



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TM 184835

**ANALISA SIMULASI PROSES *COLD FORGING*
RODA KERETA BERKECEPATAN RENDAH
DENGAN METODE ELEMEN HINGGA**

ROZE WINDU YUNI SYARAH
NRP 0211164000039

Dosen Pembimbing
Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020



TUGAS AKHIR - TM 184835

**ANALISA SIMULASI PROSES *COLD FORGING*
RODA KERETA BERKECEPATAN RENDAH
DENGAN METODE ELEMEN HINGGA**

ROZE WINDU YUNI SYARAH
NRP 0211164000039

Dosen Pembimbing
Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020



FINAL PROJECT - TM 184835

**SIMULATION ANALYSIS OF COLD FORGING
PROCESS FOR LOW SPEED TRAIN WHEEL
WITH FINITE ELEMENT METHODES**

**ROZE WINDU YUNI SYARAH
NRP 0211164000039**

Academic Advisor
Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA

**MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology and System Engineering
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2020**

HALAMAN PENGESAHAN

ANALISA SIMULASI PROSES *COLD FORGING* RODA KERETA BERKECEPATAN RENDAH DENGAN METODE ELEMEN HINGGA

TUGAS AKHIR





Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

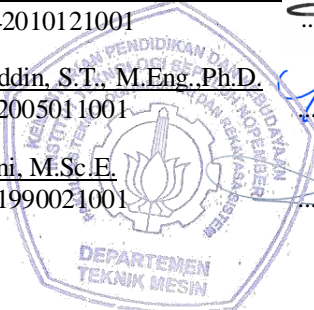
Oleh :

ROZE WINDU YUNI SYARAH

Nrp. 02111640000039

Disetujui oleh :

1. Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA.
NIP. 196508101991021001  (Pembimbing)
2. Mohammad Khoirul Effendi, ST., M.Sc. En.
NIP. 198204142010121001  (Penguji I)
3. Achmad Syaifuddin, S.T., M.Eng., Ph.D.
NIP. 197909262005011001  (Penguji II)
4. Ir. Yusuf Kaelani, M.Sc.E.
NIP. 196511031990021001  (Penguji III)



**SURABAYA
AGUSTUS, 2020**

ANALISA SIMULASI PROSES *COLD FORGING* RODA KERETA BERKECEPATAN RENDAH DENGAN METODE ELEMEN HINGGA

Nama Mahasiswa : Roze Windu Yuni Syarah
NRP : 0211164000039
Departemen : Teknik Mesin FTIRS-ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA

Abstrak

Pembuatan roda kereta api menurut standar Association of American Railroads (AAR) melalui proses forging atau casting. Forging merupakan proses pembentukan logam untuk menghasilkan produk dengan memberikan gaya tekan dan laju pembebanan tertentu. Proses forging yang dilakukan adalah cold forging. Penelitian ini bertujuan untuk mengatahui pengaruh ketebalan billet dan besarnya beban. Penelitian dilakukan dengan material AISI 4340 melalui simulasi pada software ANSYS Explicit Dynamic hal ini karena pemodelan komputasi dari setiap tahap proses pembentukan dengan metode elemen hingga dapat membantu desain lebih cepat dan efisien. Untuk verifikasi material menggunakan persamaan Johnson – Cook Strength, parameter yang digunakan berdasarkan data roda kereta api di Negara Iran dengan tipe S1002. Kemudian untuk ketebalan dan besar pembebanan mengacu pada penelitian terdahulu.

Tahapan pada penelitian ini terdiri dari proses pemodelan roda kereta dimana outputannya dies atau cetakan menggunakan software pemodelan 3D Solidworks. Kemudian proses simulasi menggunakan software Ansys. Dimana tahapan simulasi meliputi mendefinisikan engineering data, impor geometri, mendesain billet, set up, meshing, uji konvergensi, dan analisis hasil. Dari proses penelitian ini akan didapatkan nilai dan arah residual stress akibat deformasi. Sehingga peneliti dapat mengetahui pengaruh variasi parameter yang dilakukan. Perbandingan ini dilakukan untuk menentukan manakah ukuran billet dan besar

pembebanan yang tepat dalam membentuk roda kereta berkecepatan kecil dengan residual stress sesuai dengan yang diizinkan.

Dari serangkaian metodologi yang telah dilakukan, pada penelitian tugas akhir ini didapatkan bahwa pengaruh ketebalan billet awal terhadap proses forging yaitu semakin tebal billet forging, maka geometri semakin sesuai dengan cetakan. Begitupula dengan besar gaya. Kemudian didapatkan konfigurasi variasi yang menghasilkan bentuk roda paling baik dibandingkan konfigurasi lainnya, yaitu forging dengan ketebalan awal billet 75mm dengan gaya forging 140MN dengan residual stress yang dihasilkan bersifat kompresi atau menguntungkan pada saat operational baik pada bagian roda yaitu hub, web dan rim baik pada arah radial, axial dan circumferential.

Kata Kunci: Cold Forging, Residual stress, Finit Element Method, Low Speed

SIMULATION ANALYSIS OF COLD FORGING PROCESS FOR LOW SPEED TRAIN WHEEL WITH FINITE ELEMENT METHODS

Student Name : Roze Windu Yuni Syarah
Student ID : 0211164000039
Departemen : Teknik Mesin FTIRS-ITS
Academic Advisor : Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA

Abstract

Manufacture of a railway wheel according to the Association Of American Railroads (AAR) is through forging or casting process. Forging is a steel forming process to produce a product by applying a specific pressure load and velocity load. The forging process that is used for this research is cold forging. This research aims to find out the effect of billet thickness and load magnitude. This research was done by using AISI 4340 as the material and using ANSYS explicit dynamic as the software for simulation because the modelling computation of each forming phase using finite element method could help to produce more faster and efficient design. To verify the material using johnson-cook strength, the parameter that is used is according to railway wheel data on I ranian railway type s1002. Then for the thickness and load magnitude are according to previous research.

The phase of this research consist of railway wheel modelling process with the output of dies using 3d modelling software that is solidworks. The simulation process software is using Ansys, where the simulation process encompass engineering data, import geometry, designing billet, set up, meshing, convergence test and analyzing result. From this research process, will be obtained the value and direction of residual stress produced from deformation. So that the researcher could know the effect of parameter variation that is applied. This comparison is done for determining which billet thickness and load magnitude

that is correct in forming the low speed railway wheel with allowable residual stress.

From the series of methodologi that has been done, on this research known that starting billet thickness effect toward forging process that is the more forging billet thickness applied, the more wheel geometry can be fit into the mold. Same with the load magnitude. Then we obtained the variation configuration that produce the best wheem shape compares to other configuration, which is forging with starting billet thickness of 75 mm with the load magnitude of 140 MN with the residual stress produced had compressive behaviour or benefitting the train when it in operational condition whether the wheel part of hub, web and rim or the direction of radial, axial and circumferential.

Key Word: Cold Forging, Residual stress, Finit Element Method, Low Speed

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah Subhanallahu Wa Ta'ala atas rahmat dan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul “Analisis Simulasi Proses *Cold Forging* Roda Kereta Berkecepatan Rendah dengan Metode Elemen Hingga” untuk memenuhi persyaratan kelulusan pendidikan Sarjana S-1 di Departmen Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penyusunan Tugas Akhir ini dapat terlaksana dengan sangat baik atas do'a dan bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu penulis ingin mengucapkan terimakasih kepada:

1. Kedua orang tua penulis yang senantiasa memberikan dukungan baik do'a, semangat, nasihat dan materi sehingga penulis dapat menyelesaikan perkuliahan dengan baik.
2. Bapak Dr. Ir Agus Sigit Pramono, DEA selaku dosen pembimbing Tugas Akhir ini, terimakasih atas kepercayaan, dukungan dan bimbingan dengan sangat sabar sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini.
3. Ir. Julendra Bambang Ariatedja, MT selaku dosen wali penulis, terimakasih sudah mengenalkan banyak ilmu, dukungan dan bimbinganya hingga saat ini.
4. Alif Hamdal Baihaki selaku teman penulis, terimakasih atas waktu, dukungan yang diberikan untuk menemani penulis hingga saat ini.
5. Saudaraku BNALZ yang membantu baik suka atau duka bagi penulis dengan sabar mengajari dan menjadi teman belajar otomotif atau organisasi bagi penulis. Khususnya saudara Kafi Hannan Al – Hadi dan Zulfan Farruqi yang selalau menjadi teman berdiskusi terkait Tugas Akhir ini.
6. Punggawa Lembaga Bengkel Mahasiswa Mesin (LBMM) yang selalu membanggakan dan sangat inovatif bagi penulis.

7. Saudaraku M59 yang selalu menemani di saat menempuh masa – masa perkuliahan dan menorehkan banyak cerita.

Dengan segala keterbatasan ilmu pengetahuan dan kemampuan penulis, tidak menutup kemungkinan bahwa Tugas Akhir ini jauh dari sempurna. Oleh karena itu, penulis bersedia menerima kritik dan saran dari berbagai pihak untuk penyempurnaan lebih lanjut. Penulis berharap agar tugas akhir ini bermanfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan dan bagi semua pihak.

Surabaya, 24 Agustus 2020

Penulis

DAFTAR ISI

Abstrak	i
<i>Abstract</i>	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL.....	xvi
BAB I	1
PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang Masalah	1
1.2. Rumusan Masalah.....	2
1.3. Batasan Masalah	3
1.4. Tujuan Masalah	3
1.5. Manfaat Penelitian	4
BAB II	5
TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1. Jenis Kereta Api.....	5
2.2. Roda Kereta Api	5
2.2.1. <i>Wheelset</i>	5
2.3. Teknik Pembuatan Roda Kereta Api.....	7
2.4. <i>Forging</i>	7
2.4.1. <i>Forging</i> Berdasarkan Suhu.....	9
2.4.2. <i>Forging</i> Berdasarkan Jenis Cetakan (<i>dies</i>).....	11
2.4.3. <i>Forging</i> Berdasarkan Kecepatan Pembentukan	13
2.5. <i>Hydraulic Press</i>	14
2.6. Cacat Produk	16
2.7. <i>Machining</i> Bagian Roda Kereta Hasil <i>Forging</i>	18
2.8. Perbandingan <i>Forging</i> dan <i>Casting</i>	19
2.9. <i>Friction</i>	21
2.10. Material.....	22
2.10.1. Spesifikasi dan Standar Relevan Baja AISI 4340 ...	23

2.10.2.	ASTM 4340 Komposisi Kimia Baja dan Kesetimbangan	23
2.10.3.	Penerapan Baja AISI 4340	23
2.11.	Konsep Tegangan dan Regangan.....	24
2.12.1.	Tegangan	24
2.12.2.	Regangan	25
2.12.3.	<i>Hubungan Tegangan dan Regangan</i>	25
2.12.4.	<i>Hubungan antara True Stress True Strain, Engineering Stress, dan Engineering Strain.</i>	26
2.13.	<i>Strain Rate</i>	28
2.14.1.	Respon Mekanik terhadap <i>Strain Rate</i> Tinggi	30
2.14.2.	<i>Deformasi Plastis</i> pada <i>Strain Rate</i> Tinggi	32
2.14.3.	<i>Empirical Constitutive Equations</i>	34
2.15.	Johnson – Cook	35
2.16.	<i>Residual Stress</i>	38
2.17.	<i>Heat Treatment</i>	40
2.18.	<i>Finite Element Analysis</i>	41
2.19.	<i>Linear dan Nonlinear Finite Element Analysis</i>	44
2.20.	Penelitian Terdahulu.	44
BAB III.....		58
METODOLOGI PENELITIAN		58
3.1.	Diagram Alir Penelitian	58
3.2.	Studi Literatur.....	58
3.3.	Perancangan	59
3.3.1.	Penentuan Data Awal.....	59
3.3.2.	Proses Desain	62
3.4.	Simulasi	65
3.4.1.	<i>Pre – forming</i>	67
3.4.2.	Proses <i>Final Forging</i>	77
3.4.3.	Ukur Dimensi.....	79

3.5.	Analisis Hasil	79
3.6.	Kesimpulan	80
BAB IV.....		82
HASIL DAN PEMBAHASAN		82
4.1.	Analisis <i>Billet</i> Hasil <i>Forging</i>	84
4.1.1.	Pengaruh Ketebalan Terhadap Hasil <i>Forging</i>	84
4.1.2.	Pengaruh Pembebanan Terhadap Hasil <i>Forging</i>	86
4.2.	Verifikasi Dimensi <i>Billet</i> Hasil <i>Forging</i>	89
4.3.	Pengaruh Ketebalan <i>Billet</i> terhadap <i>Residual Stress</i>	92
4.3.1.	Pada Arah <i>Radial</i>	92
4.3.2.	Pada Arah <i>Circumferential</i>	101
4.3.3.	Pada Arah <i>Axial</i>	110
4.4.	Pengaruh Gaya <i>Forging</i> terhadap <i>Residual Stress</i>	119
4.4.1.	Pada Arah <i>Radial</i>	119
4.4.2.	Pada Arah <i>Circumferential</i>	125
4.4.3.	Pada Arah <i>Axial</i>	132
4.5.	Superposisi <i>Normal Stress Prefoming</i> dan <i>Final Forging</i>	138
BAB V.....		142
KESIMPULAN DAN SARAN		142
5.1.	Kesimpulan	142
5.2.	Saran.....	143
DAFTAR PUSTAKA.....		141
<i>Lampiran 1</i>		144
<i>Lampiran 2</i>		145
<i>Lampiran 3</i>		147
<i>Lampiran 4</i>		149
<i>Lampiran 5</i>		151

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 <i>Bogie</i> dan roda kereta api	5
Gambar 2. 2 Roda Kasut.....	6
Gambar 2. 3 Roda Monoblok.	6
Gambar 2. 4 Grafik tegangan – regangan roda hasil pengecoran dan penempaan	7
Gambar 2. 5 Proses <i>forging</i>	8
Gambar 2. 6 <i>Die flat</i>	11
Gambar 2. 7 <i>Closed die forging</i> dengan <i>flash</i>	12
Gambar 2. 8 Komponen utama dari <i>hydraulic press</i> empat pos untuk <i>closed die forging</i>	15
Gambar 2. 9 Contoh cacat pada benda yang di <i>forging</i>	17
Gambar 2. 10 <i>Machining</i> pada bagian roda kereta	18
Gambar 2. 11 (a) <i>Rim</i> (b) <i>Web</i> (c) <i>Hub</i>	18
Gambar 2. 12 Interaksi permukaan <i>die</i> dan <i>billet</i>	21
Gambar 2. 13 Komposisi Kimia AISI 4340	23
Gambar 2. 14 (a) Ilustrasi gaya yang bekerja pada suatu struktur (b) Ilustrasi orientasi sumbu setiap tegangan	24
Gambar 2. 15 Tegangan dan Regangan	26
Gambar 2. 16 <i>True stress – strain</i> dan <i>engineering stress – strain</i>	27
Gambar 2. 17 Spesimen Tarik	28
Gambar 2. 18 Targer Kaku Proyektil	29
Gambar 2. 19 Perambatan gelombang kejut dalam tembaga	29
Gambar 2. 20 Klasifikasi skematik dari teknik pengujian menurut tingkat regangan	30
Gambar 2. 21 Efek <i>strain rate</i> pada respos tegangan – reganag <i>compression</i> (a). 7075 –T6 alumunium (b). Ti-6% Al-4%V alloy.	32
Gambar 2. 22 Tegangan luluh terhadap laju regangan geser untuk baja ringan.....	33
Gambar 2. 23 Pengaruh suhu dan tingkat regangan pada tegangan luluh besi.....	35

Gambar 2. 24 Tegangan sisa akibat penambahan unsur paduan (a). Difusi unsur paduan. (b). Kondisi tegangan sisa	39
Gambar 2. 25 <i>Shot peening</i>	39
Gambar 2. 26 Mesh di FEM.....	43
Gambar 2. 27 Proses panas pembentukan roda	45
Gambar 2. 28 Proses <i>pre-forming</i> roda kereta.....	45
Gambar 2. 29 Proses <i>pre-forming</i> roda kereta tampak <i>isometric</i>	45
Gambar 2. 30 Model awal <i>forging</i>	46
Gambar 2. 31 Perbandingan karakteristik <i>forging</i> dengan parameter yang berbeda.....	46
Gambar 2. 32 Fitur <i>forging</i> untuk studi faktor kecepatan.....	47
Gambar 2. 33 Membentuk beban dengan kecepatan pembentukan yang berbeda	47
Gambar 2. 34 <i>Finite element</i> proses <i>pre forming</i>	48
Gambar 2. 35 <i>Axial compressive stress</i> pada rasio radius yang berbeda pada proses <i>pre-forming</i>	49
Gambar 2. 36 <i>Press load</i> saat proses <i>pre-forming</i>	49
Gambar 2. 37 <i>Mesh</i> hasil <i>forging</i>	50
Gambar 2. 38 <i>Effective stress</i> pada 7 titik rasio radius saat proses <i>forging</i> dari tebal 125 mm.....	50
Gambar 2. 39 Peralatan pendinginan roda	51
Gambar 2. 40 <i>Radialresidual stress</i> pada <i>rim</i> setelah proses pendinginan tapak	52
Gambar 2. 41 Tegangan tekan dan tarik maksimum roda kereta di arah axial.....	53
Gambar 2. 42 Tegangan tekan dan tarik maksimum roda kereta dalam arah radial.....	53
Gambar 2. 43 Tegangan <i>radial</i> dan aksial roda kereta setelah pendinginan.....	54
Gambar 2. 44 kondisi saat proses <i>forging</i> (a) awal (b) akhir.	55
Gambar 2. 45 Perbandingan antara penggunaan metode (a) <i>least square positioning</i> , (b) <i>univariate interpolation positioning</i>	56
Gambar 2. 46 Penggunaan metode perbaikan <i>mesh</i> pada model 3D	56

Gambar 2. 47 Contoh penerapan <i>mesh</i> pada model 3D 360° dengan titik tengah sebagai kumpulan antarmuka.....	57
Gambar 3. 1 <i>Flowchart</i> penelitian	58
Gambar 3. 2 Geometri potongan menyilang roda kereta	60
Gambar 3. 3 Halaman kerja baru pada <i>Solidworks</i>	62
Gambar 3. 4 <i>Sketch</i> roda.....	63
Gambar 3. 5 <i>Sketch</i> roda kereta	63
Gambar 3. 6 (a) Pemodelan 3D roda kereta. (b) Pemodelan 3D penampang melintang roda kereta.	63
Gambar 3. 7 <i>Sketch final forging</i>	64
Gambar 3. 8 <i>Dies final forging</i>	64
Gambar 3. 9 <i>Sketch pre – forming</i>	65
Gambar 3. 10 <i>Dies pre - forming</i>	65
Gambar 3. 11 <i>Flowchart</i> simulasi.....	66
Gambar 3. 12 <i>Material properties</i> pada engineering data untuk <i>dies</i> dan <i>billet</i>	68
Gambar 3. 13 <i>Import</i> geometri pada <i>Ansys Design Modeller</i>	69
Gambar 3. 14 Desain <i>billet</i>	70
Gambar 3. 15 Desain <i>billet</i> full dan <i>symetry</i>	70
Gambar 3. 16 <i>Paths</i> pada <i>construction geometry</i>	71
Gambar 3. 17 <i>Path</i> pada <i>billet</i>	72
Gambar 3. 18 <i>Cylindrical coordinate system</i>	72
Gambar 3. 19 (a). <i>Symmetric region</i> bidang XY (b). <i>Symmetric region</i> bidang ZY	73
Gambar 3. 20 Penentuan jenis kontak	74
Gambar 3. 21 Nilai <i>coefficient</i> pada simulasi.....	74
Gambar 3. 22 Penentuan letak Pembebanan	75
Gambar 3. 23 Penentuan letak tumpuan	75
Gambar 3. 24 <i>Meshing</i> pada simulasi	76
Gambar 3. 25 <i>Meshing</i> pada probe	76
Gambar 3. 26 Hasil uji konvergensi.....	77
Gambar 3. 27 alur proses <i>export</i>	78
Gambar 3. 28 <i>Die final forging</i> dan <i>billet</i> hasil <i>pre – forming</i>	78
Gambar 3. 29 Penentuan <i>output</i> simulasi	78

Gambar 3. 30 Pengamatan <i>residual stress</i> pada arah radial, <i>circumferential</i> dan axial	80
Gambar 4. 1 Skema proses <i>pre-forming</i>	83
Gambar 4. 2 Skema proses <i>final forging</i>	83
Gambar 4. 3 Pengaruh ketebalan hasil <i>forging</i> (a) 71mm (b) 73mm (c) 75mm dengan beban 170MN.	85
Gambar 4. 4 Hasil <i>forging</i> variasi pembebanan (a) 130MN (b) 150MN (c) 170MN dengan ketebalan 75mm.	87
Gambar 4. 5 Pengukuran ketebalan hasil <i>forging</i> pada a) <i>Hub</i> b) <i>Web</i> c) <i>Rim</i>	89
Gambar 4. 6 <i>Radial residual stress</i> dengan tebal <i>billet</i> 74mm....	92
Gambar 4. 7 <i>Radial residual stress</i> dengan tebal <i>billet</i> 75mm....	93
Gambar 4. 8 Lokasi pengamatan <i>path</i> 1 hingga <i>path</i> 6 Arah Radial	95
Gambar 4. 9 grafik pengaruh ketebalan terhadap <i>radial residual stress</i> gaya 130MN	97
Gambar 4. 10 Grafik pengaruh ketebalan terhadap <i>radial residual stress</i> gaya 140MN	99
Gambar 4. 11 Grafik pengaruh ketebalan terhadap <i>radial residual stress</i> gaya 150MN	99
Gambar 4. 12 Grafik pengaruh ketebalan terhadap <i>radial residual stress</i> gaya 160 MN.....	100
Gambar 4. 13 grafik pengaruh ketebalan terhadap <i>radial residual stress</i> gaya 170MN	100
Gambar 4. 14 <i>Circumferential residual stress</i> dengan tebal 74mm	101
Gambar 4. 15 <i>Circumferential residual stress</i> dengan tebal 75mm	101
Gambar 4. 16 Lokasi pengamatan <i>path</i> 1 hingga <i>path</i> 6 arah <i>circumferential</i>	104
Gambar 4. 17 pengaruh ketebalan terhadap <i>circumferential residual stress</i> gaya 130MN.....	106
Gambar 4. 18 Pengaruh ketebalan terhadap <i>circumferential residual stress</i> beban 140MN.....	108

