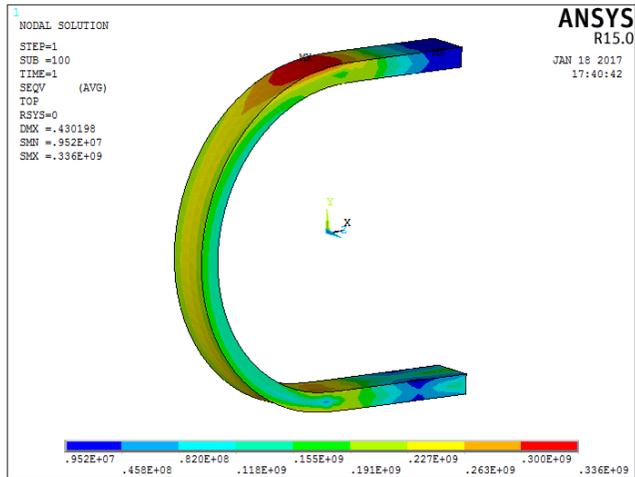
Gambar 4.32 Von Mises stress tube 4x2 cm pada sudut 120° saat proses **a)** Loading **b)** Unloading



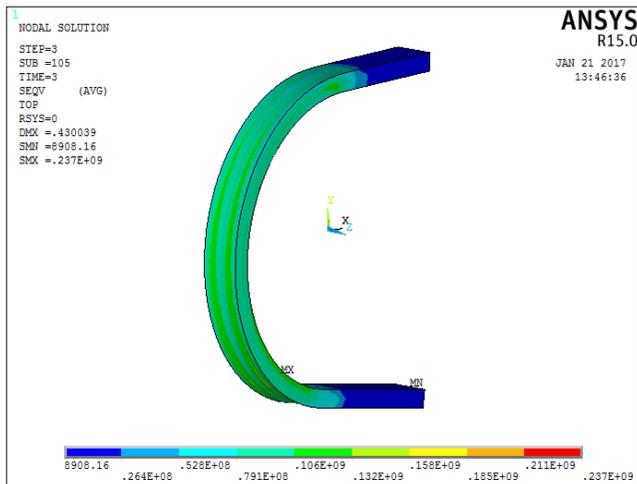
Gambar 4.32 merupakan *Von Mises stress* yang didapat dari pemodelan simulasi proses *rotary draw bending* yang telah dilakukan. Dari gambar hasil yang ada dapat dilihat persebaran tegangan yang terjadi pada proses *rotary draw bending* tersebut. Dari persebaran tersebut dapat dilihat bahwa tegangan tertinggi yang terjadi pada proses *rotary draw bending* ditunjukkan dengan daerah yang berwarna merah saat proses *loading* atau sebelum terjadinya pelepasan alat (*remove tooling*). Daerah yang berwarna merah ini merupakan daerah dimana proses awal dari bending terjadi. Nilai maksimum *Von Mises stress* pada proses *loading* saat proses *bending* adalah sebesar 340 MPa. Pada saat proses *unloading* atau setelah pelepasan alat (*remove tooling*), besarnya *Von Mises stress* yang terdapat pada proses menjadi 233 MPa. Selisih besarnya *stress* saat proses *loading* dan *unloading* yaitu sebesar 107 MPa. Hal ini menunjukkan adanya pelepasan gaya yang terjadi pada saat pelepasan alat (*remove tooling*) atau penghilangan beban yang ada pada proses tersebut. Tegangan maksimum yang terdapat pada saat proses *loading* dan *unloading* juga berbeda dari sisi letaknya.

e) Sudut 180°

Hasil persebaran *Von Mises stress* pada simulasi pemodelan pada tube 4x2 cm dengan ketebalan 3 mm dan diberikan *internal pressure* sebesar 5 MPa dengan besar sudut bending sebesar 180° pada proses sebelum pelepasan alat (*loading*) maupun proses setelah pelepasan alat (*unloading*) ditunjukkan pada Gambar 4.33 berikut.



(a)



(b)

Gambar 4.33 Von Mises stress tube 4x2 cm pada sudut 180° saat proses a) Loading b) Unloading



Gambar 4.33 merupakan *Von Mises stress* yang didapat dari pemodelan simulasi proses *rotary draw bending* yang telah dilakukan. Dari gambar hasil yang ada dapat dilihat persebaran tegangan yang terjadi pada proses *rotary draw bending* tersebut. Dari persebaran tersebut dapat dilihat bahwa tegangan tertinggi yang terjadi pada proses *rotary draw bending* ditunjukkan dengan daerah yang berwarna merah saat proses *loading* atau sebelum terjadinya pelepasan alat (*remove tooling*). Daerah yang berwarna merah ini merupakan daerah dimana proses awal dari bending terjadi. Nilai maksimum *Von Mises stress* pada proses *loading* saat proses *bending* adalah sebesar 336 MPa. Pada saat proses *unloading* atau setelah pelepasan alat (*remove tooling*), besarnya *Von Mises stress* yang terdapat pada proses menjadi 237 MPa. Selisih besarnya *stress* saat proses *loading* dan *unloading* yaitu sebesar 99 MPa. Hal ini menunjukkan adanya pelepasan gaya yang terjadi pada saat pelepasan alat (*remove tooling*) atau penghilangan beban yang ada pada proses tersebut. Tegangan maksimum yang terdapat pada saat proses *loading* dan *unloading* juga berbeda dari sisi letaknya.

4.1.2.3 Tube 5x3 cm

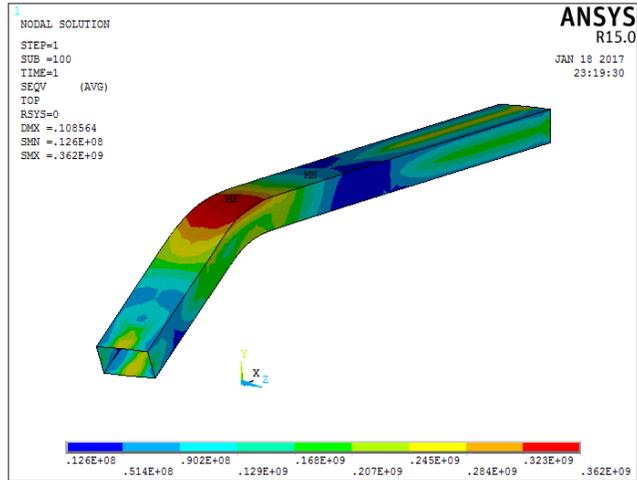
Berikut hasil data analisis *Von Mises stress* yang dihasilkan baik proses sebelum pelepasan alat (*loading*) maupun proses setelah pelepasan alat (*unloading*) pada simulasi pemodelan pada tube 5x3 cm dengan ketebalan 3 mm dan diberikan internal pressure sebesar 5 MPa dengan variasi sudut bending sebesar 30°, 60°, 90°, 120° dan 180°.

a) Sudut 30°

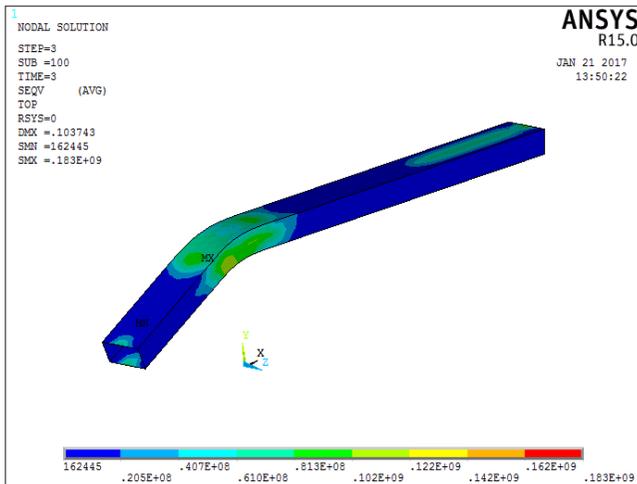
Hasil persebaran *Von Mises stress* pada simulasi pemodelan pada tube 5x3 cm dengan ketebalan 3 mm dan diberikan *internal pressure* sebesar 5 MPa dengan besar sudut bending sebesar 30° pada proses sebelum pelepasan alat (*loading*) maupun proses



setelah pelepasan alat (*unloading*) ditunjukkan pada Gambar 4.34 berikut.