Gambar 4. 19 Pengaruh ketebalan terhadap <i>circumferential residual stress</i> beban 150MN.....	109
Gambar 4. 20 Pengaruh ketebalan terhadap <i>circumferential residual stress</i> beban 160MN.....	109
Gambar 4. 21 Pengaruh ketebalan terhadap <i>circumferential residual stress</i> beban 170MN.....	110
Gambar 4. 22 <i>Axial residual stress</i> dengan tebal 74mm	110
Gambar 4. 23 <i>Axial residual stress</i> dengan tebal 75mm	110
Gambar 4. 24 Lokasi pengamatan <i>path</i> 1 hingga <i>path</i> 6 arah <i>axial</i>	113
Gambar 4. 25 Pengaruh ketebalan terhadap <i>axial residual stress</i> gaya 130MN.....	115
Gambar 4. 26 Pengaruh ketebalan terhadap <i>axial residual stress</i> gaya 140MN.....	117
Gambar 4. 27 Pengaruh ketebalan terhadap <i>axial residual stress</i> gaya 150MN.....	117
Gambar 4. 28 Pengaruh ketebalan terhadap <i>axial residual stress</i> gaya 160MN.....	118
Gambar 4. 29 Pengaruh ketebalan terhadap <i>axial residual stress</i> gaya 170MN.....	118
Gambar 4. 30 <i>Radial residual stress</i> dengan gaya 140MN	119
Gambar 4. 31 <i>Radial residual stress</i> dengan gaya 170MN	119
Gambar 4. 32 Pengaruh gaya terhadap <i>radial residual stress</i> ketebalan 71mm.....	122
Gambar 4. 33 Pengaruh gaya terhadap <i>radial residual stress</i> ketebalan 72mm.....	123
Gambar 4. 34 Pengaruh gaya terhadap <i>radial residual stress</i> ketebalan 73mm.....	124
Gambar 4. 35 Pengaruh gaya terhadap <i>radial residual stress</i> ketebalan 74mm.....	124
Gambar 4. 36 Pengaruh gaya terhadap <i>radial residual stress</i> ketebalan 75mm.....	125
Gambar 4. 37 <i>Circumferential residual stress</i> dengan gaya 140MN	125

Gambar 4. 38 <i>Circumferential residual stress</i> dengan gaya 170MN	125
Gambar 4. 39 Pengaruh gaya terhadap <i>circumferential residual stress</i> ketebalan 71mm	128
Gambar 4. 40 Pengaruh gaya terhadap <i>circumferential residual stress</i> ketebalan 72mm	130
Gambar 4. 41 Pengaruh gaya terhadap <i>circumferential residual stress</i> ketebalan 73mm	130
Gambar 4. 42 Pengaruh gaya terhadap <i>circumferential residual stress</i> ketebalan 74mm	131
Gambar 4. 43 Pengaruh gaya terhadap <i>circumferential residual stress</i> ketebalan 74mm	131
Gambar 4. 44 <i>Axial residual stress</i> dengan gaya 140MN	132
Gambar 4. 45 <i>Axial residual stress</i> dengan gaya 170MN	132
Gambar 4. 46 Pengaruh gaya terhadap <i>axial residual stress</i> ketebalan 71mm.....	135
Gambar 4. 47 Pengaruh gaya terhadap <i>axial residual stress</i> ketebalan 72mm.....	136
Gambar 4. 48 Pengaruh gaya terhadap <i>axial residual stress</i> ketebalan 73mm.....	137
Gambar 4. 49 Pengaruh gaya terhadap <i>axial residual stress</i> ketebalan 74mm.....	137
Gambar 4. 50 Pengaruh gaya terhadap <i>axial residual stress</i> ketebalan 75mm.....	138
Gambar 4. 51 <i>Node</i> tahap <i>pre-forming</i>	139
Gambar 4. 52 <i>Node</i> tahap <i>final forging</i>	140

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Keunggulan dari Proses <i>Forging</i> dan Produk yang Dihasilkan.	20
Tabel 2. 2 Koefisien Gesekan untuk Operasi Pembentukan. (Cora, Ömer Necati, 2004).....	22
Tabel 2. 3 Perbedaan Persamaan	27
Tabel 2. 4 Konstanta Konsitutif untuk Variasi Material ($\epsilon_0 = 1s - 1$).	36
Tabel 2. 5 Fase <i>Heat treatment</i>	52
Tabel 3. 1 Material Properties AISI 4340 <i>Alloy Steel</i>	60
Tabel 3. 2 Paramater Johnson Cook AISI 4340 (Mayer, 1994). .	61
Tabel 3. 3 Parameter <i>Forging</i>	62
Tabel 3. 4 Nilai <i>Path</i> pada Setiap Variasi Ketebalan	71
Tabel 3. 5 Hasil Uji Konvergensi	77
Tabel 4. 1 Ketebalan Cetakan Roda dan Hasil <i>Forging</i>	90
Tabel 4. 2 Nilai <i>Radial Residual Stress</i> pada Variasi Ketebalan .	96
Tabel 4. 3 Nilai <i>Circumferential Residual Stress</i> pada Variasi Ketebalan	105
Tabel 4. 4 Nilai <i>Radial Residual Stress</i> pada Variasi Ketebalan	114
Tabel 4. 5 Nilai <i>Radial Residual Stress</i> pada Variasi Pembebanan	120
Tabel 4. 6 Nilai <i>Circumferential Residual Stress</i> pada Variasi Pembebanan	127
Tabel 4. 7 Nilai <i>Axial Residual Stress</i> pada Variasi Pembebanan	134

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang Masalah

Kereta api merupakan salah satu transportasi yang memiliki karakteristik dan keunggulan khusus, terutama dalam kemampuannya untuk mengangkut baik penumpang maupun barang secara massal. Selain itu kereta api juga dapat menghemat energi dan penggunaan ruang, mempunyai faktor keamanan yang tinggi dan tingkat pencemaran yang kecil serta lebih efisien dibandingkan dengan transportasi darat lainnya (UU RI No. 23, 2007).

Untuk mendukung operasional kereta api tersebut diperlukan dukungan dalam penyediaan komponen yang berkesinambungan. Komponen tersebut sebagian sudah bisa dipenuhi secara lokal dan sebagian lagi harus diimpor. Salah satu komponen yang sampai saat ini sepenuhnya masih di impor adalah roda kereta. Roda kereta diimpor dari Rumania, Chekoslovakia dan China. Kebutuhan roda kereta api pertahunnya sekitar 30.000 (Sri Bimo P, 2016).

Hal ini di dukung oleh pernyataan Direktur Utama PT Barata Indonesia (Persero) yang dilansir pada media TrenAsia tanggal 21 februari 2020 lalu. Selain itu, karena moda transportasi kereta api merupakan transportasi yang memiliki banyak keunggulan, maka rencana pengembangan perkeretaapian nasional telah menargetkan peningkatkan panjang jalan kereta api pada tahun 2030 menjadi 12.276 km, atau meningkat sebesar 260%. Hal tersebut tentunya akan berimplikasi kepada peningkatan jumlah kebutuhan roda kereta api (Sri Bimo P, 2016). Oleh karena itu dalam rangka mengurangi ketergantungan impor, akan dilakukan penelitian tentang pembuatan roda kereta api.

Berdasarkan standar *Association of American Railroadds* (AAR) tahun 2009 bahwa pembuatan roda kereta api dapat menggunakan dua metode yaitu dengan metode *casting* dan metode *forging* (Sri Bimo Pratomo, 2016). Namun yang umum

digunakan adalah dengan metode *forging*. *Forging* atau penempaan adalah proses deformasi plastis pada *billet* dimana *billet* ditekan di antara *dies* (cetakan). Penekanan dapat dilakukan dengan tekanan kejut atau tekanan berangsur-angsur (perlahan). Proses penekanan tersebut akan menghasilkan bentuk *billet* yang sesuai dengan profil *dies*. Metode *forging* menghasilkan produk yang memiliki kekuatan lebih baik dibandingkan dengan metode *casting*. Di mana dalam penelitian ini akan membentuk profil roda kereta berkecepatan rendah yaitu (0 – 80 km/jam).

Penelitian ini menghasilkan simulasi proses *forging* roda kereta yang diharapkan memberikan informasi tentang gaya atau pembebanan mesin *forging* dengan ketebalan *billet* awal yang digunakan sehingga dapat membentuk roda kereta berkecepatan rendah. Dari informasi yang dapat diharapkan menjadi salah satu refrensi bagi industri untuk membeli atau membuat alat *forging* yang mampu memproduksi roda kereta. Selain itu dengan adanya variasi berupa ketebalan roda kereta dan langkah proses *forging* diharapkan menjadi pilihan untuk industri dalam memilih metode yang tepat. Dengan adanya industri yang mampu memproduksi roda kereta sendiri akan mewujudkan keinginan Indonesia dalam peningkatan transportasi perkertaapian nasional.

1.2. Rumusan Masalah

Dari uraian masalah yang terjadi yaitu tentang proses pembuatan roda kereta api berkecepatan rendah, maka dapat disusun rumusan masalah yaitu :

Bagaimana analisis pengaruh ketebalan *billet* dan besarnya beban penekan *upper die* terhadap proses *forging* berdasarkan bentuk *billet* hasil proses simulasi dan analisa *residual stress*.

1.3. Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Penelitian ini meliputi analisis deformasi dan analisis *residual stress* yang ada pada *billet* roda kereta berkecepatan rendah hasil *forging*.
2. Material pada *billet* yang dimodelkan adalah AISI 4340 dan *dies Structural steel*.
3. Material bersifat homogen dan isotrop.
4. Dimensi geometri roda kereta yang akan dibentuk disesuaikan dengan profil dimensi roda kereta tipe S1002 yang dipakai dalam sistem roda kereta Iran.
5. Proses yang dilakukan adalah proses *Cold Forging*.
6. Proses tahapan menggunakan *pre-forming* dan *final forging*.
7. Analisis tidak memasukkan pengaruh yang ada akibat faktor pelumasan dan suhu.
8. Analisis menggunakan koefisien gesekan statis sebesar 0,05 dan dinamis 0,01.
9. *Dies* dianggap sebagai *rigid body*.
10. Geometri *billet* dianggap *flexible*.
11. Jari-jari *billet* yang digunakan 440mm.
12. Variasi ketebalan *billet* 71mm, 72mm, 73mm, 74mm, dan 75mm.
13. Variasi pembebanan *forging* 130 MN, 140 MN, 150 MN, 160MN, 170MN.

1.4. Tujuan Masalah

Tujuan dari penelitian ini adalah mengetahui pengaruh ketebalan *billet* dan besarnya beban penekan *upper die* terhadap proses *forging* berdasarkan bentuk *billet* hasil proses *forging* dan analisis *residual stress* pada roda kereta berkecepatan kecil.

1.5. Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menambah referensi tentang pengaruh ketebalan *billet* dan besarnya beban penekan *upper die* terhadap proses *forging*.
2. Sebagai media penelitian dan pengembangan ilmu pengetahuan khususnya bidang *forging* roda kereta.
3. Keberhasilan kegiatan ini juga ikut menjadi bagian dari salah satu solusi pemecahan masalah transportasi yang ada di Indonesia.
4. Meningkatkan kemampuan mahasiswa dalam penggunaan *software* berkaitan dengan bidang desain.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

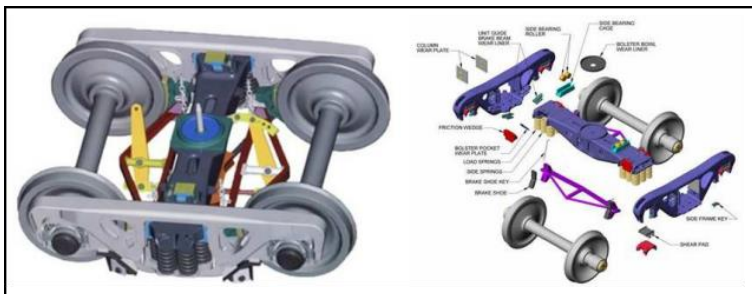
2.1. Jenis Kereta Api

Kereta api dibedakan berdasarkan kecepatan, tenaga penggerak, jenis rel dan posisi terhadap tanah. Berdasarkan kecepatannya kereta api dibedakan menjadi kereta api kecepatan tinggi, sedang dan rendah. Berdasarkan tenaga penggerak, kereta api dibedakan menjadi kereta api uap, kereta api *diesel* dan kereta api listrik. Berdasarkan jenis rel, kereta api dibedakan menjadi kereta api konvensional dan kereta api monorel. Sedangkan berdasarkan posisi terhadap tanah, kereta api dibedakan menjadi kereta api permukaan dan kereta api bawah tanah (Esveld, 2001).

2.2. Roda Kereta Api

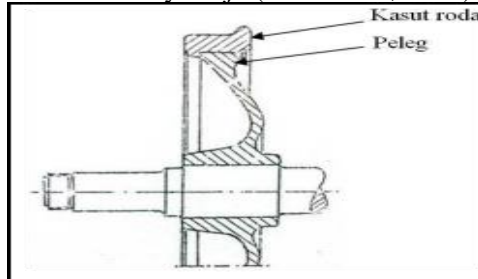
2.2.1. Wheelset

Perangkat roda kereta api terpasang pada *bogie* dimana biasanya pada suatu *bogie* memiliki dua pasang roda (dua gandar) sehingga pada masing – masing *bogie* terdiri dari empat buah roda. Sementara itu, sebuah gerbong biasanya terdiri dari *bogie* sehingga jumlah total roda pada sebuah gerbong adalah delapan gerbong.



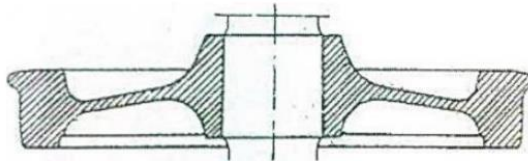
Gambar 2. 1 *Bogie* dan roda kereta api
(Sumber: Esveld, 2001)

Roda kereta api ada dua macam yaitu roda kereta api kasut (bandasi / bandase) dan roda kereta api monoblok (*solid*). Roda kasut seperti Gambar 2.4 terdiri dari dua bagian yaitu *peleg* dan ban baja yang dinamakan kasut roda. Pemasangan kasut roda dengan *peleg* dilakukan dengan proses penekanan pada suhu tertentu. Jika terjadi keausan pada roda jenis ini. Maka yang diganti adalah kasut rodanya saja (Darmawan, 2001).



Gambar 2. 2 Roda Kasut
(Sumber: Darmawan, 2001).

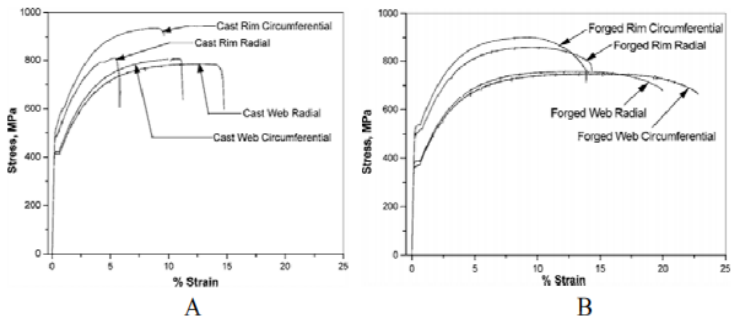
Seiring perkembangnya teknologi kereta api. Kecepatan kereta api yang semakin tinggi tersebut mengakibatkan risiko terlepasnya kasut roda dari *peleg* juga semakin tinggi. Oleh karena itu pada saat ini roda kereta api yang banyak digunakan adalah roda kereta api jenis monoblok. Roda kereta jenis ini tidak mempunyai bagian – bagian yang terpisah seperti pada jenis kasut, tetapi merupakan produk *solid* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3 berikut.



Gambar 2. 3 Roda Monoblok.
(Sumber: Darmawan, 2001)

2.3. Teknik Pembuatan Roda Kereta Api

Roda kereta api dapat di produksi dengan teknik pengecoran (*casting*) dan teknik penempaan (*forging*) (JIS E 5402: 1998, ASTM A 583:1999). Kedua teknik pembuatan roda kereta api ini sudah banyak diterapkan di industri roda kereta api di seluruh dunia. Berbagai macam penelitian juga sudah dilakukan untuk mengetahui karakteristik dari roda kereta api yang dibuat dengan proses tersebut. Salah satu sifat mekanik yang dibandingkan adalah kekuatan tarik roda hasil proses *casting* dan *forging* seperti terlihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2. 4 Grafik tegangan – regangan roda hasil pengecoran dan penempaan

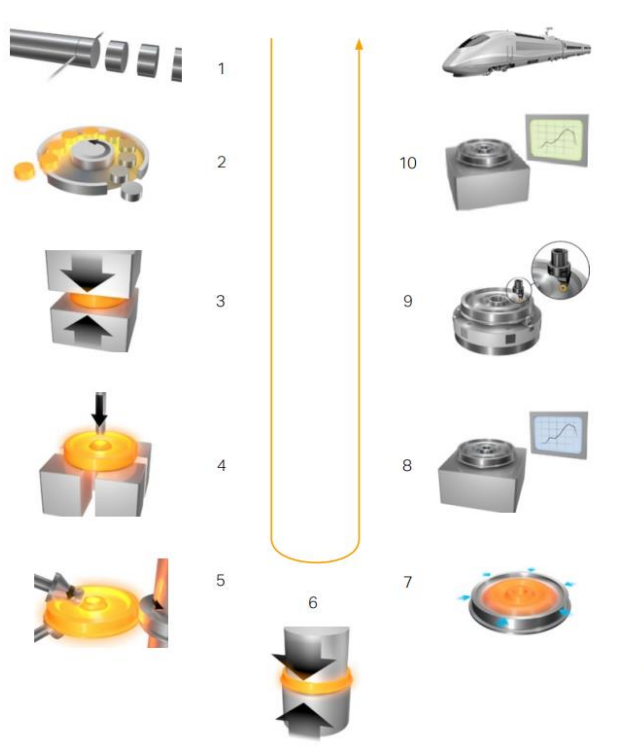
(Sumber: Tarafder, Sivaprasad & Ranganath, 2007).

Pada Gambar diatas didapatkan bahwa grafik tegangan – regangan roda hasil penempaan (B) memiliki keuletan dan ketangguhan yang lebih baik dibandingkan dengan roda hasil pengecoran dibuktikan dengan grafik yang hasil penempaan lebih landai dibandingkan dengan grafik hasil pengecoran.

2.4. *Forging*

Forging merupakan proses pembentukan logam untuk menghasilkan produk dengan memberikan gaya tekan dengan laju pembebanan tertentu. Pada pembentukan ini, *billet* dipukul atau

ditekan dengan perkakas melalui beberapa tahapan. Beberapa contoh produk yang dihasilkan dengan menggunakan teknologi *forging* antara lain *connecting road*, roda gigi, peralatan tangan dan komponen – komponen otomotif lainnya. Kemampuan *forging* atau kemampuan bentuk suatu bahan untuk merubah bentuk tanpa rusak atau kegagalan bergantung pada kondisi selama pemrosesan deformasi (seperti suhu, laju deformasi, tegangan, dan regangan) dan *variable material* (seperti komposisi kimia, rongga, dan struktur mikro awal) (Taylan Altan, 2005).



Gambar 2. 5 Proses *forging*
(Sumber: Sandvik Coromant)

Keterangan:

1. Pemotongan *billet* awal
2. Pemanasan *Billet* di *rotary kiln*
3. *Compression forging*
4. *Hole punching process*
5. *Roll forming*
6. *Bending process*
7. Proses hardening dengan pendingin air
8. Uji mekanik (*mechanical testing*)
9. Uji coba roda (*turning of wheel*)
10. *Non-destructive test (ultrasonic testing)* untuk mendeteksi adanya retakan.

Forging diklasifikasikan berdasarkan suhu penempaan, kecepatan pembentukannya (mesin), dan jenis cetakan, berikut penjelasannya.

2.4.1. *Forging* Berdasarkan Suhu

a. *Cold Forging*

Salah satu tantangan terbesar dalam industri pembentukan logam adalah mendapatkan produk dalam bentuk akhir dan properti dengan permesinan minimum. Proses *cold forging* adalah opsi yang layak untuk tujuan ini karena bagian yang diproduksi membutuhkan sedikit permesinan, waktu produksi yang kecil, dan produk yang mempunyai kekuatan mekanik yang lebih baik daripada proses lain (Roque & Button, 2000).

Cold forging dilakukan pada suhu kamar. Umumnya *closed die forging* masuk dalam kategori *cold forging* dan biasanya bahan yang di *forging* adalah baja karbon dan paduan standar. Kisaran suhu untuk *cold forging* antara suhu kamar hingga dibawah suhu kristalisasi ulang logam yang ditempa, atau sekitar 800 hingga 1.800 derajat Fahrenheit (Hindawi *research article*. Shao – Yi, 2014).

b. Warm Forging

Warm forging biasanya dilakukan antara suhu *recovery* dari bahan dan suhu rekristalisasi ($0,2 T_m - 0,4 T_m$). Jenis *forging* ini lebih dilakukan dimana nilai kekuatan dan sifat-sifat lainnya perlu dipertahankan tetapi tidak jauh lebih tinggi dari nilai awal. *Warm forging* memiliki beberapa keuntungan seperti lebih menghemat biaya dibandingkan metode penempaan dingin atau panas. Dibandingkan dengan *cold forging*, *warm forging* memiliki beberapa kelebihan seperti mengurangi beban pahat, mengurangi beban tekan, meningkatkan keuletan dan mempersingkat kegiatan *annealing* sebelum penempaan. Di sisi lain, suhu yang digunakan untuk *warm forging* lebih kecil daripada *hot forging*, sehingga menghemat biaya energi serta menghilangkan kebutuhan akan alat khusus yang ada diperlukan dalam *hot forging*. Jenis pengerjaan logam terbatas untuk rentang suhu 0,2-0,4 kali titik leleh (T_m) masing-masing sistem material atau paduan. *Warm forging* menghasilkan permukaan akhir yang dapat ditoleransi dengan kebutuhan energi yang sedikit lebih kecil. Selain itu, proses ini juga biasanya tidak memerlukan perlakuan *annealing* pada tahap menengah penempaan (M. Chandrasekaran, 2010).

Untuk baja, suhu *warm forging* berkisar antara 450 hingga $950\text{ }^\circ\text{C}$ (840 hingga $1740\text{ }^\circ\text{F}$) Suhu paling sering antara 600 dan $815\text{ }^\circ\text{C}$ (1100 dan $1500\text{ }^\circ\text{F}$). Pengalaman dengan penempaan hangat berkecepatan tinggi sangat terbatas. Contoh dari bagian besar yang dibentuk dengan hangat adalah poros transmisi, dibentuk pada $700\text{ }^\circ\text{C}$ ($1290\text{ }^\circ\text{F}$) dengan satu pukulan dari *pre-form* yang di *forging* pada suhu *forging* konvensional pada suatu *upsetter* horizontal (M. Chandrasekaran, 2010).

c. Hot Forging

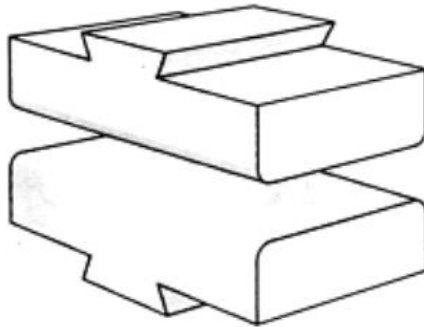
Hot forging adalah proses penempaan yang paling banyak digunakan dalam proses manufaktur. Dalam proses *hot forging*, penempaan dilakukan pada suhu di atas suhu rekristalisasi logam yang berarti pada suhu di mana butiran baru terbentuk dalam

logam. Suhu ekstrem ini diperlukan untuk menghindari *strain hardening* pada logam selama deformasi

2.4.2. Forging Berdasarkan Jenis Cetakan (*dies*)

a. *Open Die Forging*

Open die forging penempaan yang dilakukan dengan meletakkan benda kerja di antara *die* yang berbentuk datar, atau *flat die* atau yang berbentuk sederhana. *Open die forging* biasanya dilakukan untuk memberikan bentuk awal benda kerja yang dilanjutkan dengan penempaan menggunakan *closed die forging* (K. Lange, 1985).