(a)



(b)

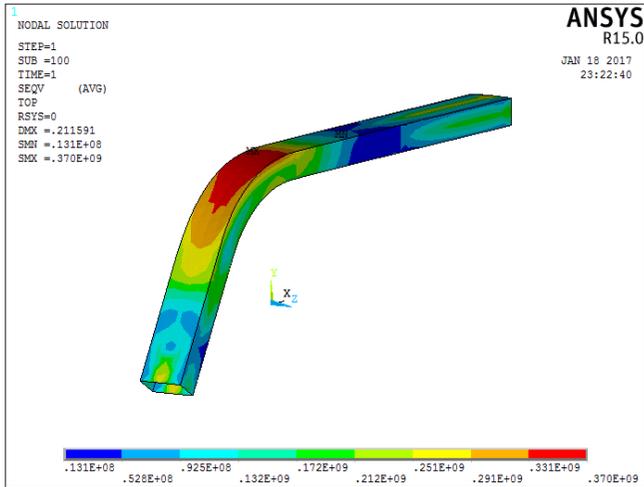
Gambar 4.34 Von Mises stress tube 5x3 cm pada sudut 30° saat proses **a)** Loading **b)** Unloading



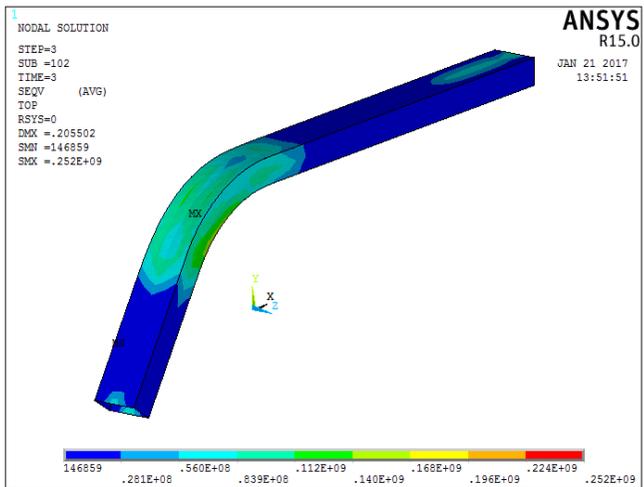
Gambar 4.34 merupakan *Von Mises stress* yang didapat dari pemodelan simulasi proses *rotary draw bending* yang telah dilakukan. Dari gambar hasil yang ada dapat dilihat persebaran tegangan yang terjadi pada proses *rotary draw bending* tersebut. Dari persebaran tersebut dapat dilihat bahwa tegangan tertinggi yang terjadi pada proses *rotary draw bending* ditunjukkan dengan daerah yang berwarna merah saat proses *loading* atau sebelum terjadinya pelepasan alat (*remove tooling*). Daerah yang berwarna merah ini merupakan daerah dimana proses awal dari bending terjadi. Nilai maksimum *Von Mises stress* pada proses *loading* saat proses *bending* adalah sebesar 362 MPa. Pada saat proses *unloading* atau setelah pelepasan alat (*remove tooling*), besarnya *Von Mises stress* yang terdapat pada proses menjadi 183 MPa. Selisih besarnya *stress* saat proses *loading* dan *unloading* yaitu sebesar 179 MPa. Hal ini menunjukkan adanya pelepasan gaya yang terjadi pada saat pelepasan alat (*remove tooling*) atau penghilangan beban yang ada pada proses tersebut. Tegangan maksimum yang terdapat pada saat proses *loading* dan *unloading* juga berbeda dari sisi letaknya.

b) Sudut 60°

Hasil persebaran *Von Mises stress* pada simulasi pemodelan pada tube 5x3 cm dengan ketebalan 3 mm dan diberikan *internal pressure* sebesar 5 MPa dengan besar sudut bending sebesar 60° pada proses sebelum pelepasan alat (*loading*) maupun proses setelah pelepasan alat (*unloading*) ditunjukkan pada Gambar 4.35 berikut.



(a)



(b)

Gambar 4.35 Von Mises stress tube 5x3 cm pada sudut 60° saat proses **a)** Loading **b)** Unloading



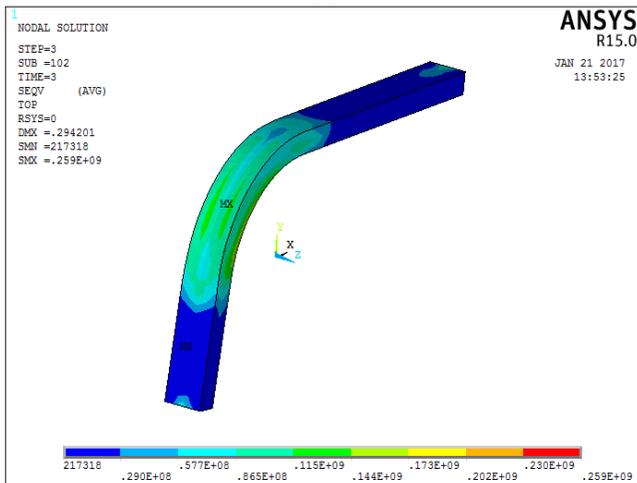
Gambar 4.35 merupakan *Von Mises stress* yang didapat dari pemodelan simulasi proses *rotary draw bending* yang telah dilakukan. Dari gambar hasil yang ada dapat dilihat persebaran tegangan yang terjadi pada proses *rotary draw bending* tersebut. Dari persebaran tersebut dapat dilihat bahwa tegangan tertinggi yang terjadi pada proses *rotary draw bending* ditunjukkan dengan daerah yang berwarna merah saat proses *loading* atau sebelum terjadinya pelepasan alat (*remove tooling*). Daerah yang berwarna merah ini merupakan daerah dimana proses awal dari bending terjadi. Nilai maksimum *Von Mises stress* pada proses *loading* saat proses *bending* adalah sebesar 370 MPa. Pada saat proses *unloading* atau setelah pelepasan alat (*remove tooling*), besarnya *Von Mises stress* yang terdapat pada proses menjadi 252 MPa. Selisih besarnya *stress* saat proses *loading* dan *unloading* yaitu sebesar 118 MPa. Hal ini menunjukkan adanya pelepasan gaya yang terjadi pada saat pelepasan alat (*remove tooling*) atau penghilangan beban yang ada pada proses tersebut. Tegangan maksimum yang terdapat pada saat proses *loading* dan *unloading* juga berbeda dari sisi letaknya.

c) Sudut 90°

Hasil persebaran *Von Mises stress* pada simulasi pemodelan pada tube 5x3 cm dengan ketebalan 3 mm dan diberikan *internal pressure* sebesar 5 MPa dengan besar sudut bending sebesar 90° pada proses sebelum pelepasan alat (*loading*) maupun proses setelah pelepasan alat (*unloading*) ditunjukkan pada Gambar 4.36 berikut.



(a)



(b)

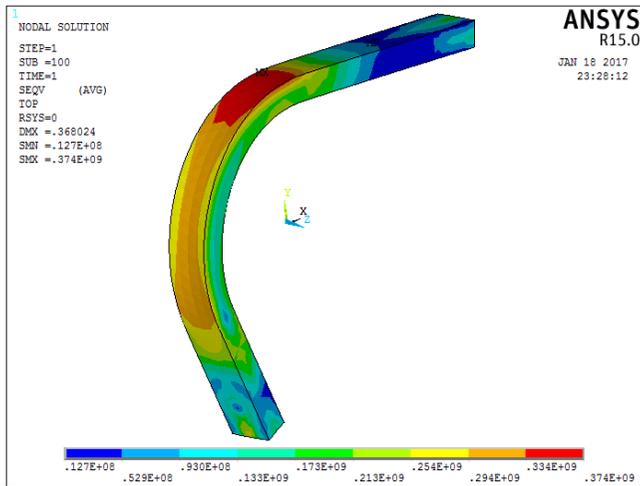
Gambar 4.36 Von Mises stress tube 5x3 cm pada sudut 90° saat proses a) Loading b) Unloading



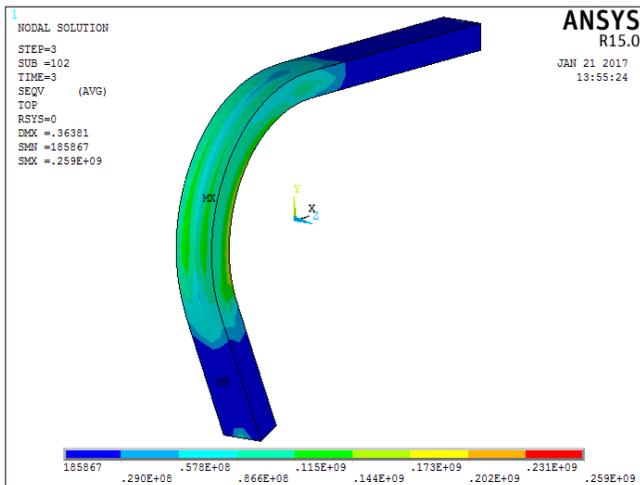
Gambar 4.36 merupakan *Von Mises stress* yang didapat dari pemodelan simulasi proses *rotary draw bending* yang telah dilakukan. Dari gambar hasil yang ada dapat dilihat persebaran tegangan yang terjadi pada proses *rotary draw bending* tersebut. Dari persebaran tersebut dapat dilihat bahwa tegangan tertinggi yang terjadi pada proses *rotary draw bending* ditunjukkan dengan daerah yang berwarna merah saat proses *loading* atau sebelum terjadinya pelepasan alat (*remove tooling*). Daerah yang berwarna merah ini merupakan daerah dimana proses awal dari bending terjadi. Nilai maksimum *Von Mises stress* pada proses *loading* saat proses *bending* adalah sebesar 373 MPa. Pada saat proses *unloading* atau setelah pelepasan alat (*remove tooling*), besarnya *Von Mises stress* yang terdapat pada proses menjadi 259 MPa. Selisih besarnya *stress* saat proses *loading* dan *unloading* yaitu sebesar 114 MPa. Hal ini menunjukkan adanya pelepasan gaya yang terjadi pada saat pelepasan alat (*remove tooling*) atau penghilangan beban yang ada pada proses tersebut. Tegangan maksimum yang terdapat pada saat proses *loading* dan *unloading* juga berbeda dari sisi letaknya.

d) Sudut 120°

Hasil persebaran *Von Mises stress* pada simulasi pemodelan pada tube 5x3 cm dengan ketebalan 3 mm dan diberikan *internal pressure* sebesar 5 MPa dengan besar sudut bending sebesar 120° pada proses sebelum pelepasan alat (*loading*) maupun proses setelah pelepasan alat (*unloading*) ditunjukkan pada Gambar 4.37 berikut.



(a)



(b)

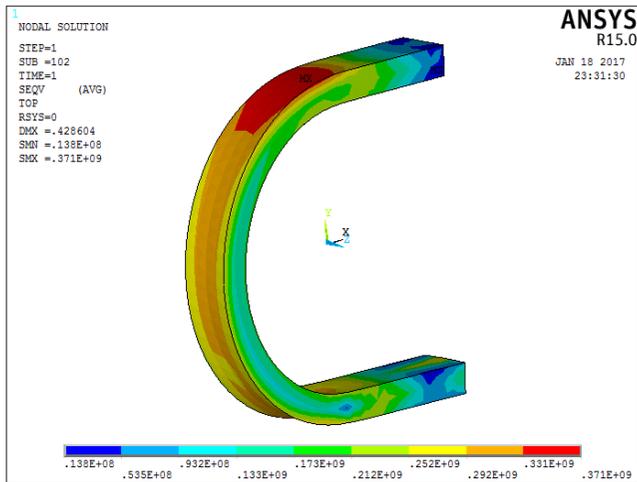
Gambar 4.37 Von Mises stress tube 5x3 cm pada sudut 120° saat proses **a)** Loading **b)** Unloading



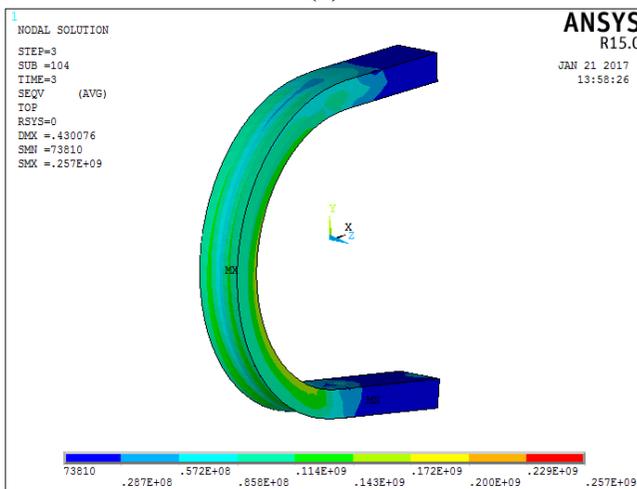
Gambar 4.37 merupakan *Von Mises stress* yang didapat dari pemodelan simulasi proses *rotary draw bending* yang telah dilakukan. Dari gambar hasil yang ada dapat dilihat persebaran tegangan yang terjadi pada proses *rotary draw bending* tersebut. Dari persebaran tersebut dapat dilihat bahwa tegangan tertinggi yang terjadi pada proses *rotary draw bending* ditunjukkan dengan daerah yang berwarna merah saat proses *loading* atau sebelum terjadinya pelepasan alat (*remove tooling*). Daerah yang berwarna merah ini merupakan daerah dimana proses awal dari bending terjadi. Nilai maksimum *Von Mises stress* pada proses *loading* saat proses *bending* adalah sebesar 374 MPa. Pada saat proses *unloading* atau setelah pelepasan alat (*remove tooling*), besarnya *Von Mises stress* yang terdapat pada proses menjadi 259 MPa. Selisih besarnya *stress* saat proses *loading* dan *unloading* yaitu sebesar 115 MPa. Hal ini menunjukkan adanya pelepasan gaya yang terjadi pada saat pelepasan alat (*remove tooling*) atau penghilangan beban yang ada pada proses tersebut. Tegangan maksimum yang terdapat pada saat proses *loading* dan *unloading* juga berbeda dari sisi letaknya.

e) Sudut 180°

Hasil persebaran *Von Mises stress* pada simulasi pemodelan pada tube 5x3 cm dengan ketebalan 3 mm dan diberikan *internal pressure* sebesar 5 MPa dengan besar sudut bending sebesar 180° pada proses sebelum pelepasan alat (*loading*) maupun proses setelah pelepasan alat (*unloading*) ditunjukkan pada Gambar 4.38 berikut.