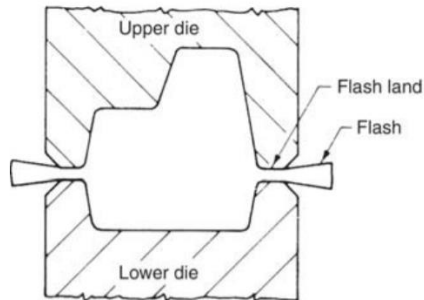
Gambar 2. 6 *Die flat*
(Sumber: ASM Handbook Vol 14)

b. *Closed Die Forging*

Closed die forging adalah operasi penempaan yang menggunakan sepasang *die block* yang secara presisi membentuk benda kerja yang diinginkan. *Die block* dibuat melalui pemesinan atau *casting*. Penempaan dengan menggunakan *die block* ini akan menghasilkan produk yang memiliki toleransi ukuran yang lebih presisi. *Die block* terdiri dari dua bagian, yaitu *upper die* dan *lower die* (K. Lange, 1985). Kemudian *Closed die forging* dibagi menjadi 2 yaitu, dengan *flash* dan tanpa *flash*

- **Closed Die Forging dengan Flash**

Dalam proses ini, *billet* (panas) yang terbentuk dalam *die* (biasanya dengan dua bagian) sehingga aliran logam dari rongga *die* dibatasi. Bahan berlebih *die* kstrusi melalui celah sempit yang terbatas dan muncul sebagai *flash* di sekitar penempaan di garis berpisah



Gambar 2. 7 *Closed die forging dengan flash*
(Sumber: Taylan Altan, 2005).

Peralatan: *Hammer* landasan dan *counterblow*, hidrolik, mekanik, dan sekrup. **Material:** Baja karbon dan paduan, aluminium paduan, paduan tembaga, paduan magnesium, berilium, baja tahan karat, paduan nikel, paduan titanium dan titanium, paduan besi dan nikel dan kobalt *superalloy*, paduan niobium dan niobium, paduan tantalum dan tantalum, paduan molibdenum dan molibdenum, paduan tungsten. **Variasi proses:** *closed die forging* dengan blitz lateral, *closed die forging* dengan blitz longitudinal, *closed die forging* tanpa blitz. **Aplikasi:** Produksi *forging* untuk mobil, truk, traktor, peralatan di luar jalan raya, pesawat terbang, peralatan kereta api dan pertambangan, industri mekanik umum, dan produksi rekayasa yang berhubungan dengan energi (Taylan Altan, 2005).

Flash yang terbentuk akan bergesekan dengan permukaan *die*. Gesekan pada *flash* bisa membatasi perubahan bentuk benda kerja. Pada kasus penempaan panas, *flash* di celah akan cepat

dingin. *Flash* yang dingin juga membatasi benda kerja untuk berubah bentuk. Oleh karena itu proses *closed die forging* dengan *flash* seringkali diikuti proses permesinan (*machining*) (Younggi. D, 2015).

Untuk mencegah terjadinya *flash* yang berlebihan, atau *flash* terlalu lebar, pada *die block* disediakan rongga penampung yang disebut *flash gutter*. Setelah tahapan *forging* terakhir, *flash* dipotong menggunakan *trimming die*. Selain itu *flash* berfungsi sebagai penutup atau katup pengaman. Kelebihan logam pada rongga *closed die* dan berfungsi sebagai penghambur aliran logam sehingga terjadi tekanan yang tinggi untuk memastikan logam akan mengisi rongga *die* yang masih kosong (K. Lange, 1985).

- ***Closed Die Forging tanpa Flash***

Dalam proses ini, *billet* dengan volume yang dikontrol secara hati-hati dideformasi (panas atau dingin) oleh *punch* untuk mengisi rongga *die* tanpa kehilangan material atau tanpa terjadinya kekosongan. *Punch* dan *die* dapat dibuat dari satu atau beberapa bagian. **Peralatan:** Penekan hidrolik (*hydraulic press*), penekan mekanis multiram. **Material:** Baja karbon dan paduan, paduan aluminium, paduan tembaga. **Variasi proses:** Penempaan inti, presisi penempaan, penempaan dingin dan hangat, penempaan P / M. **Aplikasi:** *Forging* presisi, *forging* berlubang, *fiting*, siku, tee, dll.

2.4.3. *Forging* Berdasarkan Kecepatan Pembentukan

Pengembangan terus menerus dari teknologi *forging* membutuhkan pemahaman yang kuat dan mendasar dari kapabilitas dan karakteristik peralatan. Peralatan, seperti *press* dan *hammer* yang digunakan dalam penempaan, memengaruhi proses penempaan, karena hal itu memengaruhi laju deformasi dan kondisi suhu, serta menentukan laju produksi. Persyaratan proses penempaan yang diberikan harus sesuai dengan karakteristik beban, energi, waktu, dan akurasi mesin penempaan yang diberikan.

a. Forging Press.

Prinsip *press forging* dilakukan penekanan secara perlahan – lahan pada benda kerja sampai menghasilkan aliran logam yang *uniform*. *Press forging* biasanya dikerjakan tanpa *die* dan *hammer* maupun *anvil* berbentuk datar. Pada dasarnya ada tiga jenis penekan: penekan hidrolik, mekanis, dan sekrup. Mesin ini digunakan untuk penempaan panas dan dingin, pemangkasan ekstrusi dingin, dan *coining* (Taylan Altan, 2005). Namun yang akan dibahas dalam penelitian ini adalah *hydraulic press*.

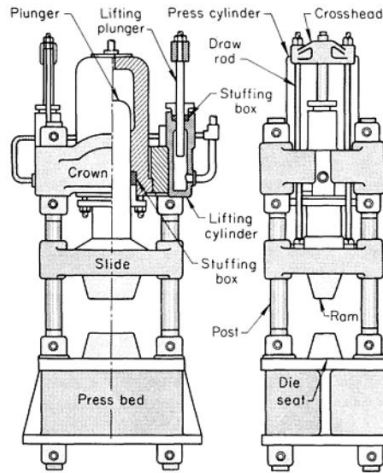
b. Forging Hammer

Hammer adalah jenis peralatan yang paling murah dan paling serbaguna untuk menghasilkan beban dan energi untuk melakukan proses pembentukan. Teknologi ini dicirikan oleh beberapa benturan benturan antara *die* yang berkontur. *Hammer* terutama digunakan untuk penempaan panas, untuk *coining*, dan sampai batas tertentu, untuk pembentukan lembaran logam bagian yang diproduksi dalam jumlah kecil misalnya, dalam industri pesawat terbang / badan pesawat. *Hammer forging* memiliki reputasi sebagai cara terbaik untuk meningkatkan sifat metalurgi dari banyak material, termasuk material berkinerja tinggi seperti *Waspaloy*, *superalloy* berbasis-nikel yang digunakan untuk banyak aplikasi *disk* turbin (Taylan Altan, 2005).

2.5. Hydraulic Press

Hydraulic press digunakan untuk penempaan *closed die* dan *open die*. Ram dari *Hydraulic press* digerakkan oleh *silinder* dan piston hidrolik, yang merupakan bagian dari sistem hidrolik atau hidropneumatik tekanan tinggi. Setelah kecepatan pendekatan yang cepat, ram (dengan *die* atas terpasang) bergerak dengan kecepatan lambat sambil mengerahkan kekuatan meremas pada logam kerja. Kecepatan penekan dapat dikontrol secara akurat untuk memungkinkan kontrol kecepatan aliran logam; ini sangat menguntungkan dalam menghasilkan *forging* toleransi dekat.

Komponen utama dari *hydraulic press* ditunjukkan pada Gambar 2.8.



Gambar 2. 8 Komponen utama dari *hydraulic press* empat pos untuk *closed die forging*.

(Sumber: *ASM Handbook* Vol 14, 1988)

Keuntungan utama dari *Hydraulic press* meliputi:

- Tekanan dapat diubah sesuai keinginan pada titik mana pun pada stroke dengan menyesuaikan katup kontrol tekanan.
- Laju deformasi dapat dikontrol atau bervariasi selama *stroke* jika diperlukan. Ini sangat penting ketika menempa logam yang rentan terhadap pecah pada tingkat deformasi yang tinggi
- *Die split* dapat digunakan untuk membuat bagian dengan fitur seperti *flens offset*, proyeksi, dan *backdraft*, yang akan sulit atau tidak mungkin untuk dimasukkan ke *hammer forging*.
- Kekuatan tekan maksimum dapat dibatasi untuk melindungi perkakas.

Kelemahan *Hydraulic press* adalah:

- Biaya awal dari *hydraulic press* lebih tinggi daripada pers mekanik yang setara
- Tindakan *hydraulic press* lebih lambat daripada penekanan mekanis

Tindakan yang lebih lambat dari *hydraulic press* meningkatkan waktu kontak antara *die* dan benda kerja. Saat menempa bahan pada suhu tinggi (seperti paduan nikel-dasar dan paduan titanium), ini menghasilkan usia pakai yang lebih pendek karena perpindahan panas dari logam kerja ke *die*.

Hydraulic press dinilai dari jumlah maksimum gaya *forging* yang tersedia. *Open-die presse* dibangun dengan kapasitas mulai dari 1,8 hingga 125MN (200 hingga 14.000 ton), dan *closed-die presses* berkisar dari 4,5 hingga 640MN (500 hingga 72.000 ton). Kecepatan ram selama kondisi penempaan normal bervariasi dari 635 hingga 7620mm / mnt (25 hingga 300 in./min). Kecepatan pers telah diperlambat hingga sepersekian inci per menit untuk memalsukan material yang sangat sensitif terhadap laju deformasi.

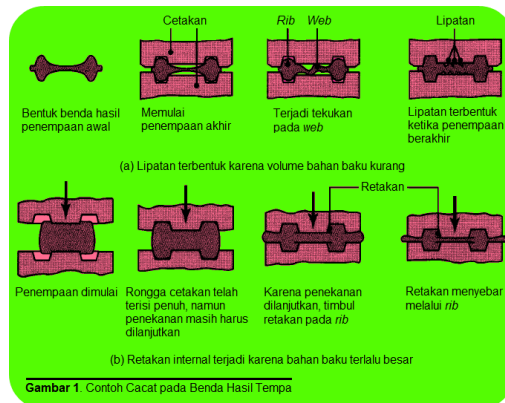
2.6. Cacat Produk

Secara garis besar kegagalan dibagi menjadi 2 yaitu kegagalan produk dan kegagalan cetakan yang mempunyai keterkaitan baik langsung maupun tidak langsung. Contoh kegagalan tidak langsung adalah produk gagal karena volume raw materialnya kurang, demikian juga gagal karena kesalahan penyetelan (*bad setting*) yang memungkinkan terjadinya benturan. Cacat produk (*defect*) ada 6 jenis yaitu Cacat lipatan (*folds*), Cacat geser (*shear defect*), Retak (*craks*), Cacat permukaan (*surface defect*), Cacat bentuk (*form defect*), Cacat struktur (*structural defect*). Kemungkinan-kemungkinan penyebab dari cacat tersebut khusus terkait cetakan (*die/tool*), cacat pada produk dapat disebabkan karena geometri, kondisi, permukaan dan material dari cetakan. Sedangkan kegagalan cetakan bisa dikarenakan karena proses pembuatan yang kurang baik seperti tingkat ketelitian

geometri serta proses lanjut yang kurang/salah seperti tidak adanya proses pengerasan atau proses meningkatkan ketangguhan cetakan (Mujirto, 2006).

Pada salah satu jurnal yang ditulis oleh Iskandar dan Norman pada tahun 2012 tentang analisa cacat dimensi pada proses *cold forging* menjelaskan bahwa penyebab kurang sempurnanya produk hasil *forging* adalah

- a. Memerlukan parameter diameter awal minimal yang harus dipenuhi untuk mencapai produk akhir yang diinginkan
- b. Volume cetakan atau *dies* serta profil penampang yang akan berpengaruh terhadap laju deformasi material
- c. Faktor energy pembentukan untuk mendeformasi material secara optimal, atau bahkan cenderung berlebih sehingga berakibat memperpendek umur cetakan atau *dies* karena energy berlebih tersebut di transfer ke cetakan sehingga cetakan akan mengalami kegagalan atau cacat (Iskandar & Norman, 2012).



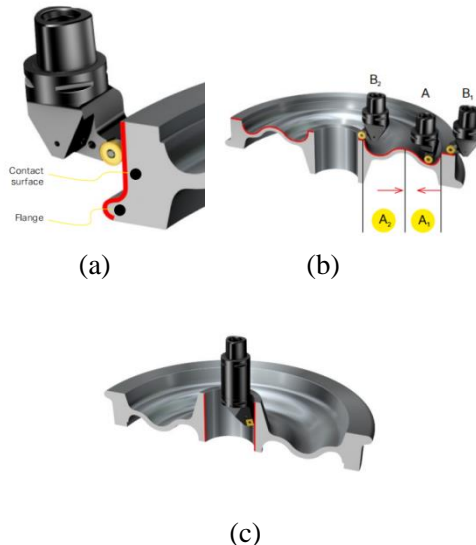
Gambar 2. 9 Contoh cacat pada benda yang di *forging*
(Sumber: Dionisius Younggi, 2019)

2.7. *Machining* Bagian Roda Kereta Hasil *Forging*

Setelah *billet* proses *forging* kemudian roda kereta di *machining* dengan tujuan mendapatkan dimensi yang sesuai dengan toleransi dan geometri yang di inginkan. *Machining* dilakukan pada beberapa bagian roda kereta yaitu *hub*, *web*, dan *rim*.



Gambar 2. 10 *Machining* pada bagian roda kereta
(Sumber: Sandvik Coromant)



Gambar 2. 11 (a) *Rim* (b) *Web* (c) *Hub*
(Sumber: Sandvik Coromant)

2.8. Perbandingan *Forging* dan *Casting*

Forging dan *casting* adalah dua metode manufaktur yang sangat berbeda. *Casting* dengan cara memanaskan material di atas suhu lelehnya dan dituangkan ke dalam cetakan. Sedangkan *forging* dengan cara menempa material menjadi suatu bentuk namun tetap dalam keadaan padat meskipun kebanyakan dipanaskan (Raines, 2013).

Ketika logam dilelehkan, ukuran butir bebas untuk membesar. Setelah dilelehkan, logam cair dituang pada *die* yang berbentuk seperti barang yang akan diproduksi. Selama proses pengecoran, tidak ada aliran butir dan peningkatan arah kekuatan yang terjadi. Ketika kembali ke padatan, struktur butiran menjadi kasar dan lebih acak sehingga mengurangi kekuatannya. *Casting* adalah metode yang paling efisien dalam pembuatan produk baja, namun produk akhirnya tidak begitu kuat dan tahan lama (*Steel forging*, 2017).

Penempaan baja adalah metode yang paling umum digunakan untuk komponen-komponen penting. *Billet* baja dipanaskan dan ditempatkan diantara *dies*. *Billet* yang telah dipanaskan diberikan tekanan ekstrim dan dibentuk sesuai profil *die* secara paksa. Aliran butiran bersifat terarah dan telah diorientasikan untuk meningkatkan kekuatan atau ketangguhan (yaitu meningkatkan keuletan baja dan ketahanan terhadap benturan). Juga karena tidak ada ujung butir yang terekspos, produk *forging* lebih tahan terhadap kelelahan dan tegangan. *Forging* biasanya memiliki porositas permukaan yang lebih sedikit, struktur butiran yang lebih halus, kekuatan tarik yang lebih tinggi, umur atau kekuatan lelah yang lebih baik, dan keuletan yang lebih tinggi daripada *casting* (William & Fatemi, 2007).

Berdasarkan anggota industri & *manufacturing Engineering Departement di University Toledo*

- a. Benda yang *forging* memiliki kekuatan tarik 26% lebih tinggi dari pada *casting* Maka akan didapatkan produk yang lebih kuat.

- b. Benda yang *forging* memiliki kekuatan keletihan 37% lebih tinggi yang menghasilkan faktor umur keletihan yang lebih lama. Maka didapatkan produk yang lebih tahan lama.
- c. Besi tuang hanya memiliki 66% kekuatan luluh baja tempa. Kekuatan luluh merupakan indikator suatu material mampu menahan tegangan sebelum terdeformasi plastis atau berubah bentuk.
- d. Benda yang *diforging* memiliki pengurangan 58% di daerah ketika di uji kegagalan. Sedangkan benda *casting* hanya memiliki pengurangan 6%. Itu berarti akan ada deformasi yang jauh lebih besar sebelum kegagalan di benda *forging* (William & Fatemi, 2007).

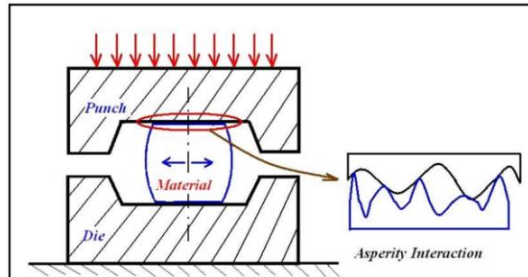
Selain itu keunggulan dari proses *forging* dapat dilihat dari tabel 2.1 sebagai berikut:

Tabel 2. 1 Keunggulan dari Proses *Forging* dan Produk yang Dihasilkan (Byrer.TG, 1985).

Sifat	Keunggulan
Kekuatan terarah	Struktur hasil penempaan menghasilkan aliran butir (<i>grain flow</i>) yang terarah, sehingga berkaitan erat terhadap sifat – sifat kekuatan, dan ketahanan terhadap dampak, serata kelelahan yang dihasilkan
Struktur utuh	Tidak ada kehampaan (<i>voids</i>) yang dapat menyebabkan kerusakan cacat yang tidak diharapkan di bawah kondisi adanya tegangan atau dampak.
Kekuatan dampak yang baik	Produk hasil <i>forging</i> memiliki kekuatan dan ketangguhan terhadap beban, di tambah dengan sifatnya yang ulet sehingga tahan terhadap kerusakan yang diakibatkan adanya beban kejutan atau dampak.

2.9. Friction

Friction dapat diartikan ketahanan permukaan terhadap gerakan geser atau roling. Sementara dalam operasi pembentukan logam istilah ini diubah menjadi resistensi permukaan *billet* terhadap aliran logam.



Gambar 2. 12 Interaksi permukaan *die* dan *billet*.

(Sumber: Cora, Ömer Necati, 2004)

Berbeda dengan pengertian diatas, *friction* adalah fenomena yang sangat kompleks dalam pembentukan logam dan mencakup beberapa parameter yang berinteraksi satu sama lain seperti. Kecepatan geser, tekanan kontak, kekerasan permukaan, sifat material, suhu dan kondisi pelumasan.

Yang perlu diperhatikan dalam operasi pembentukan logam, *friction* sangat penting karna mempengaruhi kekuatan pembentuk (*energy*), aliran material didalam cetakan, dan sebagai hasil dari kualitas produk dan usia pakai alat yang digunakan. Selain operasi dalam simulasi elemen hingga, model *friction* adalah salah satu syarat batas input. Diantara berbagai *friction* model dalam literatur yang akurasi dan lebih tinggi masih belum diketahui dan kontroversial. Juga sulit untuk membuat model gesekan unik yang mencakup semua parameter pembentukan untuk operasi pembentukan logam. Dalam paket FEM komersial ada model *friction* yang berbeda seperti model *Coulomb*, *shear*, *stick – slip*. Namun model ini tidak mampu mensimulasikan *friction* secara akurat (Cora, Ömer Necati, 2004).

Tabel 2. 2 Koefisien Gesekan untuk Operasi Pembentukan. (Cora, Ömer Necati, 2004)

<i>Coefficient of Friction μ</i>		
Proses	<i>Cold</i>	<i>Hot</i>
<i>Rolling</i>	0,05 – 0,1	0,2 – 0,7
<i>Forging</i>	0,05 – 0,1	0,1 – 0,2
<i>Drawing</i>	0,03 – 0,01	-
<i>Sheet – metal forming</i>	0,05 – 0,1	0,1 – 0,2
<i>Machining</i>	0,5 – 2	-

2.10. Material

Bahan yang digunakan untuk roda kereta api harus memiliki sifat yang menunjang fungsi dan kinerja roda kereta api, yaitu memiliki kekerasan permukaan yang tinggi, ketangguhan yang baik dan keuletan yang baik. Dengan mengacu pada standar ASM *Handbook Vol 01 Properties and Selection Irons, Steel and High – Performance Alloys*, Material roda kereta api adalah baja karbon medium. Material yang menjadi pilihan untuk pembuatan roda kereta api yaitu AISI 4340 dan *Mangan Steel Hadfield*. Tetapi AISI 4340 adalah material yang paling cocok untuk pembuatan roda kereta api. Jika dilihat dari kekerasannya dan kemampuan *machining* AISI 4340 lebih baik dari *Mangan Steel Hadfield* (Fauzan, 2018).

AISI 4340 adalah baja karbon sedang, baja paduan kecil yang dikenal karena ketangguhan dan kekuatannya di bagian yang relative besar. AISI 4340 juga merupakan salah satu jenis baja nikel cromium molybdenum. Baja 4340 yang sudah diperkeras dan dikeraskan dapat diperkeras permukaannya lebih lanjut dengan pengerasan induksi dan dengan nitridasi. Baja 4340 memiliki ketahanan guncangan dan benturan yang baik serta ketahanan aus dan abrasi dalam kondisi mengeras. Sifat baja AISI 4340 mempunyai keuletan baik (asmtmsteel.com).

2.10.1. Spesifikasi dan Standar Relevan Baja AISI 4340

(asmtmsteel.com)

Negara	Amerika Serikat	Britania	Britania	Jepang
Standar	ASTM A29	EN 10250	BS 970	JIS G4103
Kelas	4340	36 CrNiMo4 / 1.6511	EN24 / 817M40	SNCM 439 / SNCM8

2.10.2. ASTM 4340 Komposisi Kimia Baja dan Kesetimbangan

Standar	Kelas	C	M N	P	S	Si	Ni	Cr	Mo
ASTM A29	4340	0,38-0,43	0,60-0,80	0,035	0,040	0,15-0,35	1.65-2.00	0,70-0,90	0,20-0,30
EN 10250	36CrNiMo4 / 1.6511	0,32-0,40	0,50-0,80	0,035	0,035	≤ 0,40	0,90-1,20	0,90-1,2	0,15-0,30
BS 970	EN24 / 817M40	0,36-0,44	0,45-0,70	0,035	0,040	0,1-0,40	1.3-1.7	1,00-1,40	0,20-0,35
JIS G4103	SNCM 439 / SNCM8	0,36-0,43	0,60-0,90	0,030	0,030	0,15-0,35	1.60-2.00	0,60-1,00	0,15-0,30

Gambar 2. 13 Komposisi Kimia AISI 4340

(Sumber: asmtmsteel.com)

2.10.3. Penerapan Baja AISI 4340

Baja AISI 4340 digunakan sebagian besar di sector industry untuk aplikasi yang membutuhkan kekuatan tarik atau luluh yang lebih tinggi. Beberapa aplikasi sebagai berikut:

- Perengkapan pendaratan pesawat
- Otomotif
- Pengeboran minyak dan gas
- Pembentukan hangat dan dingin
- Pembuatan mesin
- Sistem transfer, seperti roda gigi transmisi listrik dan poros.
- Industri rekayasa umum dan aplikasi penggunaan *structural*, seperti roda gigi as roda, *spindle*, kopleng, *chuck*, dan roda kereta api (astmsteel, 1999)

2.11. Konsep Tegangan dan Regangan

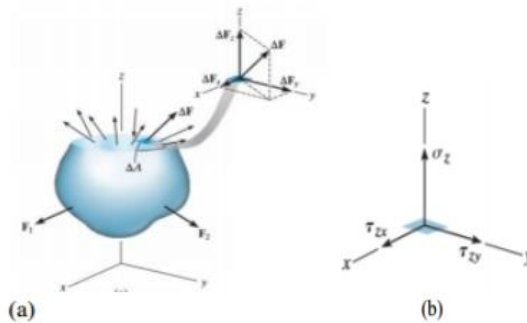
2.12.1. Tegangan

Tegangan didefinisikan sebagai intensitas gaya internal yang bekerja pada bidang atau area tertentu melewati satu titik. Ada dua jenis tegangan yang mungkin terjadi pada struktur, yaitu tegangan normal dan tegangan geser (Hibbeler, 2011).