(a)



(b)

Gambar 4.38 Von Mises stress tube 5x3 cm pada sudut 180° saat proses **a)** Loading **b)** Unloading

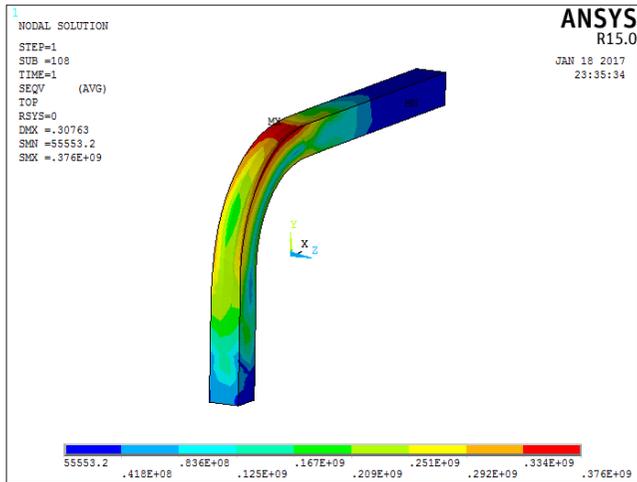


Gambar 4.38 merupakan *Von Mises stress* yang didapat dari pemodelan simulasi proses *rotary draw bending* yang telah dilakukan. Dari gambar hasil yang ada dapat dilihat persebaran tegangan yang terjadi pada proses *rotary draw bending* tersebut. Dari persebaran tersebut dapat dilihat bahwa tegangan tertinggi yang terjadi pada proses *rotary draw bending* ditunjukkan dengan daerah yang berwarna merah saat proses *loading* atau sebelum terjadinya pelepasan alat (*remove tooling*). Daerah yang berwarna merah ini merupakan daerah dimana proses awal dari bending terjadi. Nilai maksimum *Von Mises stress* pada proses *loading* saat proses *bending* adalah sebesar 371 MPa. Pada saat proses *unloading* atau setelah pelepasan alat (*remove tooling*), besarnya *Von Mises stress* yang terdapat pada proses menjadi 257 MPa. Selisih besarnya *stress* saat proses *loading* dan *unloading* yaitu sebesar 114 MPa. Hal ini menunjukkan adanya pelepasan gaya yang terjadi pada saat pelepasan alat (*remove tooling*) atau penghilangan beban yang ada pada proses tersebut. Tegangan maksimum yang terdapat pada saat proses *loading* dan *unloading* juga berbeda dari sisi letaknya.

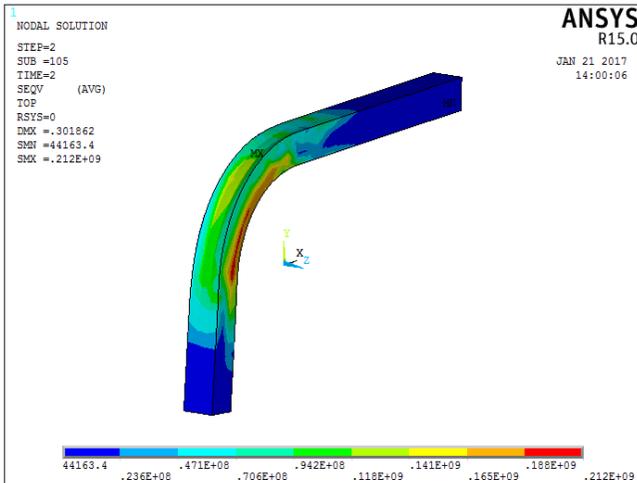
Pemodelan berikutnya adalah pemodelan pengaruh variasi ketebalan dinding tube terhadap persebaran *Von Mises stress* pada saat proses *loading* dan *unloading*. Masing-masing menggunakan tube dengan ukuran sisi 4x4 cm dan tidak diberikan *internal pressure* serta sudut bending yang diberikan sebesar 90°. Variasi ketebalan dinding tube yang digunakan yaitu sebesar 1 mm, 2 mm, dan 3 mm.

4.1.1.4 Ketebalan 1 mm

Hasil persebaran *Von Mises stress* pada simulasi pemodelan pada tube 4x4 cm dengan ketebalan 1 mm dan tanpa diberikan *internal pressure* dengan besar sudut bending sebesar 90° pada proses sebelum pelepasan alat (*loading*) maupun proses setelah pelepasan alat (*unloading*) ditunjukkan pada Gambar 4.39 berikut.



(a)



(b)

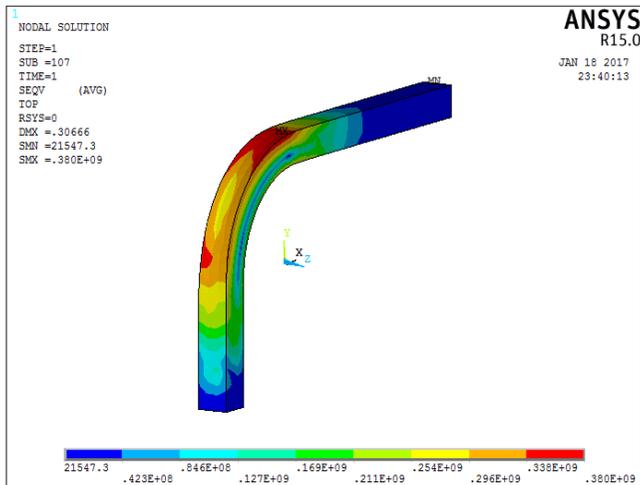
Gambar 4.39 Von Mises stress tube 4x4 cm pada sudut 90° dengan ketebalan 1 mm saat proses a) Loading b) Unloading