Tegangan normal didefinisikan sebagai intensitas gaya internal yang bekerja pada bidang normal luasan ΔA (ditunjukkan oleh Gambar 2.14 a). Jika jumlah gaya yang bekerja pada area tersebut adalah ΔF_z , maka nilai tegangan normal secara matematis serta besar tegangan normal rata-rata dari semua gaya yang bekerja bidang normal luasan ΔA dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$\sigma_z = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_z}{\Delta A} \quad (2.1)$$

$$\sigma_{\text{avg}} = \frac{F}{A} \quad (2.2)$$



Gambar 2. 14 (a) Ilustrasi gaya yang bekerja pada suatu struktur
 (b) Ilustrasi orientasi sumbu setiap tegangan
 (Sumber: Hibbeler, 2011)

Jika gaya normal tersebut bersifat “tarikan” seperti pada Gambar 2.14(a), tegangan normal tersebut disebut **tegangan tarik**. Sedangkan apabila bersifat “dorongan”, tegangan normal tersebut disebut **tegangan compression**. Tegangan geser didefinisikan sebagai intensitas gaya tangensial (tegak lurus) yang bekerja pada luasan ΔA . Sehingga secara matematis dirumuskan sebagai berikut.

$$\tau_{zx} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_x}{\Delta A} \quad (2.3)$$

$$\tau_{zy} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_y}{\Delta A} \quad (2.4)$$

Sehingga besar tegangan normal rata-rata dari semua gaya tangensial yang bekerja bidang normal luasan ΔA dapat dirumuskan sebagai berikut.

2.12.2. Regangan

Untuk memperoleh satuan deformasi atau regangan (ε) adalah dengan membagi perpanjangan (δ) dengan panjang mula – mula (L_0) dari suatu spesimen. Regangan dapat dirumuskan: (Hibbeler, 2011).

$$\varepsilon = \frac{L_1 - L_0}{L_0} = \frac{\delta}{L_0} \quad (2.5)$$

Keterangan:

ε = regangan

L_0 = panjang awal (mm)

L_1 = panjang akhir (mm)

δ = perubahan panjang (mm)

2.12.3. Hubungan Tegangan dan Regangan

Hubungan tegangan dan regangan dapat ditunjukkan dalam Gambar. Rasio antara tegangan dan regangan normal dapat disebut *Modulus Young* atau Modulus Elastisitas, merupakan tangen dari

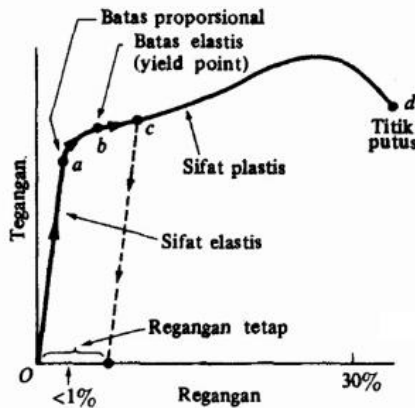
sudut yang terbentuk antara garis *hubungan* tegangan dan regangan dengan garis sumbu regangan dan dinotasikan sebagai. (Hibbeler, 2011).

$$E = \tan \theta = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (2.6)$$

Keterangan:

E = modulus elastisitas (kg.mm/s²)

θ = sudut antara garis *hubungan* regangan dengan garis sumbu regangan (⁰)



Gambar 2. 15 Tegangan dan Regangan
(Sumber: Hibbeler, 2011)

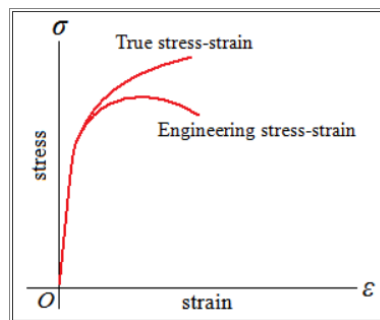
2.12.4. Hubungan antara True Stress True Strain, Engineering Stress, dan Engineering Strain.

True stress beban yang diterapkan dibagi dengan luas penampang yang sebenarnya (daerah yang berubah *sehubungan* dengan waktu) dari specimen pada beban tersebut. *Engineering stress* adalah beban yang diterapkan dibagi dengan luas penampang asli suatu material. Sedangkan *True strain* sama dengan log alami hasil bagi dari panjang saat ini diatas panjang asli dan *engineering strain* jumlah yang di deformasi bahan per satuan panjang dalam uji tarik.

Tabel 2. 3 Perbedaan Persamaan

$\sigma = \frac{P}{A_0}$	Engineering stress
$\sigma_t = \frac{P}{A}$	True stress
$\epsilon = \frac{\delta}{L_0}$	Engineering strain
$\epsilon_t = \ln \frac{L}{L_0}$	True strain

Diagram yang diperoleh dengan plot *true stress* dan *true strain* mencerminkan perilaku material yang lebih akurat. Tidak ada penurunan *true stress* pada fasa *necking*. Dan juga hasil yang diperoleh dari *tension test* dan *compression test* akan menghasilkan plot yang pada dasarnya sama ketika *true stress* dan *engineering stress* benar digunakan. *True stress* dan *true strain* seringkali tidak diperlukan ketika *yield stress* terlampaui, material berubah bentuk. Perbedaan yang signifikan berkembang antara kedua kurva hanya ketika *necking* dimulai sehingga komponen berubah bentuk dan tidak lagi memenuhi tujuan.



Gambar 2. 16 *True stress – strain* dan *engineering stress – strain*
(Sumber. *Engineering Archives*, 2008)

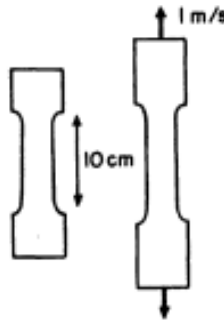
2.13. Strain Rate

Informasi tentang material yang akan digunakan pada simulasi ini sangat penting untuk mengetahui karakteristik material salah satunya adalah laju regangan atau aliran regangan dari material. Laju regangan atau *strain rate* adalah laju perubahan regangan dengan waktu. Berikut contoh untuk mencari *strain rate*.

- a. Spresimen Tarik dengan panjang 10 cm diperpanjang dalam pengujian mesin pada kecepatan 1 m/s

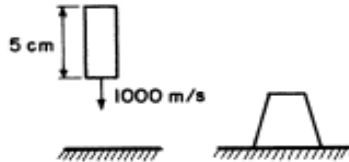
$$\dot{\epsilon} = \frac{\Delta \epsilon}{\Delta t} = \frac{\Delta l}{l_0} \frac{v_0}{\Delta t} = \frac{v_0}{l_0} = \frac{100}{10}$$

$$\dot{\epsilon} = 10 \text{ s}^{-1}$$



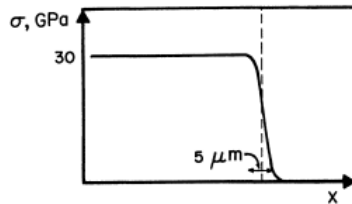
Gambar 2. 17 Spesimen Tarik
(Sumber: Mayer, 1994)

- b. *Proyektile* (silinder) dengan panjang 5 cm menumbuk target yang benda yang kaku dengan kecepatan 1000 m/s. Jika kita mengasumsikan bahwa proyektil akan melambat secara *linear* dan perubahan panjangnya 2,5 cm (terpotong kerucut), kita dapat menetapkan perkiraan laju regangan sebagai berikut :



$$\dot{\epsilon} = \frac{\Delta l}{l_0 t} = \frac{2,5}{5t} \dots\dots\dots (1)$$

Gambar 2. 18 Targer Kaku Proyektil
(Sumber: Mayer, 1994)



Gambar 2. 19 Perambatan gelombang kejut dalam tembaga
(Sumber: Mayer, 1994)

Dapat t (waktu) dapat dicari dengan asumsi perubahan kecepatan linear sebagai berikut.

$$S = 2,5 \text{ cm}$$

$$v = \frac{2s}{t}$$

$$t = \frac{2,5 \times 2 \times 10^{-2}}{v}$$

$$\epsilon = \frac{2,5}{5 \times 5 \times 10^{-3}} = \frac{1}{10^{-4}} = 10^4 \text{ s}^{-1} \dots\dots\dots(2)$$

2.14.1. Respon Mekanik terhadap *Strain Rate* Tinggi

Pada awal tahun 1905, Bertram Hopkinson melakukan serangkaian eksperimen dinamis pada baja dan menyimpulkan bahwa kekuatan dinamis setidaknya dua kali lebih tinggi dari kekuatan laju regangan kecil. Dia tidak memiliki metode pengukuran canggih, tetapi hasilnya cukup benar. Diketahui juga baja mengalami transisi dari ulet ke getas ketika laju regangan meningkat. Berikut klasifikasi skematisnya.

STRAIN RATE, s ⁻¹	COMMON TESTING METHODS	DYNAMIC CONSIDERATIONS	
10 ⁷	HIGH VELOCITY IMPACT -Explosives -Normal plate impact -Pulsed laser -Exploding foil -Incl. plate impact (pressure-shear)	SHOCK-WAVE PROPAGATION	INERTIAL FORCES IMPORTANT
10 ⁶		SHEAR-WAVE PROPAGATION	
10 ⁵	DYNAMIC-HIGH -Taylor anvil tests -Hopkinson Bar -Expanding ring	PLASTIC-WAVE PROPAGATION	
10 ⁴	DYNAMIC-LOW High-velocity hydraulic, or pneumatic machines; cam plastometer	MECHANICAL RESONANCE IN SPECIMEN AND MACHINE IS IMPORTANT	
10 ³	QUASI-STATIC Hydraulic, servo-hydraulic or screw-driven testing machines	TESTS WITH CONSTANT CROSS- HEAD VELOCITY STRESS THE SAME THROUGHOUT LENGTH OF SPECIMEN	INERTIAL FORCES NEGLIGIBLE
10 ²			
10 ¹			
10 ⁰			
10 ⁻¹			
10 ⁻²	CREEP AND STRESS- RELAXATION -Conventional testing machines -Creep testers	VISCO-PLASTIC RESPONSE OF METALS	
10 ⁻³			
10 ⁻⁴			
10 ⁻⁵			
10 ⁻⁶			
10 ⁻⁷			
10 ⁻⁸			
10 ⁻⁹			

Gambar 2. 20 Klasifikasi skematik dari teknik pengujian menurut tingkat regangan (Sumber: Mayer,1994)

Biasa para ilmuwan ingin tahu tentang pengaruh *strain rate* terhadap kekuatan bahan. Responya sangat bervariasi, dan oleh karena itu perlu untuk menguji bahan – bahan untuk mendapatkan

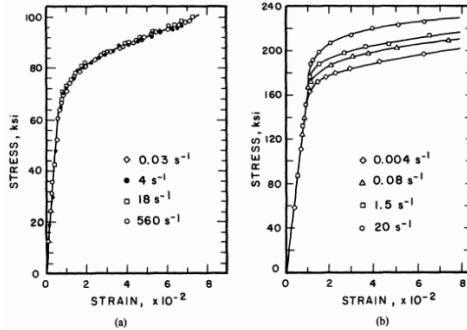
informasi yang spesifik. Ketergantungan laju aliran dari tekanan aliran diperlukan dalam kode komputasi dan merupakan komponen penting dalam model hidrodinamika ketika tekanan cukup kecil sehingga kekuatan material merupakan parameter penting. Sebagai contoh, kami memberikan Persamaan konstitutif yang umum digunakan. Ini dikenal sebagai Persamaan Johnson Cook. (Mayer, 1994).

$$\sigma = \left[\sigma_0 + B\varepsilon^n \right] \left[1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right] \left[1 - (T^*)^m \right] \quad (2.7)$$

Dimana σ_0 , B, C, n, m adalah parameter yang untuk menentukan tegangan sebagai fungsi regangan, laju regangan, dan suhu.

$$\sigma = f(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T)$$

Sebagai contoh dari berbagai respon, Gambar 2.21 menunjukkan kurva tegangan regangan tekan (*specimen silinder*) untuk aluminium 7075-T6 dan untuk paduan titanium 6% Al-4% V. pengujian dilakukan pada tingkat regangan 3×10^{-2} dan $5 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ untuk paduan aluminium tanpa efek yang jelas pada kurva tegangan – regangan. Untuk paduan titanium efek yang dapat diamati. Tingkat regangan bervariasi antara 4×10^{-3} dan 2×10^{-1} dengan penguatan laju regangan yang cukup diamati. Gambar 2.21 menunjukkan respon tegangan – regangan untuk titanium murni dan tantalum. Kurva laju regangan tinggi $\varepsilon = 3,5 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$. Untuk tantalum adalah isothermal dan diperoleh dengan mengompresi secara berurutan (Mayer, 1994).



Gambar 2. 21 Efek *strain rate* pada respon tegangan – reganag *compression* (a). 7075 –T6 alumunium (b). Ti-6% Al-4%V alloy. (Sumber: Mayer,1994).

2.14.2. Deformasi Plastis pada Strain Rate Tinggi

Laju regangan deformasi plastis yang tinggi suatu material dijelaskan oleh persamaan konstitutif yang menghubungkan tegangan dengan regangan, laju regangan, dan suhu. Tegangan ini secara skematis diungkapkan seperti ini.

$$\sigma = f(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T)$$

Keterangan:

ε = regangan

$\dot{\varepsilon}$ = laju regangan

T = suhu.

Karena ada berbagai deformasi substruktur yang bergantung pada laju regangan, suhu, dan keadaan tegangan, kita harus menambahkan istilah umum yang disebut "sejarah deformasi" ke persamaandi atas:

$$\sigma = f(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T, \text{deformation history})$$

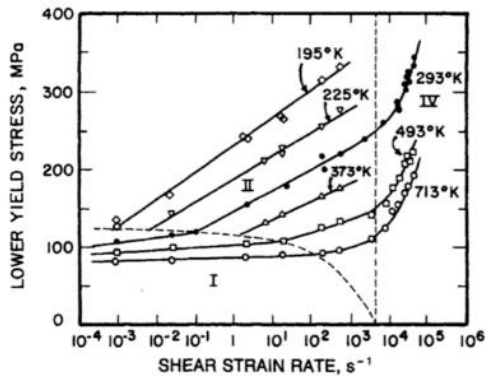
Tegangan dan regangan adalah tensor orde dua. Namun dapat diubah menjadi tegangan skalar dengan mengurangi

tegangan dan regangan menjadi tegangan efektif seperti persamaan (2. 1) diatas dan regangan yang efektif menurut persamaan berikut.

$$\sigma_{\text{eff}} = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{1/2} \quad (2.8)$$

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \frac{\sqrt{2}}{2} [(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2]^{1/2} \quad (2.9)$$

Perhatikan τ dan γ , tegangan geser dan regangan. Kita tahu bahwa tegangan geser adalah komponen penting dalam deformasi plastis.



Gambar 2. 22 Tegangan luluh terhadap laju regangan geser untuk baja ringan
(Sumber: Mayer, 1994)

Gambar 2.22 menunjukkan kekuatan luluh yang lebih kecil dari baja ringan yang diplot terhadap logaritma laju regangan pada suhu yang berbeda, dan dapat disimpulkan:

- Tegangan luluh meningkat seiring meningkatnya laju regangan.
- Meningkatnya tegangan luluh dengan laju regangan lebih signifikan pada suhu kecil.

2.14.3. *Empirical Constitutive Equations*

Terdapat sejumlah persamaan yang digunakan untuk menggambarkan perilaku plastis material sebagai fungsi laju regangan dan suhu.

$$\sigma = \sigma_0 + k\epsilon^n \quad (2.10)$$

Keterangan:

σ_0 = tegangan luluh,

n = koefisien kerja-pengerasan dan

k = faktor yang ada sebelumnya.

Pengaruh suhu pada tegangan ditunjukkan oleh persamaan berikut.

$$\sigma = \sigma_r \left[1 - \frac{(T - T_r)^m}{(T_m - T_r)^m} \right] \quad (2.11)$$

Keterangan:

T_m = Titik Lebur

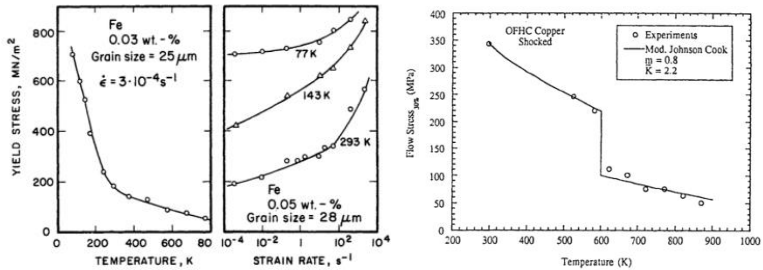
T_r = Suhu referensi untuk tegangan referensi yang telah diukur (σ_r)

T = Suhu untuk σ yang telah dihitung

Ini adalah penyesuaian kurva sederhana, dan persamaan di atas meningkat dalam "konkavitas" ketika m , yakni parameter penyesuaian yang ditentukan secara eksperimental meningkat. Efek dari laju regangan. Dapat dengan mudah diungkapkan oleh

$$\sigma \propto \ln \dot{\epsilon}$$

Namun, hubungan ini sangat sering diamati pada tingkat regangan yang tidak terlalu tinggi.



Gambar 2. 23 Pengaruh suhu dan tingkat regangan pada tegangan luluh besi.

(Sumber: Vohringer, Gbr. 31, hal. 44); (b) Aliran tegangan vs suhu yang ditentukan secara eksperimental dan kalkulasi (menggunakan Persamaan Johnson-Cook yang dimodifikasi) untuk tembaga hard-shock (Sumber: Andrade, Meyers, dan Chokshi, Scripta Met. et Mat. 30 (1994) 933).

2.15. Johnson – Cook

Permodelan Johnson–Cook digunakan untuk mempresentasikan respon dari material saat menerima regangan, laju regangan dan suhu yang tinggi. Respon tersebut akan muncul pada peristiwa pembebanan impuls akibat tumbukan dengan kecepatan tinggi. Dengan pemodelan ini, *yield stress* bergantung pada regangan, laju regangan, dan suhu. Pemodelan John –Cook dapat ditulis sebagai berikut.

$$\sigma = \left[\sigma_0 + B \varepsilon^n \right] \left[1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right] \left[1 - (T^*)^m \right] \quad (2.12)$$

Keterangan:

σ = *stress*

σ_0 = *Initial yield stress*

B = *Hardening constant*

ε = *Effective plastic strain*

$$\begin{aligned}
 n &= \text{Hardening exponent} \\
 C &= \text{Strain rate constant} \\
 \dot{\epsilon} &= \text{Normalized effective plastic strain} \\
 T^* &= \text{Homologous Suhue}
 \end{aligned}$$

ini memiliki lima parameter yang ditentukan secara eksperimental (σ_0, B, C, n, m) yang menggambarkan *respons* sejumlah logam dengan cukup baik. Istilah T^* dihitung sebagai berikut.

$$T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \quad (2.13)$$

T_r adalah suhu referensi dimana σ_0 diukur dan $\dot{\epsilon}_0$ adalah laju regangan referensi (sama dengan 1). Persamaan Johnson – Cook adalah model konstitutif yang sangat berguna dan sukses Untuk eksperimen pada suhu ruangan *Homologous Suhue* dengan nilai 0. Parameter pada persamaan Johnson – Cook didapatkan dari eksperimen. Berikut beberapa konstanta konstitutif dari material (tabel 2.3.) (Mayer, 1994).

Tabel 2. 4 Konstanta Konstitutif untuk Variasi Material ($\dot{\epsilon}_0 = 1 \text{ s}^{-1}$) (Mayer, 1994).

Material	Description				Constitutive Constants for				
	Hardness (Rockwell)	Density (kg/m ³)	Specific Heat (J/kg K)	Melting Temperature (K)	σ_0 (MPa)	B (MPa)	n	C	m
OFHC copper	F-30	8960	383	1356	90	292	0.31	0.025	1.09
Cartridge brass	F-67	8520	385	1189	112	505	0.42	0.009	1.68
Nickel 200	F-79	8900	446	1726	163	648	0.33	0.006	1.44
Armco iron	F-72	7890	452	1811	175	380	0.32	0.060	0.55
Carpenter electrical iron	F-83	7890	452	1811	290	339	0.40	0.055	0.55
1006 steel	F-94	7890	452	1811	350	275	0.36	0.022	1.00
2024-T351 aluminum	B-75	2770	875	775	265	426	0.34	0.015	1.00
7039 aluminum	B-76	2770	875	877	337	343	0.41	0.010	1.00
4340 steel	C-30	7830	477	1793	792	510	0.26	0.014	1.03
S-7 tool steel	C-50	7750	477	1763	1539	477	0.18	0.012	1.00
Tungsten alloy (.07Ni, .03Fe)	C-47	17000	134	1723	1506	177	0.12	0.016	1.00
Depleted uranium-0.75% Ti	C-45	18600	117	1473	1079	1120	0.25	0.007	1.00

Source: From Johnson and Cook [4], p. 4.

Yang perlu diperhatikan bahwa persamaan empiris yang ada pada dasarnya diperoleh dari kurva yang dihasilkan, dan masing-masing kelompok penelitian akhirnya mengembangkan formulasi sendiri. Selain itu hal yang penting lainnya adalah bagaimana mendapatkan parameter persamaan dari percobaan. Persamaan Johnson–Cook telah banyak dikenal untuk sejumlah besar bahan atau material. Kemudian Andrade telah memodifikasi persamaan Johnson–Cook untuk menggabungkan rekristalisasi dinamis pada suhu yang lebih tinggi.

$$\sigma = \left[\sigma_0 + B\varepsilon^n \right] \left[1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] H(T) \quad (2.14)$$

$$H(T) = \frac{1}{1 - \left[\frac{(\sigma_f)_{\text{rec}}}{(\sigma_f)_{\text{def}}} \right] u(T)} \quad (2.15)$$

$u(T)$ adalah fungsi step suhuyang di definisikan sebagai berikut:

$$u(T) = \begin{cases} 0 & \text{for } T < T_c \\ 1 & \text{for } T > T_c \end{cases}$$

T_c adalah suhudimana fenomena kritis atau (rekristalisasi dinamis transformasi fase) terjadi. $(\sigma_f)_{\text{rec}}$ dan $(\sigma_f)_{\text{def}}$ adalah tegangan aliran material setelah dan sebelum rekristalisasi. Penerapan persamaan ini untuk tembaga dalam kondisi yang diperkeras menghasilkan hasil yang ditunjukkan pada Gambar 2.20 (b). Penurunan drastis tegangan aliran pada 600 K, yang sesuai dengan rekristalisasi dinamis, diwakili dengan baik oleh persamaan yang dimodifikasi. Persamaan ini juga dapat diterapkan pada perubahan fasa yang di aktifkan suhu (Mayer, 1994).

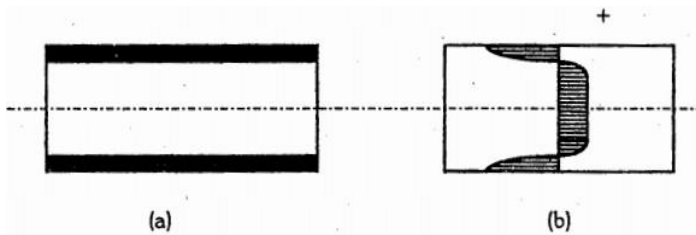
2.16. *Residual Stress*

Tegangan sisa atau residual stress adalah tegangan yang masih bekerja pada suatu benda meskipun beban luar yang bekerja pada benda tersebut telah dihilangkan. Berdasarkan arahnya, *residual stress* dapat dibagi menjadi dua, yaitu *residual stress* tarik dan *residual stress* tekan. Kedua tegangan itu selalu berada pada kondisi seimbang statik, artinya penjumlahan gaya akibat kedua tegangan tersebut selalu sama dengan nol. *residual stress* dapat berpengaruh terhadap sifat material, terutama ketahanan korosi dan umur lelah (*fatigue lives*). *Residual stress* tekan pada permukaan akan meningkatkan ketahanan korosi tegangan (*stress corrosion*) dan umur lelah, sedangkan *residual stress* tarik berakibat sebaliknya.

Secara umum *residual stress* pada suatu benda dapat disebabkan oleh:

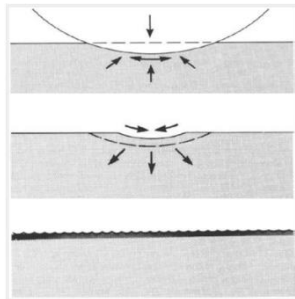
- a. Pengerjaan dingin (*cold working*)
- b. Pemanasan dan pendinginan (missal: pada peristiwa pengelasan)
- c. Penambeban unsur paduan (*alloy*)

Semua pengerjaan dingin seperti *rolling*, penarikan kawat (*wire drawing*), *deep drawing*, dan lainnya dapat menimbulkan *residual stress*. Secara umum *residual stress* yang terjadi akibat proses pengerjaan dingin disebabkan oleh adanya deformasi plastis yang tidak seragam. Kemudian *residual stress* yang terjadi akibat penambahan unsur paduan pada dasarnya terjadi karena adanya difusi unsur paduan yang menyebabkan terjadi perubahan volume pada daerah yang banyak mengandung unsur paduan. Misalkan pada proses *carburizing*, atom – atom C yang ditambahkan dari luar akan berdifusi ke daerah permukaan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.24 (Bagas Pujilaksono, 2016).



Gambar 2. 24 Tegangan sisa akibat penambahan unsur paduan
 (a). Difusi unsur paduan. (b). Kondisi tegangan sisa
 (Sumber: Bagus Pujilaksono, 2016).

Residual stress adalah *stress* yang tertinggal di dalam struktur sebagai hasil dari perlakuan mekanis atau thermal atau keduanya. Pada contoh di bawah ini merupakan proses terjadinya *residual stress* yang dihasilkan dari perlakuan mekanis (*shot peening*). Prinsip *shot peening* adalah dengan mendeformasi suatu material dengan menggunakan bola baja pada seluruh area permukaan. Proses tumbukan yang terjadi kemudian akan memberikan efek deformasi dan meninggalkan tegangan (*residual stress*) (Prasetyo.Y, 2012).



Gambar 2. 25 *Shot peening*
 (Sumber: Prasetyo.Y, 2012).

2.17. Heat Treatment

Perlakuan panas secara eksplisit didefinisikan sebagai perpaduan antara proses pemanasan, penahanan suhu, dan pendinginan. Perlakuan panas bisa diaplikasikan pada logam atau paduan dalam keadaan padat, untuk mendapatkan sifat fisik dan atau mekanik tertentu. Beberapa perlakuan panas yang umum di aplikasikan pada baja adalah *annealing*, *normalizing*, *quenching* dan *tempering*.

a. Annealing

Annealing sendiri memiliki banyak jenis yaitu *full annealing*, *recrystallization annealing*, *stress – relief annealing*. *Full annealing* bertujuan untuk melunakkan logam baja sebelum melakukan proses permesinan. Kemudian *recrystallization annealing* bertujuan untuk melunakkan baja hasil pengerjaan dingin. Proses rekristalisasi dan pengembangan bentuk strukturnya dapat merubah baja menjadi lebih lunak dengan sifat mampu bentuk yang lebih baik. Sedangkan *stress – relief annealing* bertujuan untuk menghilangkan *residual stress* dalam baja. Baja paduan AISI 4340 dianil pada suhu 844 ° C (1550 ° F) diikuti dengan pendinginan tungku.

b. Normalizing

Proses *normalizing* atau menormalkan adalah jenis perlakuan panas yang umum diterapkan pada hampir semua produk cor, *over-heated forging* dan produk-produk tempa yang besar. *Normalizing* ditujukan untuk memperhalus butir, memperbaiki mampu mesin, menghilangkan tegangan sisa dan juga memperbaiki sifat mekanik baja karbon struktural dan bajabaja paduan kecil.

c. Hardening

Hardening adalah perlakuan panas terhadap logam dengan sasaran meningkatkan kekerasan alami logam. Perlakuan panas

menuntut pemanasan benda kerja menuju suhu pengerasan dan pendinginan secara cepat dengan kecepatan kritis.

d. Tempering

Perlakuan untuk menghilangkan tegangan dalam dan menguatkan baja. *Tempering* didefinisikan sebagai proses pemanasan logam setelah dikeraskan pada suhu tempering (dibawah suhu kritis), yang dilanjutkan dengan proses pendinginan. Baja paduan AISI 4340 harus dalam kondisi panas atau normal dan kondisi panas sebelum temper. Suhu temper untuk tergantung pada tingkat kekuatan yang diinginkan. Untuk tingkat kekuatan pada kisaran 260 - 280 ksi, suhu pada 232°C (450 F). Untuk kekuatan dalam kisaran temper 125 - 200 ksi pada 510° C (950 F). Dan jangan marah baja 4340 jika berada di kisaran kekuatan 220 - 260 ksi karena temper dapat mengakibatkan degradasi resistensi dampak untuk tingkat kekuatan ini.

2.18. *Finite Element Analysis*

Metode *Finite Element Analysis* (FEA), awalnya diperkenalkan oleh Turner (1956) yaitu teknik komputasi yang kuat untuk solusi prediksi berbagai masalah teknik "dunia nyata" yang memiliki domain kompleks dan mengalami kondisi batas umum. FEA telah menjadi langkah penting dalam desain atau pemodelan fenomena fisik dalam berbagai disiplin ilmu teknik. Fenomena fisik biasanya terjadi dalam kontinum materi (padat, cair, atau gas) yang melibatkan beberapa variabel lapangan. Variabel bidang bervariasi dari titik ke titik, sehingga memiliki jumlah solusi yang tak terbatas dalam domain. Dalam ruang lingkup ini, sebuah kontinum dengan batas yang dikenal disebut domain (Madenci.E, 2015).

Dasar FEA bergantung pada penguraian domain menjadi sejumlah subdomain (elemen) di mana solusi prediksi sistematis dibangun dengan menerapkan variasi atau metode residu. Akibatnya, FEA mengurangi masalah menjadi sejumlah batas yang tidak diketahui dengan membagi domain menjadi elemen dan dengan mengekspresikan variabel bidang yang tidak diketahui

dalam hal fungsi prediksi yang diasumsikan dalam setiap elemen. Fungsi-fungsi ini (juga disebut fungsi interpolasi) didefinisikan dalam hal nilai-nilai variabel lapangan pada titik-titik tertentu, disebut sebagai *node*. *Node* biasanya terletak di sepanjang batas elemen, dan *node* menghubungkan elemen yang berdekatan. Kemampuan untuk mendiskritisasi domain tidak teratur dengan elemen hingga menjadikan metode ini sebagai alat analisis yang berharga dan praktis untuk solusi masalah batas, awal, dan *eigenvalue* yang muncul dalam berbagai disiplin ilmu teknik (Madenci.E, 2015).

Metode analisis elemen hingga membutuhkan langkah-langkah utama berikut:

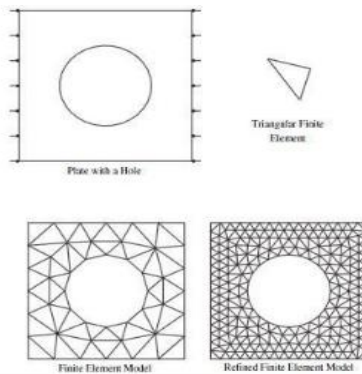
- a. Diskritisasi domain menjadi sejumlah terbatas subdomain (elemen).
- b. Pemilihan fungsi interpolasi.
- c. Pengembangan matriks elemen untuk subdomain (elemen).
- d. Perakitan matriks elemen untuk setiap subdomain untuk mendapatkan matriks global untuk seluruh domain.
- e. Pengenaan kondisi batas.
- f. Solusi persamaan.
- g. Perhitungan tambahan (jika diinginkan).

Ada tiga pendekatan utama untuk membangun solusi berdasarkan perkiraan konsep FEA.

- a. Pendekatan langsung. Pendekatan ini digunakan untuk masalah yang relatif sederhana, dan biasanya berfungsi sebagai sarana untuk menjelaskan konsep FEA
- b. *Residual* tertimbang Ini adalah metode serbaguna, memungkinkan penerapan FEA

Untuk masalah yang fungsionalnya tidak dapat dibangun. Pendekatan ini secara langsung menggunakan persamaan diferensial yang mengatur, seperti perpindahan panas dan mekanika fluida (Madenci.E, 2015).

Proses pembagian benda menjadi beberapa bagian disebut *meshing* (Logan, 2012).



Gambar 2. 26 Mesh di FEM
(Sumber: Logan, 2012)

Menunjukkan dasar penggambaran dalam pendekatan FEA, yaitu sebuah *plate* yang akan dicari distribusi suhunya. Bentuk geometri *plate* di *meshing* menjadi bagian-bagian kecil bentuk segitiga untuk mencari solusi yang berupa distribusi suhu *plate*. Sebenarnya kasus ini dapat diselesaikan dengan cara langsung, yaitu dengan Persamaan kesetimbangan panas (*heat balance equation*). Namun, untuk geometri yang rumit seperti *engine block* diperlukan FEM untuk mencari distribusi suhu (Logan, 2012).

FEA juga memiliki verifikasi. Verifikasi dapat diartikan sebagai langkah – langkah membuktikan apakah simulasi melalui program komputer dapat menyelesaikan persamaan atau tidak. Menurut Law dan Kelton (1991), suatu model dapat dikatakan benar ketika model simulasi yang dibuat tidak ada perbedaan yang sangat signifikan dengan kondisi nyata atau eksperimen. Oleh karena itu verifikasi dapat diartikan sebagai proses penerjemahan model simulasi konseptual kedalam bahasa pemrograman secara jelas. Verifikasi simulasi dengan cara sederhana dapat dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi dengan hasil lainnya yang memiliki permasalahan dan system metode elemen hingga yang serupa. (Logan, 2012).

2.19. *Linear dan Nonlinear Finite Element Analysis*

Masalah dianggap sebagai *linier* jika yang berikut terpenuhi:

- a. Perpindahan sangat kecil
- b. Gradien perpindahan sangat kecil
- c. Tekanan tergantung pada *strain linier*
- d. Kondisi batas tidak berubah selama pemuatan

Namun, jika hubungan kekuatan-perpindahan tergantung pada kondisi saat ini (saat ini masalah perpindahan, gaya dan hubungan tegangan-regangan) adalah *nonlinier*. *Nonlinier*, perilaku suhu tinggi bahan dalam industri nuklir dan *nonlinier geometris* seperti *buckling* mengarah pada pengembangan teknik elemen hingga *nonlinear*. Berikut tiga jenis *nonlinier*:

- a. Bahan *nonlinier* (fisik)
- b. *Nonlinier* geometris (kinematik)
- c. Mengubah kondisi batas

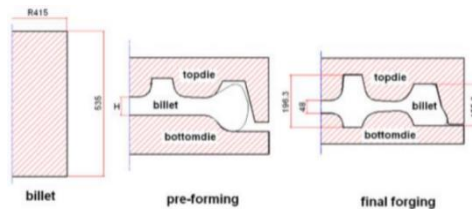
Nonlinieritas bahan disebabkan oleh hubungan *nonlinier* antara tegangan dan regangan seperti pada plastik-elastis (elastoplastik), material elasto-viscoplastik, *creep*, komposit dan masalah struktur beton dll. *Nonlinier* geometris timbul dari hubungan *nonlinear* antara regangan dan perpindahan, dan hubungan *nonlinear* antara tekanan dan kekuatan. Masalah regangan besar seperti manufaktur, benturan dan tabrakan dapat diberikan sebagai contoh untuk jenis *nonlinier* ini. Mengubah kondisi batas juga berkontribusi terhadap *nonlinier*. Jika beban pada struktur berbeda dengan perpindahan *nonlinier* terjadi. Selain itu masalah kontak dan gesekan menyebabkan kondisi batas *nonlinier*.

2.20. Penelitian Terdahulu.

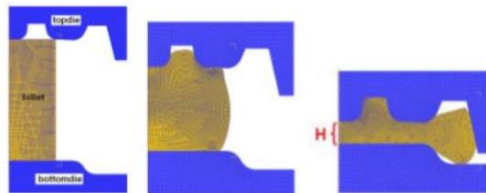
Penelitian terdahulu yang digunakan adalah penelitian yang masih berhubungan dengan judul penulis. Berikut adalah beberapa penelitian terdahulu.

Penelitian pertama oleh Yanju Wang dan Gang Fang dengan judul *Research on Hot Forging process of C-grade steel*

Train Wheel by FEM pada tahun 2011. Penelitian ini menganalisa tentang efek dari dua parameter *forging* yang berbeda, dan faktor – faktor pengaruh pada beban pembentukan metode elemen hingga dengan aplikasi DEFORM 2D. FEM digunakan untuk mengoptimalkan rasio distribusi material dari *hub* serta mengurangi kecacatan dan meningkatkan efisiensi produktivitas. Kemudian material yang digunakan adalah baja grade C dan pembetulan 2 tahap yaitu *pre – forming*. hasil dari kalkulasi mendapatkan nilai H sebesar 65 – 70 mm. Lalu pada final *forging*, ketebalan *billet* tereduksi menjadi 48 mm. Karena simulasi ini adalah *hot forming*, maka parameter seperti suhu awal *billet*, *die*, dan lingkungan harus diatur terlebih dahulu.



Gambar 2. 27 Proses panas pembentukan roda

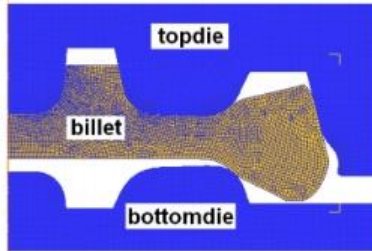


Gambar 2. 28 Proses *pre-forming* roda kereta



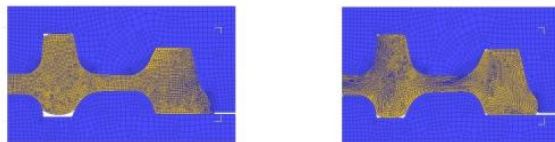
Gambar 2. 29 Proses *pre-forming* roda kereta tampak *isometric*

Setelah proses *pre-forming* selesai, hasil ini akan dilanjutkan ke proses *final forging* dengan cara di *export* ke DEFORM 2D dengan format .dfx. Kemudian proses *set up* dan *meshing* dilakukan kembali. Gambar 2.19 adalah pemodelan *final forging*



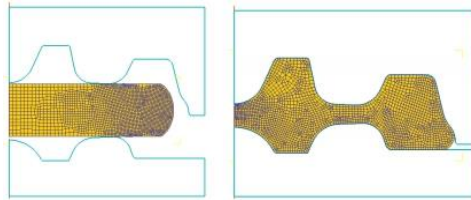
Gambar 2. 30 Model awal *forging*

Efek dari dua parameter penempaan yang berbeda pada penempaan akhir dibandingkan. Terlihat ukuran awal *billet* adalah 535mm, jika parameter *pre-forming* H berbeda, bentuk akhir roda akan berbeda. Hasil simulasi numerik menunjukkan bahwa ketebalan *pre-forming* adalah 70mm, roda *final forging* dalam kondisi baik (kanan). Namun jika ketinggian H adalah 65mm, cacat pengisian akan terjadi pada proses penempaan roda kereta akhir (kiri). Jelas penentuan parameter sangat mempengaruhi proses penempaan roda kereta.

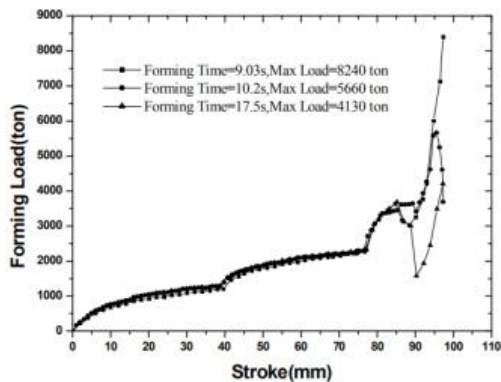


(1) 535mm → (H) 65mm → 48mm (2) 535mm → (H) 70mm → 48mm

Gambar 2. 31 Perbandingan karakteristik *forging* dengan parameter yang berbeda



Gambar 2. 32 Fitur *forging* untuk studi faktor kecepatan



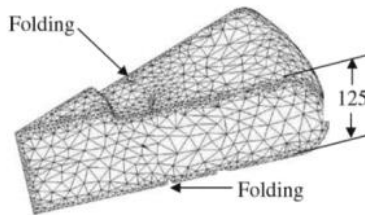
Gambar 2. 33 Membentuk beban dengan kecepatan pembentukan yang berbeda

Selain parameter ketebalan *pre-forming*, kecepatan dalam proses *forging* juga berpengaruh terhadap *forming load* atau beban penekanan yang dibutuhkan. Pada Gambar 2.23 *trandline* menunjukkan variasi kecepatan proses simulasi yang berupa waktu pembentukan, ternyata berpengaruh terhadap beban penekanan. Dimana semakin cepat proses pembentukannya, semakin besar beban yang dibutuhkan (Yanju Wang & Gang Fang, 2010).

Penelitian kedua oleh Tapas Gangopadhyay, Raj Kumar Ohdar, Dilip Kumar pratihar, dan Indrajit Basak dengan judul *Three-dimensional finite element analysis of multi-stage hot forming of railway wheels* pada tahun 2010. Peneliti melakukan simulasi *hot forming* roda kereta engan metode analisa *three*

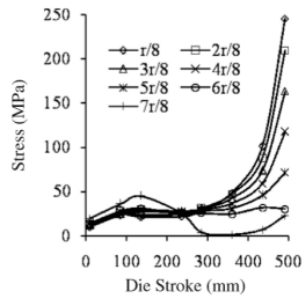
dimensional finite element menggunakan *software* DEFORM 3D, prosesnya yaitu *upsetting*, *forging*, dan *punching*. Studi ini menunjukkan bahwa desain, optimasi, dan analisis gangguan proses untuk pembuatan roda kereta multi- tahap dapat dilakukan secara efisien dengan *three dimensional finite element simulation*.

Ukuran *billet* berbentuk silindris dengan diameter 385mm dan ketebalan 615mm. Material yang digunakan adalah AISI 1045. Kemudian model *billet* yang disimulasikan 1/12 nya. Element yang digunakan adalah *tetrahedral* dengan jumlah 18400 elemen. Sedangkan *dies* dimodelkan *rigid*, dengan material AISI H13 dan jumlah elemen sebanyak 33076 untuk *upper die* dan 33012 untuk *lower die*. *Pre – forming* dilakukan dengan kecepatan *dies* 43,36 mm/s untuk mereduksi ketebalan *billet* menjadi 125mm dan *press load* sebesar 3,2MN seperti Gambar 2.34.

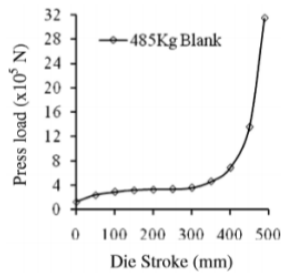


Gambar 2. 34 *Finite element* proses *pre forming*

Hasil *pre-forming* dapat dilihat pada Gambar 2.34. Deformasi *meshing* pada Gambar 2.37 pada akhir proses *upsetting*, sudah sesuai dengan bentuk *preform* namun terdapat cacat lipatan pada sisi atas dan bawah permukaan *billet*. Berdasarkan Gambar 2.35, proses *pre-forming billet* untuk mengubah tebal menjadi 125 mm, dibutuhkan *press load* sebesar $32 \times 10^5 \text{ N}$ atau 3,2MN.

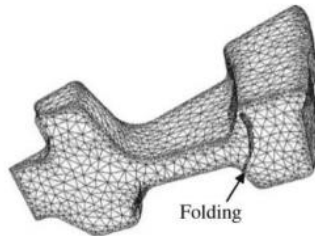


Gambar 2. 35 *Axial compressive stress* pada rasio radius yang berbeda pada proses *pre-forming*



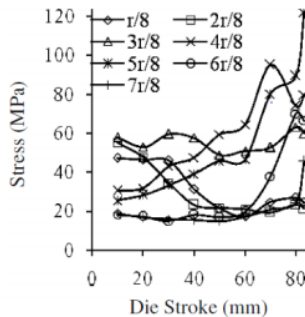
Gambar 2. 36 *Press load* saat proses *pre-forming*

Perubahan temperatur dan tegangan pada *billet* dianalisa dengan membuat titik pada 7 rasio radius (RR) yang bervariasi dari $r/8$ sampai $7r/8$, dimana r adalah titik radius maksimum dari koordinat aksial *billet* hasil *preform*. Pada Gambar 2.35 dapat dilihat bahwa distribusi *axial compressive stress* semakin berkurang seiring meningkatnya RR. *Axial stress* juga meningkat seiring meningkatnya *dies stroke* dan sebagai hasilnya, *press load* juga meningkat (Gambar 2.36).



Gambar 2. 37 Mesh hasil forging

Kemudian setelah *pre-forming*, prosesnya dilanjutkan dengan proses *forging* untuk mengurangi ketebalan *billet* menjadi 42mm. *billet* hasil *preform* ditransfer ke *dies forging* oleh manipulator dalam waktu 15 s. temperatur maksimum dan minimum pada akhir proses transfer ke *dies forging* tadi didapatkan sebesar 1300,7 °C dan 923 °C masing-masing. Pada proses *forging* yang akan dilakukan, kecepatan penekanan *upper die* dikurangi menjadi 14,31 mm/s.