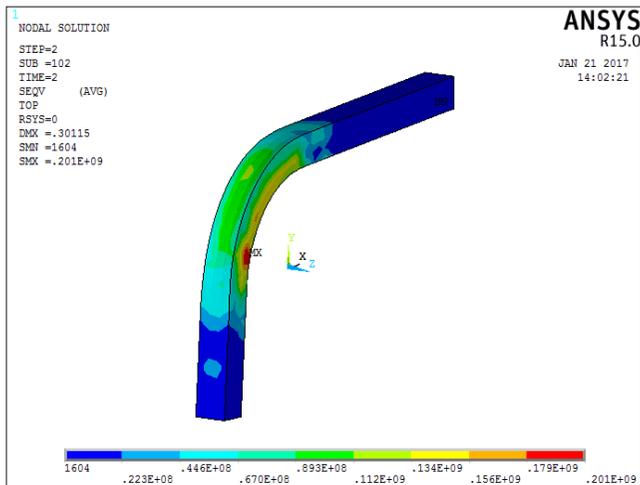
Gambar 4.39 merupakan *Von Mises stress* yang didapat dari pemodelan simulasi proses *rotary draw bending* yang telah dilakukan. Dari gambar hasil yang ada dapat dilihat persebaran tegangan yang terjadi pada proses *rotary draw bending* tersebut. Dari persebaran tersebut dapat dilihat bahwa tegangan tertinggi yang terjadi pada proses *rotary draw bending* ditunjukkan dengan daerah yang berwarna merah saat proses *loading* atau sebelum terjadinya pelepasan alat (*remove tooling*). Daerah yang berwarna merah ini merupakan daerah dimana proses awal dari bending terjadi. Nilai maksimum *Von Mises stress* pada proses *loading* saat proses *bending* adalah sebesar 376 MPa. Pada saat proses *unloading* atau setelah pelepasan alat (*remove tooling*), besarnya *Von Mises stress* yang terdapat pada proses menjadi 212 MPa. Selisih besarnya *stress* saat proses *loading* dan *unloading* yaitu sebesar 164 MPa. Hal ini menunjukkan adanya pelepasan gaya yang terjadi pada saat pelepasan alat (*remove tooling*) atau penghilangan beban yang ada pada proses tersebut. Tegangan maksimum yang terdapat pada saat proses *loading* dan *unloading* juga berbeda dari sisi letaknya.

4.1.1.5 Ketebalan 2 mm

Hasil persebaran *Von Mises stress* pada simulasi pemodelan pada tube 4x4 cm dengan ketebalan 2 mm dan tanpa diberikan *internal pressure* dengan besar sudut bending sebesar 90° pada proses sebelum pelepasan alat (*loading*) maupun proses setelah pelepasan alat (*unloading*) ditunjukkan pada Gambar 4.40 berikut.



(a)



(b)

Gambar 4.40 Von Mises stress tube 4x4 cm pada sudut 90° dengan ketebalan 2 mm saat proses a) Loading b) Unloading



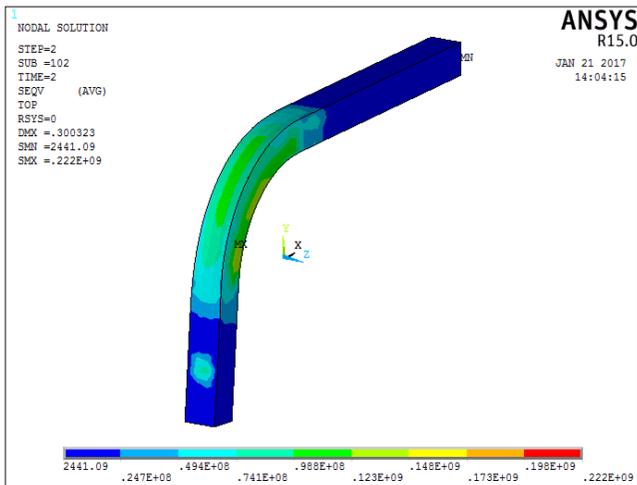
Gambar 4.40 merupakan *Von Mises stress* yang didapat dari pemodelan simulasi proses *rotary draw bending* yang telah dilakukan. Dari gambar hasil yang ada dapat dilihat persebaran tegangan yang terjadi pada proses *rotary draw bending* tersebut. Dari persebaran tersebut dapat dilihat bahwa tegangan tertinggi yang terjadi pada proses *rotary draw bending* ditunjukkan dengan daerah yang berwarna merah saat proses *loading* atau sebelum terjadinya pelepasan alat (*remove tooling*). Daerah yang berwarna merah ini merupakan daerah dimana proses awal dari bending terjadi. Nilai maksimum *Von Mises stress* pada proses *loading* saat proses *bending* adalah sebesar 380 MPa. Pada saat proses *unloading* atau setelah pelepasan alat (*remove tooling*), besarnya *Von Mises stress* yang terdapat pada proses menjadi 201 MPa. Selisih besarnya *stress* saat proses *loading* dan *unloading* yaitu sebesar 179 MPa. Hal ini menunjukkan adanya pelepasan gaya yang terjadi pada saat pelepasan alat (*remove tooling*) atau penghilangan beban yang ada pada proses tersebut. Tegangan maksimum yang terdapat pada saat proses *loading* dan *unloading* juga berbeda dari sisi letaknya.

4.1.1.6 Ketebalan 3 mm

Hasil persebaran *Von Mises stress* pada simulasi pemodelan pada tube 4x4 cm dengan ketebalan 3 mm dan tanpa diberikan *internal pressure* dengan besar sudut bending sebesar 90° pada proses sebelum pelepasan alat (*loading*) maupun proses setelah pelepasan alat (*unloading*) ditunjukkan pada Gambar 4.41 berikut.



(a)



(b)

Gambar 4.41 Von Mises stress tube 4x4 cm pada sudut 90° dengan ketebalan 3 mm saat proses a) Loading b) Unloading



Gambar 4.41 merupakan *Von Mises stress* yang didapat dari pemodelan simulasi proses *rotary draw bending* yang telah dilakukan. Dari gambar hasil yang ada dapat dilihat persebaran tegangan yang terjadi pada proses *rotary draw bending* tersebut. Dari persebaran tersebut dapat dilihat bahwa tegangan tertinggi yang terjadi pada proses *rotary draw bending* ditunjukkan dengan daerah yang berwarna merah saat proses *loading* atau sebelum terjadinya pelepasan alat (*remove tooling*). Daerah yang berwarna merah ini merupakan daerah dimana proses awal dari bending terjadi. Nilai maksimum *Von Mises stress* pada proses *loading* saat proses *bending* adalah sebesar 388 MPa. Pada saat proses *unloading* atau setelah pelepasan alat (*remove tooling*), besarnya *Von Mises stress* yang terdapat pada proses menjadi 222 MPa. Selisih besarnya *stress* saat proses *loading* dan *unloading* yaitu sebesar 166 MPa. Hal ini menunjukkan adanya pelepasan gaya yang terjadi pada saat pelepasan alat (*remove tooling*) atau penghilangan beban yang ada pada proses tersebut. Tegangan maksimum yang terdapat pada saat proses *loading* dan *unloading* juga berbeda dari sisi letaknya.

4.2 Pembahasan

Berdasarkan hasil yang didapat dari simulasi, dapat dilihat bahwa hasil *springback* menunjukkan adanya pengaruh tiap variasi terhadap besarnya *springback*. Pertama, terlihat bahwa semakin besar sudut bending, maka semakin besar pula *springback* yang dihasilkan. Kedua, seiring bertambahnya ketebalan maka besar *springback* semakin berkurang. Secara variasi ukuran sisi tube, didapatkan hasil bahwa *springback* terbesar terjadi pada tube dengan ukuran 4 x 2 cm, kemudian 5 x 3 cm, dan terakhir 4 x 4 cm. Hasil variasi geometri tube, baik ukuran sisi tube maupun ketebalan dinding tube terhadap besar *springback* dapat dijelaskan secara matematis berdasarkan rumus. Melalui persamaan (2.1) terlihat bahwa adanya pengaruh geometri tube, dimana faktor geometri ini



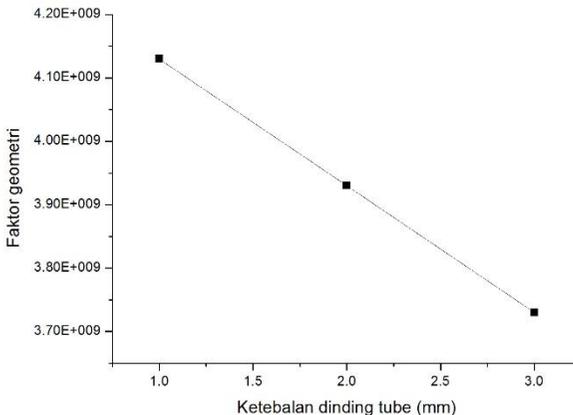
berpengaruh pada besarnya momen bending dan momen inersia. Faktor geometri dapat dirumuskan sebagai berikut,

$$k = \frac{R_l M_l}{I} \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

dimana, k = faktor geometri, R = jarak bending, M = momen bending, dan I = momen inesia. Apabila dibandingkan maka dapat dilihat bahwa semakin besar nilai k, maka semakin besar pula *springback* yang dihasilkan seperti dapat dilihat pada Tabel 4.6 dan Gambar 4.42.

Tabel 4.6 Faktor geometri tiap ketebalan tube

No	Ketebalan dinding tube	k (Faktor Geometri)
1	1 mm	4.13E+09
2	2 mm	3.93E+09
3	3 mm	3.73E+09



Gambar 4.42 Grafik pengaruh ketebalan dinding tube terhadap faktor geometri



Hasil lainnya yang bisa diamati yaitu besarnya *Von Mises stress* pada saat proses bending baik pada saat proses *loading* maupun *unloading*. Pada saat *loading*, proses bending dilakukan dan didapatkan hasil *Von Mises stress* yang ada berkisar antara 330 hingga 400 MPa pada setiap geometri dan berada pada wilayah tegangan plastis. Kemudian pada saat *unloading*, proses dihentikan dan dilakukan proses pelepasan alat (*remove tooling*). Setelah dilakukan pelepasan alat (*remove tooling*), didapatkan besarnya *Von Mises stress* yang tersisa menjadi berkisar antara 150 hingga 260 MPa, dimana selisih yang terjadi atau besarnya *stress* yang hilang dari proses *loading* ke *unloading* yaitu sebesar 100 hingga 250 MPa.



“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan analisis hasil dan pembahasan, maka dapat disimpulkan:

1. Semakin besar sudut bending maka *springback* akan semakin besar, sebaliknya semakin kecil sudut bending maka *springback* akan semakin kecil.
2. Semakin bertambahnya ketebalan tube maka *springback* akan semakin kecil, semakin berkurang ketebalan tube maka *springback* akan semakin besar.
3. Pengaruh ukuran penampang terhadap *springback* dapat dinyatakan dengan k , faktor geometri apabila nilai k semakin besar maka *springback* semakin besar, apabila nilai faktor k semakin kecil maka *springback* semakin kecil.

5.2 Saran

Saran-saran yang dapat digunakan untuk penelitian berikutnya adalah:

1. Menggunakan mandrel dalam simulasi pemodelan agar hasil yang didapatkan lebih akurat dalam menganalisis besarnya stress dan *springback*.
2. Melakukan percobaan eksperimen agar hasil secara simulasi dan perhitungan rumus dapat langsung dibandingkan.



“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR PUSTAKA

- Boyer, Rodney., Gerhard Welsch, dan E.W. Collings. (1993). *Materials Properties Handbook: Titanium Alloys*. ASM International.
- Da-xin, E. et al. (2009). *Spring-back deformation in tube bending*. Beijing: Beijing Institute of Technology.
- Gu. et al. (2008). *Research on the springback of thin-walled tube NC bending based on the numerical simulation of the whole process*. Xi'an: Northwestern Polytechnical University.
- Gupta, R.K., Christy Mathew, dan P.Ramkumar. (2015). *Strain Hardening in Aerospace Alloys*.
- Jiang, Z.Q. et al. (2010). *Establishment of a 3D FE model for the bending of a titanium alloy tube*. Xi'an: Northwestern Polytechnical University.
- Köseoğlu, S. dan H. Parlak. (2012). *Capacity Calculator for Rotary Draw Tube Bending*. Linnaeus University.
- Li, K.P., W.P. Carden, dan R.H. Wagoner. (2002). *Simulation of springback*. Columbus: The Ohio State University.
- Miller, Gregory. (2003). *Tube Forming Processes: A Comprehensive Guide*. Society of Manufacturing Engineers.
- Murata, M. et al. (2008). *Effect of hardening exponent on tube bending*. Tokyo: The University of Electro-Communications.
- Parisher, Roy A., dan Robert A. Rhea. (2002). *Pipe Drafting And Design*. USA: Gulf Professional.
- Paulsen, F. dan T. Welo. (1996). *Application of numerical simulation in the bending of aluminium-alloy profiles*.
- Song, F. et al. (2013). *Springback prediction of thick-walled high-strength titanium tube bending*. Xi'an: Northwestern Polytechnical University.
- Sözen. et al. (2012). *Investigation and prediction of springback in rotary-draw tube bending process using finite element method*. Ankara: TOBB University of Economics and Technology.

- Tang, N.C. (2000). *Plastic deformation analysis in tube bending*. Canada.
- Thorat, Sandeep. (2015). *Finite Element Analysis and Mathematical Calculation of Springback in Rotary Draw Tube Bending*. Pune: MIT College of Engineering.
- Xue, X. et al. (2014). *Twist Springback of Asymmetric Thin-walled Tube in Mandrel Rotary Draw Bending Process*. Nagoya: Japan.
- Yang, H., H. Li, dan M. Zhan. (2010). *Friction role in bending behaviors of thin-walled tube in rotary-draw-bending under small bending radii*. Xi'an: Northwestern Polytechnical University.
- Zhan, et al. (2006). *Springback analysis of numerical control bending of thin-walled tube using numerical-analytic method*. Xi'an: Northwestern Polytechnical University.
- Zhao. et al. (2009). *Three-dimensional finite-elements modeling and simulation of rotary-draw bending process for thin-walled rectangular tube*. Xi'an: Northwestern Polytechnical University.

BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap Iman Satria Sidabutar dilahirkan di Medan, 25 Februari 1995, merupakan anak ketiga dari tiga bersaudara pasangan H. Sidabutar dan Masrina P. Nainggolan. Penulis menempuh pendidikan formal di SD Lematang Lestari hingga kelas 2 SD, dilanjutkan di SDK BPK PENABUR Cikarang Baru. Kemudian melanjutkan studi di SMP Don Bosco III, dan SMA Don Bosco III. Setelah lulus dari SMA tahun 2012, penulis diterima menjadi mahasiswa di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS dan terdaftar secara administrasi dengan NRP. 2712 100 139. Semasa perkuliahan, penulis aktif berorganisasi menjadi staff Kedirjenan Pemasaran dan Kerjasama, Kementerian Komunikasi dan Informasi BEM ITS, staff Departemen Kewirausahaan MBP ITS, dan Kepala Departemen Kewirausahaan MBP ITS. Juga aktif terlibat dalam kepanitiaan acara GERIGI ITS dan ITS EXPO. Penulis melaksanakan kerja praktek di PT TIMAH Tbk dan juga melaksanakan sertifikasi Corrosion Engineer di INDOCOR tentang Corrosion Training and Certification pada tahun 2015.