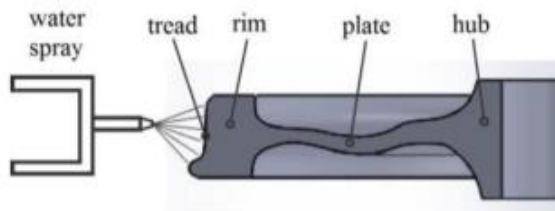


Gambar 2. 38 Effective stress pada 7 titik rasio radius saat proses forging dari tebal 125 mm

Berdasarkan pengamatan pada 7 titik yang dibagi berdasarkan rasio jari-jari *billet*, didapatkan bahwa nilai *effective stress*

berfluktuasi seiring meningkatnya *die stroke*. Namun pada stroke maksimal, didapatkan pada titik $4r/8$ nilai *effective stress* tertinggi, yaitu pada area *web*. Didapatkan *effective stress* terendah pada titik $2r/8$ pada area *hub*.

Penelitian ketiga oleh Milos Milosevic tentang analisis *residual stress* pada roda kereta selama proses *quenching* menggunakan *Finite Element Method*. Metode yang dilakukan ini menggunakan analisis *coupled thermal structural*. Roda kereta di bentuk melalui proses *casting* (dalam beberapa kasus melalui *forging*). Setelah dibentuk, roda kereta dipanaskan untuk mendapatkan kekerasan tertentu dan dipanaskan kembali untuk menghilangkan *residual stress* yang tidak diinginkan yang masih ada setelah proses pembentukan. Perlakuan panas pada roda adalah langkah yang penting dalam proses manufaktur karena hal ini memberikan roda sifat mekanik yang memadai. Sifat material bergantung pada laju pendinginan.



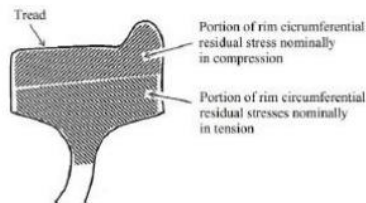
Gambar 2. 39 Peralatan pendinginan roda

Tujuan dari *heat treatment* adalah untuk menyamaratakan struktur mikro pada rim pada arah *radial* dan *axial*. Setelah perlakuan panas selesai, *rim* ini di dinginkan dengan semprotan air pada permukaan *tread*. Proses pendinginan roda kereta ini meningkatkan kekuatan, meningkatkan ketahanan aus dan menginduksi *residual stress* yang diinginkan. Setelah proses pendinginan, roda ditempatkan di dalam tungku panas selama 2 sampai 5 jam. Selama fasa ini terdapat *tension* diantara bagian

terluar *rim* yang lebih dingin, dan bagian dalam *rim* yang lebih panas. Proses panas ini menghasilkan *compressive residual stress* yang menguntungkan pada *rim* roda. *Stress* ini berkontribusi terhadap pencegahan terbentuknya retak *rim* pada roda. Fase-fase proses perlakuan panas dijabarkan pada tabel 2.5.

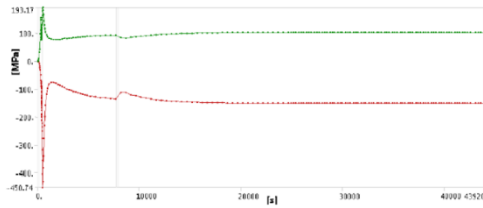
Tabel 2. 5 Fase *Heat treatment*

Phase	Process	Duration	Film coefficient [$W\ mm^{-2}\ C^{-1}$]		Bulk temperature °C
			Tread	Other	
1	Pre-quench	2 min	2.837×10^{-5}	2.837×10^{-5}	Ambient temperature
2	Quench	4 min	0.001766	2.837×10^{-5}	Ambient temperature
3	Pre-reheat	2 min	2.837×10^{-5}	2.837×10^{-5}	Ambient temperature
4	Reheat	2 hr	2.837×10^{-5}	2.837×10^{-5}	510
5	Cooling	10 h	2.837×10^{-5}	2.837×10^{-5}	Ambient temperature

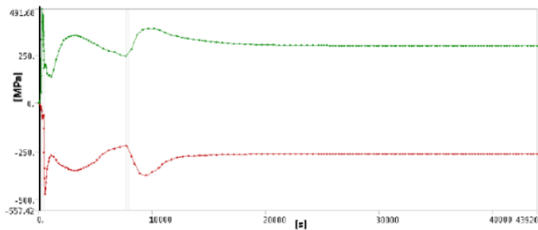


Gambar 2. 40 *Radial residual stress* pada *rim* setelah proses pendinginan tapak

Sejarah tegangan normal-waktu dari seluruh proses *heat treatment* roda kereta diperlihatkan untuk tegangan normal maksimal dan minimal dalam arah *radial* dan aksial di awal analisis dan selama proses pendinginan, pemanasan ulang, dan pendinginan. Pada diagram, tegangan tekan diindikasikan sebagai negatif, sedangkan tegangan tarik dengan nilai positif.

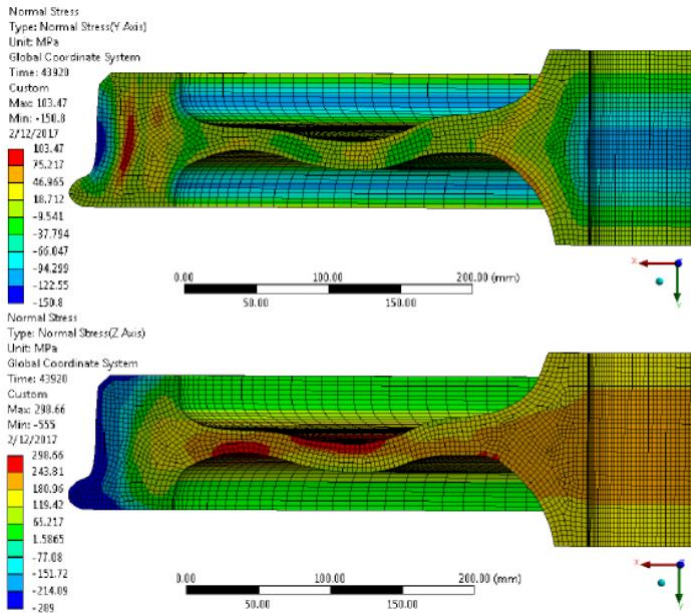


Gambar 2. 41 Tegangan tekan dan tarik maksimum roda kereta di arah axial.



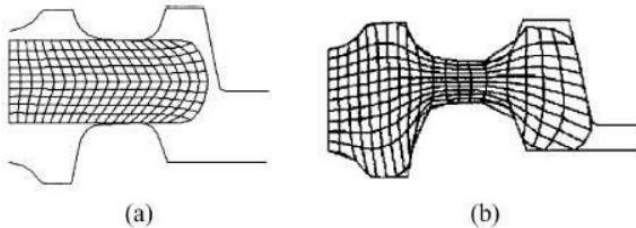
Gambar 2. 42 Tegangan tekan dan tarik maksimum roda kereta dalam arah radial.

Distribusi tegangan normal pada arah *radial* dan axial dari hasil proses perlakuan panas pada roda dapat dilihat pada Gambar dibawah. Hasil untuk arah axial ditunjukkan oleh axis Y sedangkan untuk arah *radial* oleh axis Z. Berdasarkan Gambar 2.44 dapat dilihat bahwa tegangan sisa axial di area *rim* secara nominal adalah *tension* mencapai 103 MPa, sedangkan tegangan sisa axial secara nominal adalah *compression* di permukaan *tread* sebesar -150 MPa. Pada Gambar 2.44 juga dapat dilihat bahwa tegangan sisa *radial* secara nominal adalah *tension* pada area *rim* antara 65 sampai 119 MPa, sedangkan tegangan sisa *radial* secara nominal adalah *compression* pada permukaan *tread* sebesar -289 MPa.



Gambar 2. 43 Tegangan *radial* dan aksial roda kereta setelah pendinginan

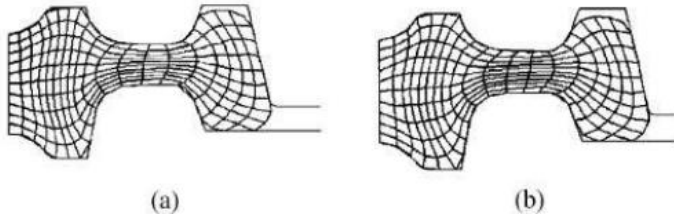
Penelitian keempat oleh K. Davey, dkk. dengan judul *Efficient Strategies for The Simulation of Railway Wheel Forming*. Penelitian ini menggunakan metode penelitian axysymmetric dengan *software* DEFORM 2D. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui bagaimana strategi *meshing* yang efektif untuk menjalankan simulasi *forging* roda kereta.



Gambar 2. 44 Kondisi saat proses *forging* (a) awal (b) akhir.

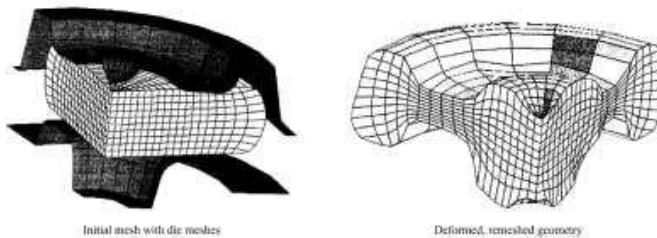
Meshing yang terstruktur akan menghasilkan matriks dengan struktur yang dapat dieksploitasi untuk mendapatkan penyelesaian yang efektif. Penelitian ini membahas tentang metode perbaikan *meshing* untuk menghasilkan *meshing* yang terstruktur dan proses pembuatan roda kereta pada tahap *forging*, karena pada tahap ini tingkat distorsi dari *mesh* lebih besar dibandingkan dengan tahapan lainnya. Tahap pertama penelitian ini adalah dengan menggunakan 190 elemen *mesh* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.44 (a). Pada tahap pertama ini, simulasi dibagi menjadi 100 kali peningkatan deformasi dan tidak ada perbaikan *mesh* ataupun perbaikan posisi *boundary node*. Selanjutnya dilakukan *meshing* ulang dengan menggunakan beberapa metode yaitu *elliptical functions*, *modified function*, *algebraic functions*, dan Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) *formulation*.

Tanpa perbaikan *mesh*, simulasi mengalami kegagalan pada proses kenaikan *forging* ke43. Hal tersebut dikarenakan nilai determinan yang negative pada matriks Jacobian. Dengan perbaikan *meshing* didapatkan hasil bahwa metode *elliptical function* saja yang memberikan hasil akhir deformasi yang baik. Selain itu perbaikan posisi *boundary node* dapat dilakukan dengan metode *least square positioning* dan *univariate interpolation positioning*. Hasil dari perbaikan posisi *boundary node* ditunjukkan pada Gambar 2.45. Pada Gambar 2.46 terlihat bahwa hasil dari kedua metode tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan. Walaupun begitu, metode *least square positioning* lebih banyak digunakan karena lebih efektif dalam mempertahankan volume benda kerja.



Gambar 2. 45 Perbandingan antara penggunaan metode (a) *least square positioning*, (b) *univariate interpolation positioning*

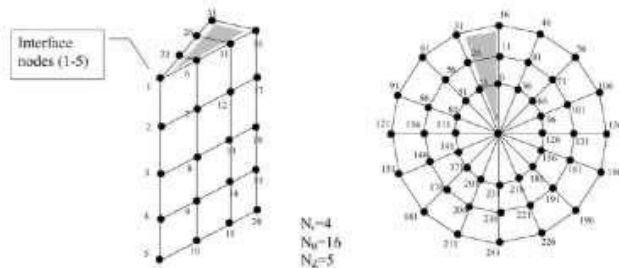
Kelebihan dari melakukan perbaikan *mesh* daripada melakukan pengaturan posisi *boundary node* adalah bisa menggunakan jumlah elemen yang lebih banyak pada area yang kritis. Dengan menggunakan perbaikan elemen ini juga dapat mempercepat solusi daripada menggunakan *mesh* bawaan yang ada pada *software* DEFORM. Sementara itu, pada penelitian ini dilakukan beberapa pengujian dari perbaikan *mesh* dengan model 3D yang menggunakan metode peletakan ulang *nodes* secara otomatis pada bidang radial. Hasil dari *mesh* kondisi awal dan akhir terdapat pada Gambar 2.46.



Gambar 2. 46 Penggunaan metode perbaikan *mesh* pada model 3D

Pendekatan seperti itu dapat digunakan pada beberapa analisis yang menganggap eksentrisitas yang terjadi sangatlah kecil dan dapat diabaikan. Akan tetapi, cukup sulit untuk menggunakan

metode pendekatan dengan bidang *radial* secara praktis. Landasan penelitian ini untuk melakukan pendekatan dengan melihat metode yang ada untuk menyelesaikan sistem linier. Terdapat 2 macam metode untuk menyelesaikan sistem linier, dan yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode langsung atau *direct method*. Pendekatan dengan melakukan metode langsung itu ditunjukkan dengan Gambar 2.47.



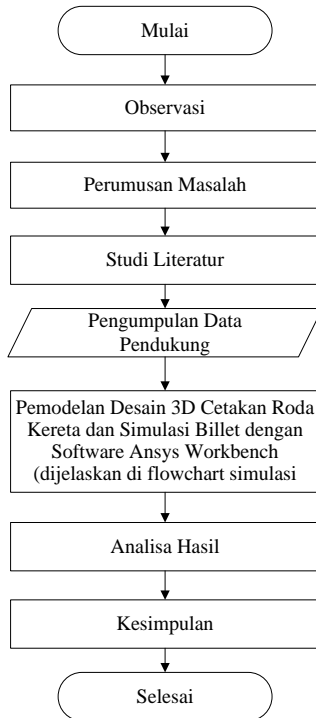
Gambar 2. 47 Contoh penerapan *mesh* pada model 3D 360° dengan titik tengah sebagai kumpulan antarmuka

Penggunaan *mesh* seperti pada Gambar 2.47 mungkin tidak dapat digunakan untuk berbagai model geometri 3D. Akan tetapi, pemodelan seperti itu dapat digunakan untuk merepresentasikan geometri benda kerja dalam simulasi pembuatan roda kereta. (Davey et al., 2001).

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Diagram Alir Penelitian

Flowchart penelitian ditunjukkan pada Gambar 3.1



Gambar 3. 1 *Flowchart* penelitian

3.2. Studi Literatur

Langkah pertama pada penelitian ini adalah studi literatur. Studi literatur bertujuan untuk menemukan variabel – variabel yang akan di teliti, menemukan makna dan *hubungan* antara variabel dan mendalami landasan teori yang akan digunakan pada

penelitian ini. Studi literatur dimulai dari mencari jurnal penelitian sebelumnya atau yang berkaitan dengan topik yang sejenis, yaitu mengenai *forging* roda kereta. Studi literatur kemudian dilanjutkan dengan mempelajari textbook mengenai *forging*, *Dynamic Behavior of Materials*, *Mechanical Properties*, *Residual stress*, *strain rate*, *Software* elemen hingga dan sebagainya.

3.3. Perancangan

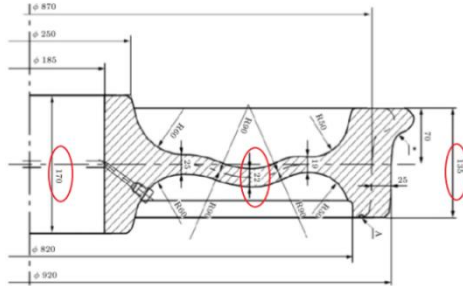
Pada proses perancangan ini meliputi dua tahap, yaitu tahap pencarian data pendukung dan tahap pemodelan roda kereta. Tahap pencarian data dimulai dari dimensi roda kereta melalui jurnal – jurnal tentang roda kereta, lalu menentukan data yang sesuai sebagai input dalam simulasi. Tahap selanjutnya adalah memodelkan dimensi roda kereta yang sudah ditentukan dengan program *Computer – Aided Design* dimana peneliti menggunakan pemodelan 3D *Solidwork*. Dari dimensi roda kereta yang telah dimodelkan dapat dimodelkan pula *die forging* atau *dies*.

3.3.1. Penentuan Data Awal

Berikut adalah penjelasan mengenai tahapan perancangan dan data yang dibutuhkan untuk menunjang perancangan.

Data awal berupa dimensi roda kereta yang ingin dibentuk, *material properties* dan beban penakan. Dimensi roda kereta dapat dilihat pada Gambar 3.3. Meterial yang digunakan dalam perancangan adalah AISI 4340 dengan sifat mekanik pada tabel 3.1.

a. Dimensi Roda kereta



Gambar 3. 2 Geometri potongan menyilang roda kereta
(sumber: *Scientia Iranica*, 2017)

b. *Material properties*

Dengan mengacu pada Standar ASM Metal Handbook Vol 01 *Properties and Selection Irons, Steels, and High – Performance Alloys*, material roda kereta api adalah baja karbon medium. Material yang menjadi pilihan untuk pembuatan roda kereta api yaitu AISI 4340 dan *Mangan Steel Hadfield*. Tetapi AISI 4340 adalah material yang paling cocok untuk pembuatan roda kereta api (Fauzan, 2018).

Tabel 3. 1 Material Properties AISI 4340 *Alloy Steel* (Azom, 2012)

<i>Mechanical Properties</i>	Metric (MPa)
<i>Tensile Strength</i>	745
<i>Yield Strength</i>	470
<i>Modulus of Elasticity</i>	210×10^3
<i>Poissons Ratio</i>	0,30
<i>Shear Modulus</i>	80×10^3
<i>Hardness, Brinell</i>	217

c. Johnson Cook AISI 4340

Tabel 3. 2 Paramater Johnson Cook AISI 4340 (Mayer, 1994).

Material	Description				Constitutive Constants for				
	Hardness (Rockwell)	Density (kg/m ³)	Specific Heat (J/kg K)	Melting Temperature (K)	σ_0 (MPa)	B (MPa)	n	C	m
OFHC copper	F-30	8960	383	1356	90	292	0.31	0.025	1.09
Cartridge brass	F-67	8520	385	1189	112	505	0.42	0.009	1.68
Nickel 200	F-79	8900	446	1726	163	648	0.33	0.006	1.44
Armco iron	F-72	7890	452	1811	175	380	0.32	0.060	0.55
Carpenter electrical iron	F-83	7890	452	1811	290	339	0.40	0.055	0.55
1006 steel	F-94	7890	452	1811	350	275	0.36	0.022	1.00
2024-T351 aluminum	B-75	2770	875	775	265	426	0.34	0.015	1.00
7050 aluminum	D-26	2770	875	877	337	343	0.41	0.010	1.00
4340 steel	C-30	7830	477	1793	792	510	0.26	0.014	1.03
S-7 tool steel	C-30	7730	477	1763	1359	477	0.18	0.012	1.00
Tungsten alloy (.07Ni, .03Fe)	C-47	17000	134	1723	1506	177	0.12	0.016	1.00
Depleted uranium-0.75% Ti	C-45	18600	117	1473	1079	1120	0.25	0.007	1.00

Source: From Johnson and Cook [4], p. 4.

d. Ketebalan *Billet*, Kecepatan Pembebanan dan Besar Pembebanan

- Dalam menentukan ketebalan *billet*, penulis menentukan sendiri berdasarkan jurnal padang sudah ada pada dasar teori *dies* yang sudah di desain. Kemudian didapatkan *thickness* (71 - 75) mm dengan radius 440mm sebagai variasi simulasi.
- Kemudian selain dari dua parameter diatas, besar pembebanan juga mempengaruhi kesesuaian bentuk *bille* terhadap *dies*. Oleh karena itu variasi pembebanan berdasarkan jurnal pada dasar teori adalah (130 - 170) MN. Dari data diatas didapat parameter *forging* sebagai berikut.

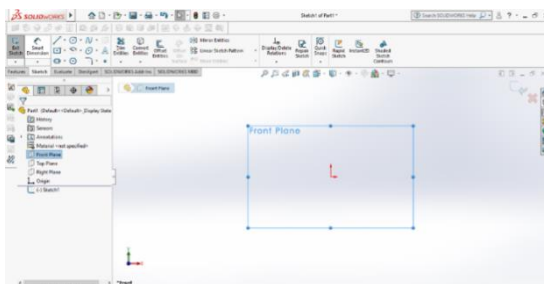
Tabel 3. 3 Parameter *Forging*

Variabel	Ketebalan (mm)	Force (MN)	
		<i>Pre-from</i>	<i>Final forging</i>
Variasi	71	240	130
	72		140
	73		150
	74		160
	75		170

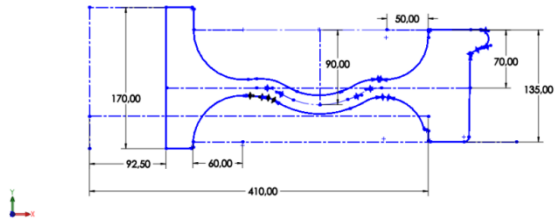
3.3.2. Proses Desain

Proses desain tidak dilakukan dengan dua tahap. Tahap pertama dilakukan perancangan menggunakan *Solidwork* untuk memudahkan peneliti dalam mendesain bentuk yang rumit. Kemudian *file* dari hasil desain pertama di *import* ke dalam *software ANSYS*. Berikut langkah – langkah dalam mendesai perancangan *forging*.

- a. Dibuka halaman baru dalam bentuk part dan dipilih *plane* untuk membuat *sketch* baru seperti yang ditunjukkan Gambar 3.3.

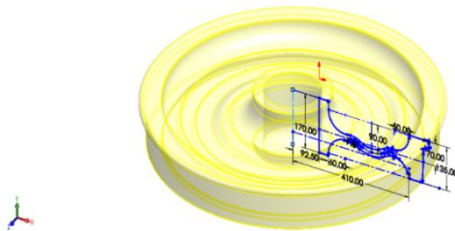
Gambar 3. 3 Halaman kerja baru pada *Solidworks*.

- b. Dibuat *sketch* sesuai data awal seperti yang ditunjukkan Gambar 3.5.



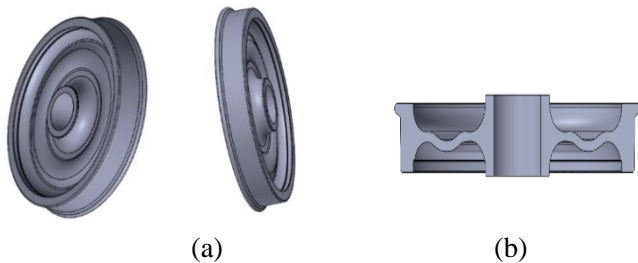
Gambar 3. 4 *Sketch* roda

- c. *Revolve sketch* roda untuk membuat daging benda seperti yang ditunjukkan Gambar berikut.



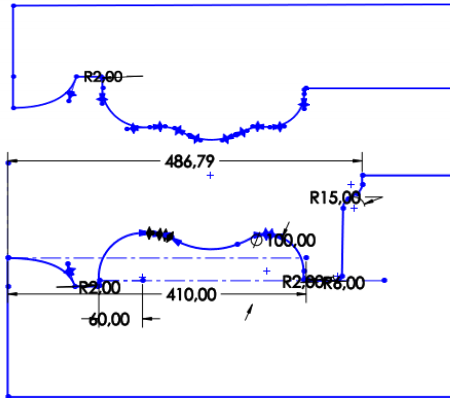
Gambar 3. 5 *Sketch* roda kereta

- d. Desain roda yang diinginkan seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 3.7.