Penulis menutup jenjang perkuliahan dengan Tugas Akhir berjudul **“Analisis Springback Pada Tube Titanium Berpenampang Segiempat Pada Proses Rotary Draw Bending”**.

Email : iman.sidabutar@yahoo.com

Telepon: 081295832835

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LAMPIRAN

Lampiran 1

Mesin Rotary Draw Bending pada industri



Lampiran 2

Notepad Pemodelan Tube Bending Pada ANSYS

```
/NOPR
/PMETH,OFF,0
KEYW,PR_SET,1
KEYW,PR_STRUC,1
KEYW,PR_THERM,0
KEYW,PR_FLUID,0
KEYW,PR_MULT1,0
KEYW,LSDYNA,0
/GO

/PREP7
ET,1,SHELL181
KEYOPT,1,8,2

R,1,0.003,0.003,0.003,0.003, , !pipe thickness
t=3 mm

MP,EX,1,105E9
MP,PRXY,1,0.37
MP,DENS,1,4510

TB,BISO,1,1,2,
TBTEMP,0
TBDATA,,276E6,761.4E6,...

K,1,0,0,0
K,2,0,-0.14,0.02
K,3,0,-0.14,-0.02
K,4,0,-0.12,0.02
K,5,0,-0.12,-0.02
K,6,0.14,0,0.02
K,7,0.14,0,-0.02
K,8,0.12,0,0.02
K,9,0.12,0,-0.02
K,10,0.14,-0.02
K,11,0.14,0,0.02
K,12,0,0.12,0.02
K,13,0,0.12,-0.02
K,14,0,0.16,0.02
K,15,0,0.16,-0.02
K,16,-0.1,0.16,0.02
K,17,-0.1,0.16,-0.02
```

K,18,-0.1,0.12,-0.02	K,33,0.2,0.14,-0.02
K,19,-0.1,0.12,0.02	K,34,0.3,0.14,0.02
K,20,0,0.02	K,35,0.3,0.14,-0.02
K,21,0,0,-0.02	
	LSTR, 24, 28
KBETW,16,19,0,RATI,0.5,	LSTR, 28, 32
KBETW,17,18,0,RATI,0.5,	LSTR, 32, 34
	LSTR, 34, 30
LARC,4,8,20,0.12	LSTR, 30, 26
LARC,8,12,20,0.12	LSTR, 26, 24
LARC,5,9,21,0.12	LSTR, 25, 29
LARC,9,13,21,0.12	LSTR, 29, 33
LARC,2,6,20,0.14	LSTR, 33, 35
LARC,6,11,20,0.14	LSTR, 35, 31
LARC,3,7,21,0.14	LSTR, 31, 27
LARC,7,10,21,0.14	LSTR, 27, 25
	LSTR, 26, 27
LSTR,2,4	LSTR, 24, 25
LSTR,3,5	LSTR, 28, 29
LSTR,4,5	LSTR, 30, 31
LSTR,6,8	
LSTR,7,9	AL,19,29,27,28
LSTR,11,12	AL,16,21,22,20
LSTR,10,13	AL,14,30,23,20
LSTR,3,5	AL,17,28,25,30
LSTR,4,5	AL,15,31,24,21
LSTR,6,8	AL,18,29,26,31
LSTR,7,9	AL,9,5,12,1
LSTR,11,12	AL,12,6,14,2
LSTR,12,13	AL,7,13,3,10
LSTR,11,14	AL,13,8,15,4
LSTR,10,15	AL,1,32,3,11
LSTR,14,15	AL,2,32,4,16
LSTR,12,19	AL,33,34,35,36,37,38
LSTR,13,18	AL,39,40,41,42,43,44
LSTR,18,19	AL,33,47,39,46
LSTR,19,22	AL,37,48,43,45
LSTR,18,23	
LSTR,16,22	K,36,-0.15,0.1215,0.0185
LSTR,17,23	K,37,-0.15,0.1215,-0.0185
LSTR,16,17	K,38,-0.15,0.1585,0.0185
LSTR,14,16	K,39,-0.15,0.1585,-0.0185
LSTR,15,17	K,40,0.550,0.1215,0.0185
LSTR,11,22	K,41,0.550,0.1215,-0.0185
LSTR,10,23	K,42,0.550,0.1585,0.0185
LSTR,8,9	K,43,0.550,0.1585,-0.0185
K,24,0,0.12,0.02	LSTR,36,40
K,25,0,0.12,-0.02	LSTR,40,42
K,26,0,0.16,0.02	LSTR,42,38
K,27,0,0.16,-0.02	LSTR,38,36
K,28,0.2,0.12,0.02	LSTR,37,41
K,29,0.2,0.12,-0.02	LSTR,41,43
K,30,0.3,0.16,0.02	LSTR,43,39
K,31,0.3,0.16,-0.02	LSTR,39,37
K,32,0.2,0.14,0.02	LSTR,36,40

```

LSTR,40,41
LSTR,41,37
LSTR,37,36
LSTR,38,42
LSTR,42,43
LSTR,43,39
LSTR,39,38

AL,49,50,51,52
AL,53,54,55,56
AL,49,57,53,58
AL,51,59,55,60

NUMCMP,AREA
NUMCMP,LINE
NUMCMP,KP

ASEL,S,,,17,20,1,

TYPE, 1
MAT, 1
REAL, 1
ESYS, 0
SECNUM,
!*
SMRT,1
MSHAPE,1,2D
MSHKEY,0

AMESH,ALL

!ASEL,S,,,17,20,1,
!AREFINE,ALL, , ,1,0,1,1
!ALLSEL,ALL

ASEL,S, , ,18,20,1,
ESLA,S
ENSYM, , , ALL, !reversing normal
ALLSEL,ALL
APLOT

!*
!*
CM,_NODECM,NODE
CM,_ELEMCM,ELEM
CM,_KPCM,KP
CM,_LINECM,LINE
CM,_AREACM,AREA
CM,_VOLUCM,VOLU
/GSAV,cwz,gsav,,temp
MP,MU,1,0.2
MAT,1
MP,EMIS,1,7.88860905221e-031
R,3
REAL,3
ET,2,170

ET,3,174
R,3,,,0,1,0,1,0,
RMORE,,,1,0E20,0,0,1,0,
RMORE,0,0,0,1,0,,1,0,0,5
RMORE,0,1,0,1,0,0,0,1,0
KEYOPT,3,4,0
KEYOPT,3,5,1
KEYOPT,3,7,0
KEYOPT,3,8,0
KEYOPT,3,9,0
KEYOPT,3,10,2
KEYOPT,3,11,0
KEYOPT,3,12,0
KEYOPT,3,2,0
KEYOPT,2,1,0
KEYOPT,2,2,0
KEYOPT,2,3,0
KEYOPT,2,5,0
! Generate the target surface
ASEL,S,,,1
ASEL,A,,,2
ASEL,A,,,3
ASEL,A,,,4
ASEL,A,,,5
ASEL,A,,,6
ASEL,A,,,7
ASEL,A,,,8
ASEL,A,,,9
ASEL,A,,,10
ASEL,A,,,11
ASEL,A,,,12
CM,_TARGET,AREA
AATT,-1,3,2,-1
TYPE,2
AMESH,ALL
! Create a pilot node
N,5000,0,0,0
TSHAP,PILO
E,5000
NSEL,S,,,5000
CM,a,NODE
CMSEL,S,_NODECM
! Generate the contact surface
ASEL,S,,,17
ASEL,A,,,18
ASEL,A,,,19
ASEL,A,,,20
CM,_CONTACT,AREA
TYPE,3
NSLA,S,1
ESLN,S,0
NSLE,A,CT2 ! CZMESH patch (fsk qt-40109
8/2008)
ESURF
*SET,_REALID,3
ALLSEL

```

```

ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,2
ESEL,A,TYPE,,3
ESEL,R,REAL,,3
ASEL,S,REAL,,3
/PSYMB,ESYS,1
/PNUM,TYPE,1
/NUM,1
EPLLOT
! Reverse target normals
FLST,5,6,5,ORDE,5
FITEM,5,1
FITEM,5,4
FITEM,5,-5
FITEM,5,10
FITEM,5,-12
CM,_Y,AREA
ASEL,,.P51X
CM,_YLN,LINE
CM,_YEL,ELEM
CM,_YND,NODE
LSLA,S,1
NSLA,S,1
ESLN,S,1
ESEL,R,REAL,,_REALID
ESURF,,REVERSE
CMSEL,S,_Y
CMSEL,S,_YLN
CMSEL,S,_YEL
CMSEL,S,_YND
CMDELE,_Y
CMDELE,_YLN
CMDELE,_YEL
CMDELE,_YND
/REPLOTT
!*
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,2
ESEL,A,TYPE,,3
ESEL,R,REAL,,3
ASEL,S,REAL,,3
/PSYMB,ESYS,1
/PNUM,TYPE,1
/NUM,1
EPLLOT
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,2
ESEL,A,TYPE,,3
ESEL,R,REAL,,3
ASEL,S,REAL,,3
CMSEL,A,_NODECM
CMDEL,_NODECM
CMSEL,A,_ELEMCM
CMDEL,_ELEMCM
CMSEL,S,_KPCM
CMDEL,_KPCM

```

```

CMSEL,S,_LINECM
CMDEL,_LINECM
CMSEL,S,_AREACM
CMDEL,_AREACM
CMSEL,S,_VOLUCM
CMDEL,_VOLUCM
/GRES,cwz,gsav
CMDEL,_TARGET
CMDEL,_CONTACT
!*
CM,_CWZ_EL,ELEM
CM,_CWZ_ND,NODE
CM,_CWZ_KP,KP
CM,_CWZ_LN,LINE
CM,_CWZ_AR,AREA
CM,_CWZ_VL,VOLU
ESEL,NONE
ESEL,A,REAL,,3
ESEL,R,ENAME,,169,177
NSLE
KSLN,S
LSLK,S,1
ASLL,S,1
CM,_CWZ_EL_UE,ELEM
NSLE
ESLN
ESEL,U,ENAME,,169,177
CMSEL,A,_CWZ_EL_UE
CNCHECK
CMDEL,_CWZ_EL_UE
CMSEL,S,_CWZ_EL
CMDEL,_CWZ_EL
CMSEL,S,_CWZ_ND
CMDEL,_CWZ_ND
CMSEL,S,_CWZ_KP
CMDEL,_CWZ_KP
CMSEL,S,_CWZ_LN
CMDEL,_CWZ_LN
CMSEL,S,_CWZ_AR
CMDEL,_CWZ_AR
CMSEL,S,_CWZ_VL
CMDEL,_CWZ_VL
!*
!*
!*
CM,_NODECM,NODE
CM,_ELEMCM,ELEM
CM,_KPCM,KP
CM,_LINECM,LINE
CM,_AREACM,AREA
CM,_VOLUCM,VOLU
/GSAV,cwz,gsav,,temp
MP,MU,1,0.2
MAT,1
MP,EMIS,1,7.88860905221e-031

```

```

R,4
REAL,4
ET,4,170
ET,5,174
R,4,,0,1,0,1,0,
RMORE,,,1.0E20,0,0,1,0,
RMORE,0,0,0,1,0,,1,0,0,5
RMORE,0,1,0,1,0,0,0,,1,0
KEYOPT,5,4,0
KEYOPT,5,5,1
KEYOPT,5,7,0
KEYOPT,5,8,0
KEYOPT,5,9,0
KEYOPT,5,10,2
KEYOPT,5,11,0
KEYOPT,5,12,0
KEYOPT,5,2,0
KEYOPT,4,1,0
KEYOPT,4,2,0
KEYOPT,4,3,0
KEYOPT,4,5,0
! Generate the target surface
ASEL,S,,13
ASEL,A,,14
ASEL,A,,15
ASEL,A,,16
CM,_TARGET,AREA
AATT,-1,4,4,-1
TYPE,4
AMESH,ALL
! Generate the contact surface
ASEL,S,,17
ASEL,A,,18
ASEL,A,,19
ASEL,A,,20
CM,_CONTACT,AREA
TYPE,5
NSLA,S,1
ESLN,S,0
NSLE,A,CT2 ! CZMESH patch (fsk qt-40109
8/2008)
ESURF
*SET,_REALID,4
ALLSEL
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,4
ESEL,A,TYPE,,5
ESEL,R,REAL,,4
ASEL,S,REAL,,4
/PSYMB,ESYS,1
/PNUM,TYPE,1
/NUM,1
EPLOT
! Reverse target normals
CM,_Y,AREA
ASEL, , , 13

```

```

CM,_YLN,LINE
CM,_YEL,ELEM
CM,_YND,NODE
LSLA,S,1
NSLA,S,1
ESLN,S,1
ESEL,R,REAL,,_REALID
ESURF,REVERSE
CMSEL,S,_Y
CMSEL,S,_YLN
CMSEL,S,_YEL
CMSEL,S,_YND
CMDELE,_Y
CMDELE,_YLN
CMDELE,_YEL
CMDELE,_YND
/REPLOT
!*
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,4
ESEL,A,TYPE,,5
ESEL,R,REAL,,4
ASEL,S,REAL,,4
/PSYMB,ESYS,1
/PNUM,TYPE,1
/NUM,1
EPLOT
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,4
ESEL,A,TYPE,,5
ESEL,R,REAL,,4
ASEL,S,REAL,,4
CMSEL,A,_NODECM
CMDEL,_NODECM
CMSEL,A,_ELEMCM
CMDEL,_ELEMCM
CMSEL,S,_KPCM
CMDEL,_KPCM
CMSEL,S,_LINECM
CMDEL,_LINECM
CMSEL,S,_AREACM
CMDEL,_AREACM
CMSEL,S,_VOLUCM
CMDEL,_VOLUCM
/GRES,cwz,gsav
CMDEL,_TARGET
CMDEL,_CONTACT

/SOL
FLST,2,1,1,ORDE,1
FITEM,2,5000
!*
/GO
D,P51X, ,3.14159, , , ,ROTZ, , , ,
!30=-0.523599;60=1.0472;90=1.5708;120=2.
0944;180=3.14159

```

```
ANTYPE,0
NLGEOM,1
NSUBST,100,1000,100
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,ALL
TIME,1

FLST,2,4,5,ORDE,2 !pressure=5MPa
FITEM,2,17
FITEM,2,-20
/GO
!*
SFA,P51X,1,PRES,5E6

/PREP7 !beam/shell effect
KEYOPT,3,11,1
KEYOPT,5,11,1
/MREP,EPL0T
```