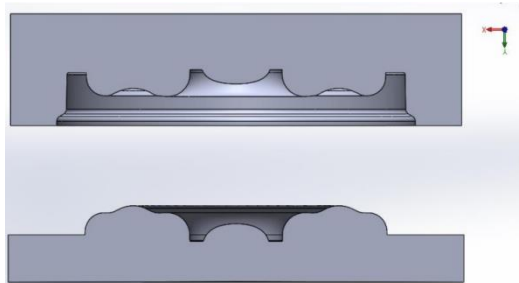
Gambar 3. 6 (a) Pemodelan 3D roda kereta. (b) Pemodelan 3D penampang melintang roda kereta.

- e. *Dies upper dan lower di desain* untuk menambah daging pada bagian atas dan bawah pada *sketch* roda, kemudian *sketch* roda dibagi menjadi dua pada bagian tengah, seperti yang ditunjukkan gambar 3.8.



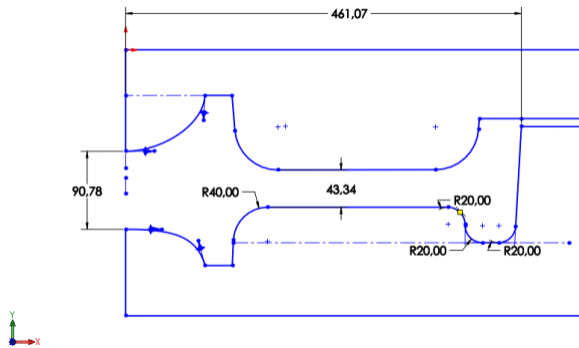
Gambar 3. 7 *Sketch final forging*

- f. *Revolve sketch* cetakan roda untuk dibuat daging benda dengan dipilih axis pada garis Y

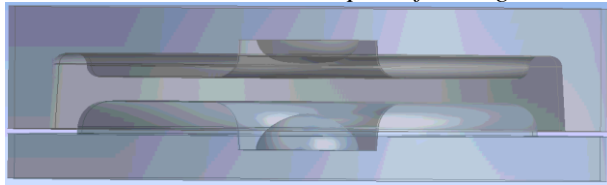


Gambar 3. 8 *Dies final forging*

Kemudian karena simulasi ini menggunakan dua step yaitu *pre - forming* dan *final forging*, maka dibuat juga *dies pre- forming* seperti yang ditunjukkan Gambar 3.9 dan Gambar 3.10 berikut.



Gambar 3. 9 *Sketch pre - forming*

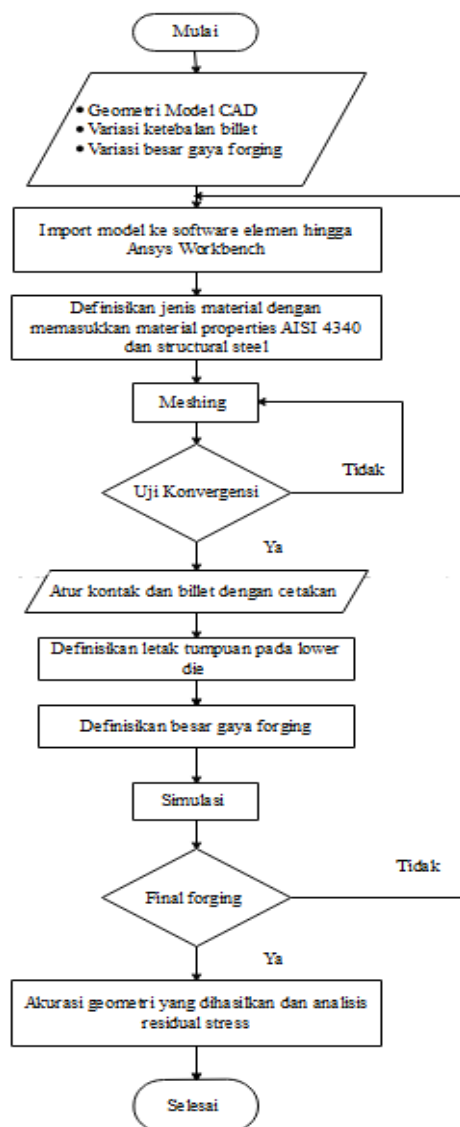


Gambar 3. 10 *Dies pre - forming*

Desain yang telah dibuat di *Solidworks* disimpan dengan format .igs agar dapat di *import* pada program *Ansys*.

3.4. Simulasi

Tahap selanjutnya adalah tahap simulasi, pada tahap ini bertujuan untuk membuat simulasi pemodelan proses *forging* roda kereta dengan menggunakan *Ansys Workbench 19.2*. Proses *forging* dalam simulasi ini adalah dengan memberikan pembebanan pada *upper die* sehingga menumbuk material awal *billet* dan terjadi proses pembentukan akhir. Berikut adalah diagram alir dari proses simulasi.

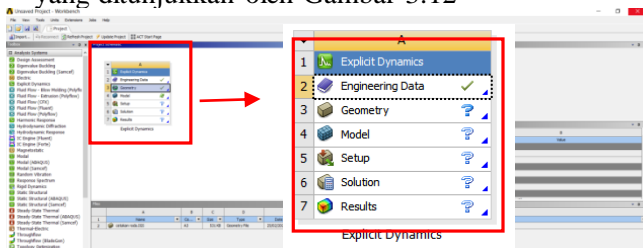
Gambar 3. 11 *Flowchart* simulasi

3.4.1. Pre – Forming

Pada penelitian ini, simulasi yang dilakukan menggunakan *software* elemen hingga yaitu *Ansys Workbench 19.2* Sub program *Explicit Dynamics*. Namun sebelum simulasi harus dilakukan *set up* pada *design modeler* agar simulasi berjalan lancar. Karena pada proses *forging* dilakukan dua step yaitu *pre – forming* dan *final forging*. Maka *set up* yang pertama adalah *pre – forming* sebagai berikut:

a. Engineering Data didefinisikan

Setelah membuka *file ANSYS Workbench 19.2* yang terdapat pada folder *Ansys*, kemudian klik kiri dua kali pada *explicit dynamic*, maka akan muncul Gambar seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 3.12



Tampilan awal dari *explicit dynamic* pada ANSYS

Kemudian edit *engineering data* untuk memilih material yang akan di simulasikan, material yang digunakan pada *dies* adalah *structural steel Non Linear*. Sedangkan pada *billet* menggunakan *AISI 4340*. Langkah selanjutnya adalah *Johnson cook strength* dan *EOS linear* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.13.

The image displays two screenshots of the SolidWorks software interface, showing the material properties for STEEL 4340 and Structural Steel. The interface is divided into a tree view on the left and a properties table on the right.

Properties of Outline Row 4: Structural Steel

Property	Value	Unit
Density	7850	kg m ⁻³
Isotropic Elasticity		
Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio	
Young's Modulus	2E+05	MPa
Poisson's Ratio	0,3	
Bulk Modulus	1,6667E+11	Pa
Shear Modulus	7,6923E+10	Pa
Specific Heat, C _p	434	J kg ⁻¹ C ⁻¹

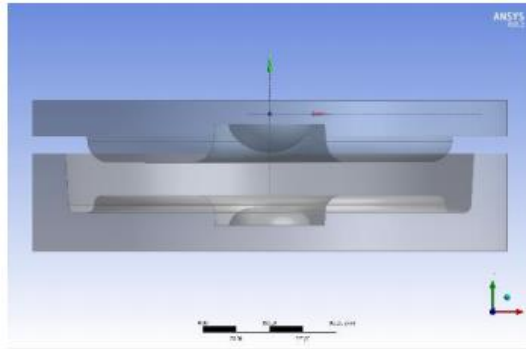
Properties of Outline Row 3: STEEL 4340

Property	Value	Unit
Density	7,83	g cm ⁻³
Specific Heat, C _p	477	J kg ⁻¹ C ⁻¹
Johnson Cook Strength		
Strain Rate Correction	First-Order	
Initial Yield Stress	792	MPa
Hardening Constant	5,20	MPa
Hardening Exponent	0,26	
Strain Rate Constant	0,014	
Thermal Softening Exponent	1,03	
Melting Temperature	1519,9	C
Reference Strain Rate (sec)	1	
Bulk Modulus	1,59E+05	MPa
Shear Modulus	83800	MPa

Gambar 3. 12 *Material properties* pada engineering data untuk *dies* dan *billet*

b. *Import Geometri Dies*

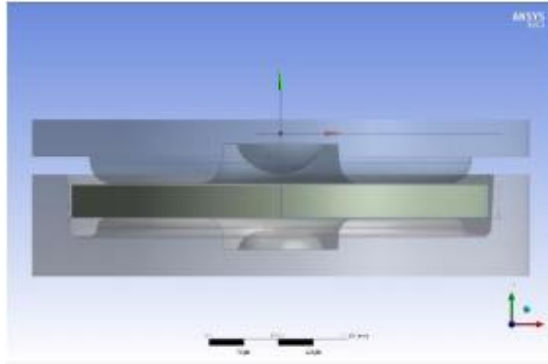
Langkah berikutnya yaitu memasukkan geometri *dies* yang telah diGambar di *Soliworks*, kemudian di *import* ke *Workbench* dengan cara klik kanan pada kolom geometri lalu pilih *import*. *File* di *import* dengan format *.IGS* seperti tampilan seperti yang ditunjukkan Gambar 3.14.



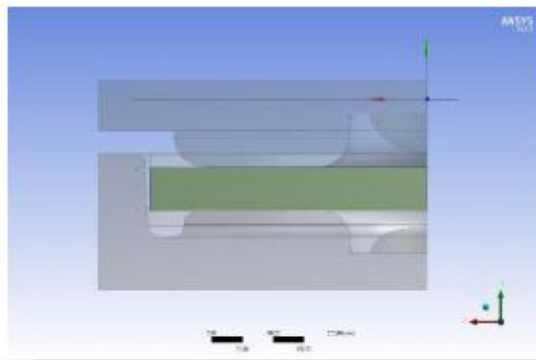
Gambar 3. 13 *Import geometri pada Ansys Design Modeller*

c. Desain billet

Billet di desain di *modeller* pada program *Ansys Workbench 19.2* Tujuannya yaitu untuk memudahkan desain mengubah variasi ketebalan *billet* dan menyesuaikan dengan jarak antar *dies* yang akan disimulasikan. Untuk mempercepat simulasi jarak *billet upper die* sangat kecil, hal ini dilakukan agar proses simulasi tidak membutuhkan waktu dan menghemat memori penyimpanan pada komputer. Langkah selanjutnya setelah *import geometry* yaitu *billet* dapat di *sketching* menggunakan *rectangle* dengan ukuran diameter 430 mm dan tebal 90 lalu di *revolve* (Gambar 3.15). Kemudian di *design modeller* dapat membuat potongan menyilang dengan fitur *symetri* untuk memudahkan analisa *filling billet* pada *dies* dengan cara klik *tools* dan pilih *symetri*, *setting* dengan *xy* dan *yz* plan lalu *generate* seperti Gambar 3.16



Gambar 3. 14 Desain *billet*

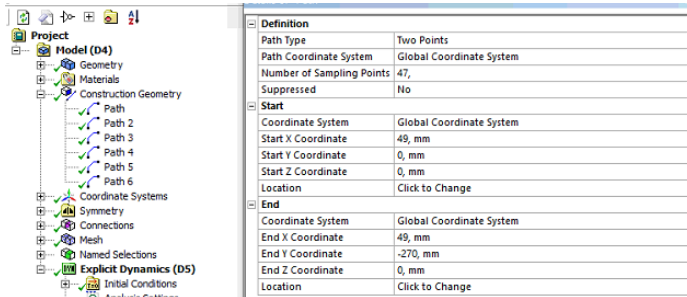


Gambar 3. 15 Desain *billet* full dan *symetry*

d. *Contruction Geometry*

Contruction geometry di gunakan untuk *path* geometri padat. Objek diposisikan oleh system koordinat yang dibuat peneliti sehingga dapat mengetahui nilai *residual stress* yang ingin diamati oleh peneliti, *Paths* dibuat dengan cara klik kanan *contruction geometry* lalu pilih *path* kemudian tentukan bagian atau koordinat yang ingin di amati seperti data pada tabel 3.4 dibawah. Analisa yang akan dilakukan menggunakan *contruction geometry*

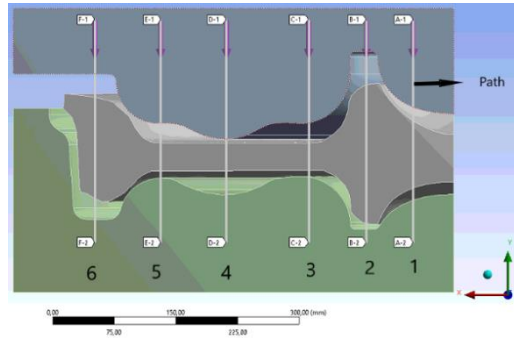
memiliki kelebihan dapat melihat tegangan pada kedalaman suatu geometri. Namun kekurangannya adalah pembacaan tegangan yang sensitive dimana apabila letak *path* digeser sedikit saja maka tegangan yang terbaca akan berbeda.



Gambar 3. 16 Paths pada *construction geometry*

Tabel 3. 4 Nilai *Path* pada Setiap Variasi Ketebalan

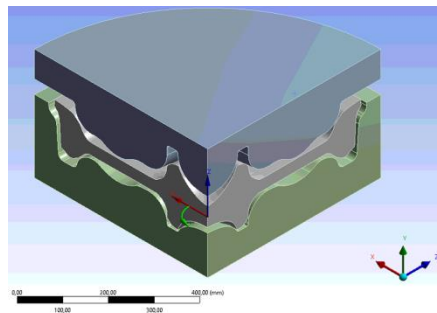
PATH	KETEBALAN (mm)				
	71	72	73	74	75
Path 1	49	49	50	50	51
Path 2	106	106	107	107	108
Path 3	176	176	177	177	178
Path 4	276	276	277	277	278
Path 5	356	356	357	357	358
Path 6	436	436	437	437	438



Gambar 3. 17 *Path* pada *billet*

e. ***Coordinate System***

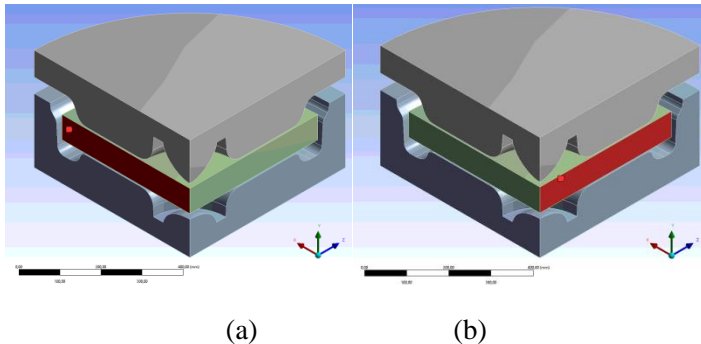
Selain *global coordinate system* dengan sumbu Cartesian yaitu x , y dan z . Dibuat juga *local coordinate system* dengan sumbu *cylindrical* untuk mengubah arah menjadi radial, tangensial/*circumferential* dan axial. Dimana sumbu *radial*(x) adalah sumbu yang sejajar dengan jari-jari roda, sumbu *circumferential* (y) adalah sumbu melingkar terhadap titik pusat roda, dan sumbu axial (z) adalah sumbu yang searah dengan pembebanan *forging*. Sumbu *cylindrical* akan digunakan untuk menganalisa *residual stress*.



Gambar 3. 18 *Cylindrical coordinate system*

f. *Symmetric Region*

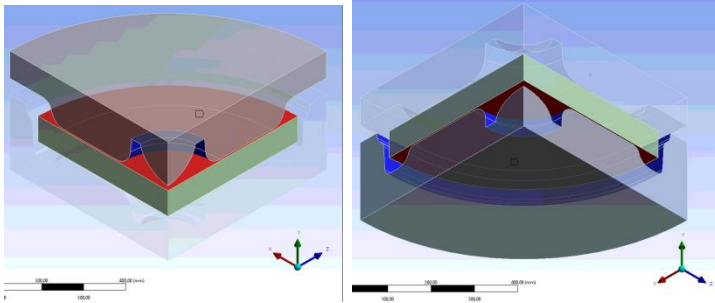
Symmetric region diatur di *mechanical region*. Dibuat perpotongan kondisi batas *symmetric region plane XY* searah sumbu Z dan *plane ZY* searah sumbu X. Kondisi batas ini diberikan supaya model memiliki perlakuan seperti model penuh. Sisi perpotongan *symetry region* seperti Gambar 3.17 berikut.



Gambar 3. 19 (a). *Symmetric region* bidang XY (b). *Symmetric region* bidang ZY

g. Jenis Kontak Ditentukan

Set up selanjutnya dilakukan di *mechanical modeller*. Menentukan kontak yang digunakan yang terjadi antara 2 permukaan yaitu *billet* dengan *dies* yang berupa tumbukan. Jenis kontak yang digunakan adalah *frictional* dengan *friction coefficient* 0,05 dan *dynamic coefficient* 0,01. Langkahnya yaitu klik kanan *connections* pilih *manual contac region* pada menu insert. Kemudian *apply contact* berupa *face billet* dan target berupa *face dies* yang menyentuh *billet* dan isi nilai *coefficient* seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 3.21 dan 3.22.



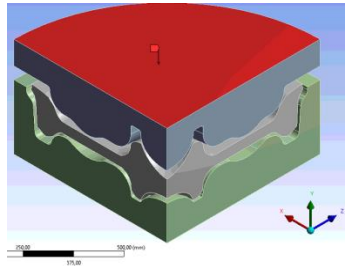
Gambar 3. 20 Penentuan jenis kontak

Details of "Frictional - Solid Body 1 To Solid"	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Contact	1 Face
Target	14 Faces
Contact Bodies	Solid Body 1
Target Bodies	Solid
Protected	No
Definition	
Type	Frictional
<input type="checkbox"/> Friction Coefficient	5,e-002
<input type="checkbox"/> Dynamic Coefficient	1,e-002
<input type="checkbox"/> Decay Constant	2,
Scope Mode	Manual
Behavior	Program Controlled
Trim Contact	Program Controlled
Suppressed	No

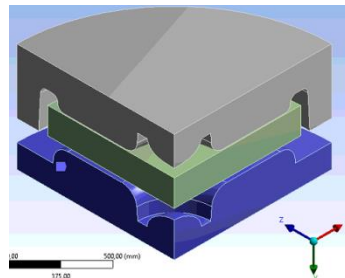
Gambar 3. 21 Nilai *coefficient* pada simulasi

h. Letak Pembebanan dan Letak Tumpuan Ditentukan

Karna terjadinya tumbukan pada proses menempaan antara *upper die* dengan *billet*. Dimana *upper die* adalah komponen yang bergerak ke bawah dengan kecepatan tertentu sehingga menempa *billet*. Kemudian *billet* yang tertempa akan menumbuk dan mengisi rongga pada *lower die* yang mana sebagai dudukan *billet* dengan *type fixed support*. Langkahnya yaitu klik kanan *initial condition*, *input body upper die pada geometry*, *define by components*.



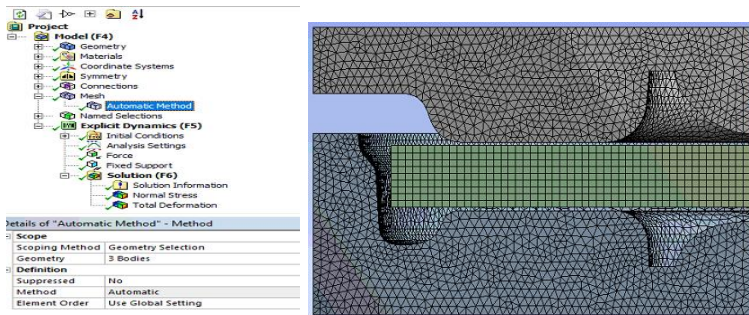
Gambar 3. 22 Penentuan letak Pembebanan



Gambar 3. 23 Penentuan letak tumpuan

i. Proses Meshing

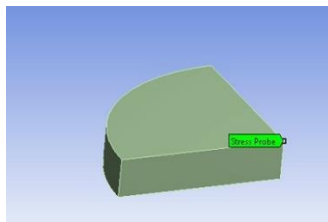
Sebelum dilakukan *meshing*, lakukan *setting* metode *meshing* dengan cara klik kanan *mesh* pada *worksheet*, pilih insert dan klik *method*, lalu *selection geometry* dan *apply*. Kemudian pilih metode *meshing* dengan *automatic method* dan *geometry selection* pilih *all bodies* seperti Gambar 3.21. Selain itu, masih memerlukan *setting* pada *element size* karena semakin banyak *elemen size* maka hasil yang didapat semakin mendekati nilai real. Kemudian klik submenu *update mesh* yang ada pada toolbar.



Gambar 3. 24 Meshing pada simulasi

j. Uji Konvergensi

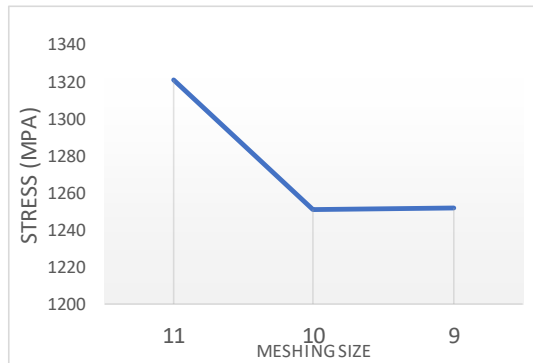
Uji konvergensi pada analisa menggunakan metode elemen hingga bertujuan untuk mendapatkan hasil yang akurat pada jumlah elemen tertentu. Semakin tinggi jumlah elemen yang digunakan, maka hasil yang didapatkan akan semakin akurat. Jika jumlah elemen yang digunakan terlalu tinggi, waktu yang diperlukan untuk menyelesaikan simulasi juga semakin lama. Maka dari itu uji konvergensi juga digunakan untuk memilih jumlah elemen paling sedikit yang hasilnya tetap akurat. Uji konvergensi dilakukan dengan cara membuat grafik hubungan antara *elemen size* dengan besar tegangan hasil simulasi model. Pada uji konvergensi *geometry selection* berupa *probe* atau *vertex* sehingga ketika elemen berubah posisi probe tetap. Jadi yang di amati adalah tegangan pada probe seperti Gambar 3.22 berikut.



Gambar 3. 25 Meshing pada probe

Tabel 3. 5 Hasil Uji Konvergensi

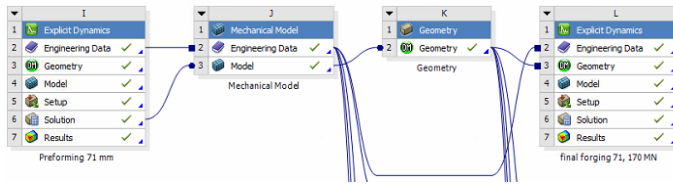
UJI KONVERGEN				
Mesh Size (mm)	Stress Probe (Mpa)	Billet		
		Quality	Nodes	Element
11	1320,6	0,98328674	11940	10170
10	1251,2	0,983173033	14160	12114
9	1251,9	0,98168782	19646	17060



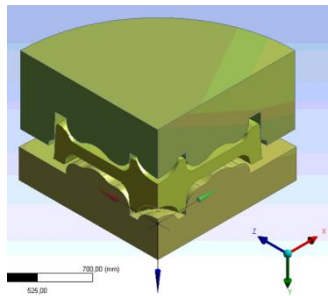
Gambar 3. 26 Hasil uji konvergensi

3.4.2. Proses *Final Forging*

Setelah menemukan ukuran *meshing* dan *billet* yang dibentuk sesuai dengan cetakan *pre – forming* selanjutnya adalah proses *final forging*. Hasil *billet* simulasi *pre – forming* dan *die final foring* di *import* ke *explicit dynamic* yang baru seperti Gambar 3.24. Kemudian melakukan *set up* seperti awal lagi yaitu pendefinisian kontak, *symmetric region*, beban, tumpuan, *velocity*, dan *meshing*.



Gambar 3. 27 alur proses *export*



Gambar 3. 28 Die *final forging* dan *billet* hasil *pre – forming*

Setelah melakukan *export* hasil simulasi dan hasil simulasi *final forging* terlihat seperti Gambar 3.26, maka dilihat nilai *normal stress* pada *output solver* langkahnya dengan klik *solve* pada *toolbar* setelah itu memilih hasil apa yang diinginkan.



Gambar 3. 29 Penentuan *output* simulasi

3.4.3. Ukur Dimensi

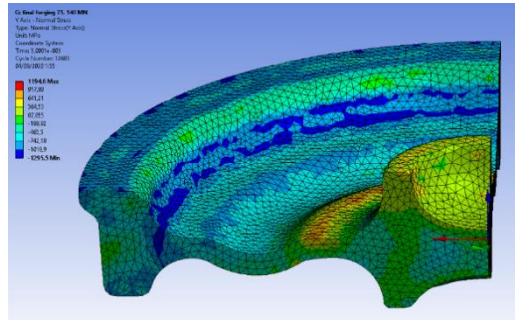
Setelah melakukan proses *final forging*. Total deformasi yang terjadi pada saat beban ditiadakan di *export* dengan format .stl lalu *import* ke *Solidwork* untuk mengetahui ketebalan dari bagian roda kereta hasil simulasi seperti pada Gambar 3.28. Ketebalan yang di analisa yaitu pada bagian *hub*, *web* dan *rim*.

3.5. Analisis Hasil

Dari simulasi yang telah dilakukan untuk roda kereta berkecepatan rendah dengan *software Ansys*. Pada penelitian ini akan diamati bagaimana akurasi dari geomtri roda kereta berkecepatan rendah yang dihasilkan dengan tujuan untuk menganalisis seberapa deformasi plastis yang terjadi atau menganalisis deformasi yang terjadi pada *billet* sepenuhnya plastis atau masih ada yang elastis sehingga adanya *spring back* dan menyebabkan dimensi roda kereta yang dihasilkan tidak sesuai dengan yang di rencanakan atau tidak sesuai dengan cetakan. Pengamatan terhadap geometri roda kereta yang dihasilkan dilakukan pada bagian *hub*, *web* dan rim seperti Gambar 3.2. Selain itu dapat diketahui *residual stress* pada roda kereta hasil *forging*. Dimana dari *residual stress* yang dihasilkan akan dilakukan analisis arah *residual stress* dapat dimanfaatkan atau dalam arah yang merugikan. Apabila arah *residual stress* roda kereta pada hasil *forging* berlawanan dengan arah pembebanan saat operasional, maka residual stress tersebut dapat dimanfaatkan untuk menambah kekuatan pada roda kereta. Namun apabila arah *residual stress* yang dihasilkan searah dengan pembebanan pada saat operasional, maka *residual stress* tersebut merugikan karena akan membuat tegangan pada roda semakin tinggi pada saat operasional dan perlu dilakukannya *heat treatment* untuk mengurangi atau menghilangkan *residual stress* pada roda kereta.

Analisa *residual stress* pada roda kereta akan diamati dalam arah normal pada sumbu X, sumbu Y, dan sumbu Z, dimana tegangan dalam arah sumbu X merupakan tegangan pada arah lateral atau *radial* dari roda, tegangan pada arah sumbu Y

merupakan tegangan pada arah tangensial atau *circumferential*, dan tegangan pada arah sumbu Z merupakan tegangan pada arah axial dari roda seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.31 dan pengamatan pada ketiga arah menggunakan 6 titik yang berada paa *billet* seperti Gambar 3.17 diatas.



Gambar 3. 30 Pengamatan *residual stress* pada arah radial, *circumferential* dan axial

3.6. Kesimpulan

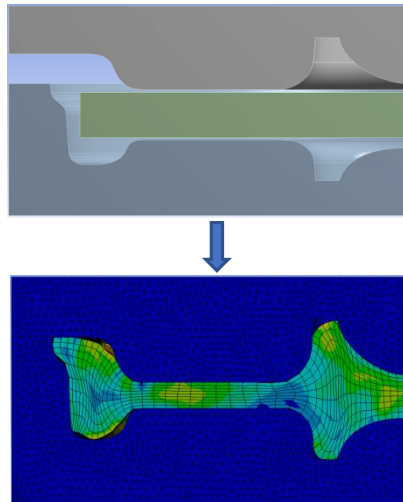
Dari hasil penelitian yang telah dilakukan dibuat kesimpulan. Kesimpulan berupa pembahasan hasil yang menjawab rumusan masalah dan tujuan penelitian. Dari kesimpulan penelitian di harapkan dapat menjadi literatur dan referensi untuk penelitian serupa.

(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)

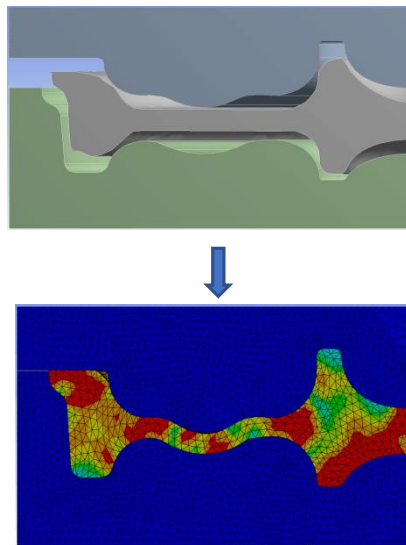
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada tugas akhir ini, telah dilakukan simulasi menggunakan *Finite Element Analysis* dengan *software Ansys Workbench Explicit Dynamic*. Simulasi yang pertama adalah simulasi *pre-forming* (Gambar 4.1) dengan variasi ketebalan (71mm, 72mm, 73mm, 74mm, dan 75mm) dan pembebanan 240MN. Kemudian *billet* hasil *pre-forming* di *export* untuk digunakan pada simulasi *final forging* (Gambar 4.2) dengan variasi pembebanan 130MN, 140MN, 150MN, 160MN, dan 170MN. Dari simulasi yang sudah dilakukan didapatkan bentuk *billet final forging* dan nilai *residual stress* yang timbul akibat proses *forging* tersebut. Data yang dihasilkan berupa grafik dan tabel.

Analisis dilakukan berdasarkan pengamatan terhadap *billet* hasil *forging* saat kondisi setelah pembebanan dihilangkan agar dapat dipastikan bahwa sifat elastis suatu material yang di simulasikan sangat kecil sehingga yang tersisa bentuk akhir roda kereta dalam kondisi plastis (permanen). Dengan cara menghilangkan pembebanan analisis *residual stress* akan lebih valid yang sesuai dengan teori pada bab 2 yaitu tegangan yang tinggal pada suatu material yang dikenai beban lalu ketika pembebanan di hilangkan. Perlu diketahui bahwa pada grafik gaya yang dihasilkan, nilai positif pada *residual stress* bersifat *tension* dan nilai negatif bersifat *compress*. Dimana semakin positif nilai *residual stress* maka semakin bersifat *tension* dan semakin negative nilai *residual stress* maka semakin *compression*.



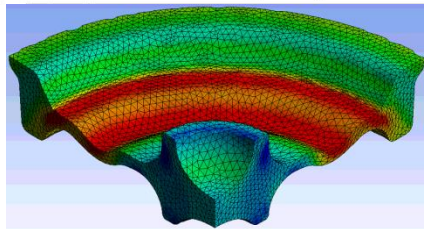
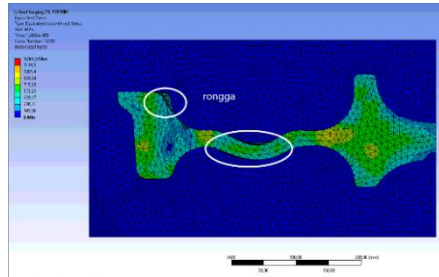
Gambar 4. 1 Skema proses *pre-forming*



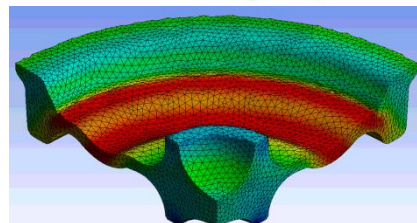
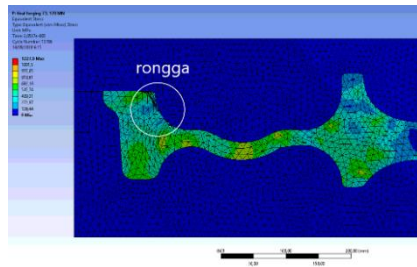
Gambar 4. 2 Skema proses *final forging*

4.1. Analisis *Billet Hasil Forging*

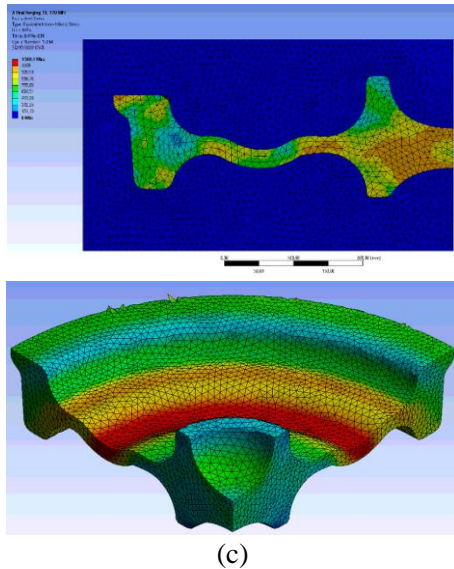
4.1.1. Pengaruh Ketebalan Terhadap Hasil *Forging*



(a)



(b)



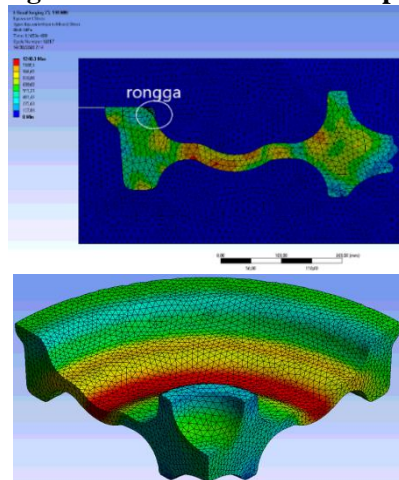
Gambar 4. 3 Pengaruh ketebalan hasil *forging* (a) 71mm (b) 73mm (c) 75mm dengan beban 170MN.

Gambar 4.3 menunjukkan pengaruh ketebalan *billet* hasil *forging*. Ketebalan 71mm (Gambar 4.3a), 73mm (Gambar 4.3b) dan 75mm (Gambar 4.3c) dengan beban 170MN saat *upper die* telah mencapai *stroke* maksimum yang berarti *upper die* kontak dengan *lower die*. Dimana 71mm adalah ketebalan *billet* minimum dan 75mm adalah ketebalan *billet* maksimum. Berdasarkan Gambar 4.3a pada ketebalan 71mm terlihat rongga atau kekosongan pada ruang cetakan yang ditunjukkan oleh lingkaran putih diatas, kekosongan tersebut terjadi pada bagian *rim* dan *web*. Kemudian pada ketebalan 73mm kekosongan juga terjadi di daerah *rim* saja. Sedangkan pada ketebalan 75mm hampir seluruh ruang cetakan telah terisi penuh. Namun terdapat sedikit bagian *rim* yang belum terisi.

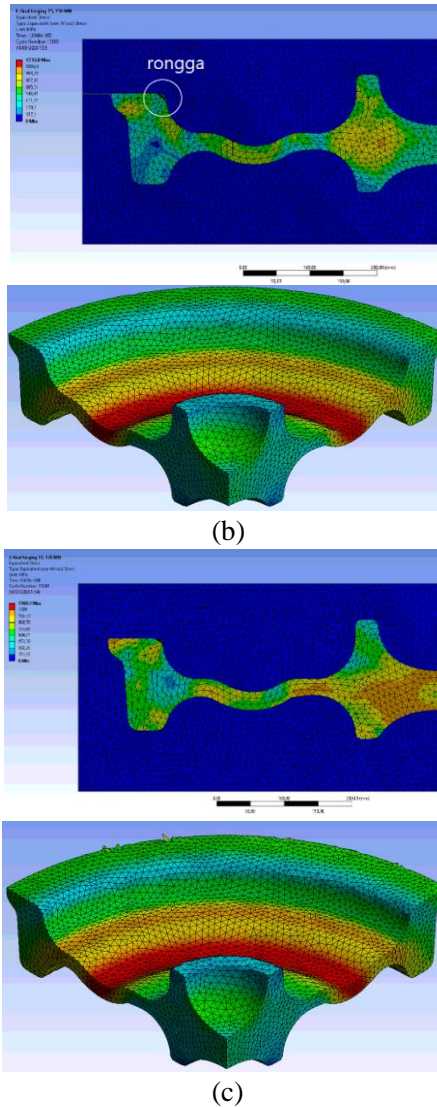
Kekosongan yang terjadi merupakan cacat bentuk. Berdasarkan dasar teori kekosongan atau kekurangan pengisian ruang cetakan disebabkan oleh beberapa hal antara lain desain *dies*,

volume material *billet* dan energy pembentuk atau pembebanan. Desain cetakan atau *dies* serta profil penampang yang akan berpengaruh terhadap laju deformasi material terutama pada tahap *pre-forming*. Tahap *pre-forming* merupakan tahap penting dalam proses *forging* yang bertujuan untuk mendistribusikan material awal sehingga pada saat proses *final forging* material dapat mengisi ruang cetakan dengan sempurna secara bersamaan karena bagian roda begitu kompleks dan memiliki ketebalan yang berbeda pada *hub*, *web* dan *rim*. Kemudian volume material *billet* juga berpengaruh terhadap hasil *forging* karena proses *forging* memerlukan parameter yang berupa diameter dan ketebalan *billet* awal minimal yang harus dipenuhi untuk mencapai produk akhir yang diinginkan.

4.1.2. Pengaruh Pembebanan Terhadap Hasil *Forging*



(a)



Gambar 4. 4 Hasil *forging* variasi pembebanan (a) 130MN (b) 150MN (c) 170MN dengan ketebalan 75mm.

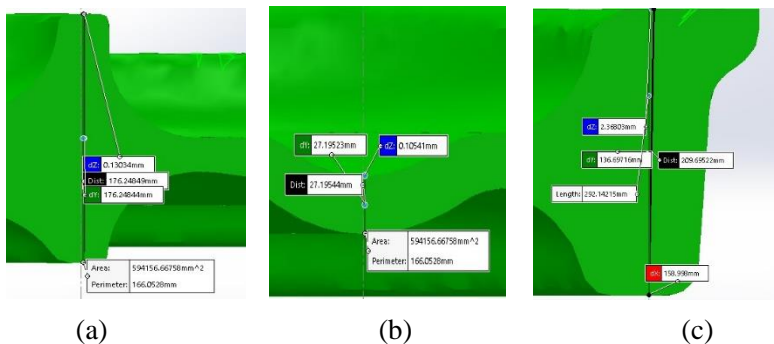
Gambar 4.4 menunjukkan pengaruh beban terhadap hasil *forging*. Pembebanan 130MN (Gambar 4.4a), 150MN (Gambar 4.4b) dan 170MN (Gambar 4.4c) dengan ketebalan 75mm saat *upper die* telah mencapai *stroke* maksimum yang berarti *upper die* kontak dengan *lower die*. Dimana 130MN adalah pembebanan minimum dan 170MN adalah pembebanan maksimum. Berdasarkan Gambar 4.4a pada pembebanan 130MN terlihat rongga atau kekosongan pada ruang cetakan yang ditunjukkan oleh lingkaran putih diatas. Dimana kekosongan tersebut terjadi pada bagian *rim* saja, dan untuk bagian *web* dan *hub* sudah terisi penuh. Kemudian untuk pembebanan 150MN terdapat kekosongan juga dibagian *rim* namun kekosongan yang terjadi lebih kecil dari proses *forging* dengan pembebanan 130MN. Sedangkan pada pembebanan 170MN hampir seluruh ruang cetakan telah terisi penuh.

Kekosongan yang terjadi merupakan cacat bentuk. Berdasarkan dasar teori kekosongan atau kekurangan pengisian ruang cetakan disebabkan oleh beberapa hal antara lain desain *dies*, volume material *billet* dan energy pembentuk atau pembebanan. Desain cetakan atau *dies* serta profil penampang yang akan berpengaruh terhadap laju deformasi material terutama pada tahap *pre-forming*. Tahap *pre-forming* merupakan tahap penting dalam proses *forging* yang bertujuan untuk mendistribusikan material awal sehingga pada saat proses *final forging* material dapat mengisi ruang cetakan dengan sempurna secara bersamaan karena bagian roda kereta begitu kompleks dan memiliki ketebalan yang berbeda pada *hub*, *web* dan *rim*. Kemudian faktor energi pembentukan untuk mendeformasi material *billet* secara optimal atau bahkan cenderung berlebih sehingga berakibat memperpendek umur *dies* karena energy pembentukan atau pembebanan berlebih tersebut di transfer ke cetakan sehingga cetakan akan mengalami kegagalan atau cacat. Oleh karena itu harus dipilih besar pembebanan yang

tepat agar material dapat terdistribusi merata dan tidak membuat cetakan cepat rusak.

4.2. Verifikasi Dimensi *Billet Hasil Forging*

Untuk verifikasi dimensi, peneliti membandingkan ketebalan pada 3 bagian inti dari *billet* hasil *forging*, yakni *hub*, *web*, dan *rim* dengan ketebalan cetakan yang digunakan. Pengamatan ketebalan dilakukan dengan cara mengekspor menggunakan *software* Solidworks dengan cara mengekspor *billet* hasil *forging* yang terdeformasi ke *software* Solidworks. Kemudian pengukuran dilakukan dengan fitur *measure* pada *toolbar evaluate* antara jarak garis pada elemen satu dengan garis pada elemen lainnya dan akan muncul garis lurus vertikal yang menunjukkan dimensi dari ketebalan. Contoh hasil pengukuran diilustrasikan pada Gambar 4. 5. Pengukuran yang digunakan adalah dY karena merepresentasikan jarak lurus vertical antara dua garis yang ingin diketahui. Dimensi yang telah diukur ditabelkan pada tabel 4.1 adalah hasil *forging* dengan variasi ketebalan saat pembebanan 170MN.



Gambar 4. 5 Pengukuran ketebalan hasil *forging* pada a) *Hub* b) *Web* c) *Rim*

Tabel 4. 1 Ketebalan Cetakan Roda dan Hasil *Forging*.

Tebal (mm)	Gaya (MN)	Dimensi Forging (mm)			Dimensi Cetakan (mm)			Error (%)		
		Hub	Web	Rim	Hub	Web	Rim	Hub	Web	Rim
71	130	174,7	25,5	130,3	173,8	26,3	135	0,5	3,2	3,5
	140	174,8	24,4	129,2				0,6	7,0	4,3
	150	174,6	23,7	131,5				0,5	10,0	2,6
	160	174,8	22,7	132,4				0,6	13,8	2,0
	170	174,8	22,3	133,1				0,6	15,4	1,4
72	130	175,1	25,5	132,8				0,7	3,1	1,6
	140	174,9	24,6	133,2				0,6	6,5	1,3
	150	174,8	23,9	133,7				0,6	9,3	1,0
	160	174,6	23,2	134,3				0,5	12,0	0,5
	170	174,3	22,7	134,7				0,3	13,7	0,2
73	130	176,7	27,5	132,2				1,6	4,5	2,1
	140	176,1	27,2	132,7				1,3	3,2	1,7
	150	174,4	26,9	133,0				0,4	2,2	1,5
	160	175,1	26,7	134,0				0,7	1,4	0,7
	170	174,7	26,6	134,4				0,5	1,0	0,4
74	130	177,8	29,5	131,4				2,3	12,2	2,6
	140	176,3	29,1	132,4				1,5	10,8	1,9
	150	177,4	28,7	133,1				2,1	9,2	1,4
	160	177,2	28,4	134,1				1,9	7,8	0,7
	170	176,6	27,5	134,7				1,6	4,6	0,2
75	130	177,2	27,5	136,8	2,0	4,4	1,3			
	140	177,1	27,4	136,8	1,9	4,2	1,3			
	150	176,9	27,3	136,8	1,8	4,0	1,3			
	160	176,7	27,4	136,8	1,7	4,1	1,3			
	170	176,2	27,3	136,6	1,4	3,8	1,2			

Berdasarkan tabel 4.1, bahwa hasil *forging* dengan variasi ketebalan. Bagian *hub* sudah terisi penuh bahkan melebihi ukuran cetakan roda pada bagian *hub*. Untuk bagian *web* pada ketebalan 71mm dan 72mm belum sepenuhnya mengisi ruang cetakan karena hasil pengukuran *billet* hasil *forging* lebih kecil daripada ukuran roda bagian *web*. Sedangkan pada ketebalan 73mm hingga 75mm didapatkan dimensi yang melebihi ukuran cetakan roda pada bagian *web* hal ini diakibatkan oleh beban yang semakin besar dan mendistribusikan material *web* ke arah *rim* atau *hub*. Kemudian untuk bagian *rim* pada ketebalan 71mm hingga 74mm belum terisi

sempurna karena didapatkan ukuran *billet* hasil *forging* lebih kecil daripada cetakan bagian *rim*. Sedangkan pada 75mm sudah mengisi dan bahkan melebihi dimensi cetakan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.4b.

Selain itu pada tabel 4.1 didapat bahwa dengan menggunakan gaya yang lebih besar, error yang dihasilkan pada bagian *rim* cenderung menurun. Berarti ketebalan pada bagian *rim* mendekati dimensi ketebalan yang diinginkan. Hal ini berbanding lurus dengan hipotesis awal yaitu semakin besar gaya *forging* yang digunakan, maka semakin kuat penekanan pada *billet* sehingga material yang berada pada bagian *web* terdistribusi menuju bagian *rim* dan *hub*. Oleh karena itu perlu ditetapkan besar pembebanan yang mampu mendorong material untuk mengisi rongga cetakan dengan sempurna. Berdasarkan tabel 4.1 bahwa rancangan proses *forging* yang tepat berdasarkan parameter ketebalan adalah dengan menggunakan ketebalan *billet* awal sebesar 75mm, diameter 440mm, dan gaya *forging* sebesar 130MN hingga 170MN. Hal ini dikarenakan berdasarkan hasil pengukuran dimensi ketebalan pada bagian roda dibawah 75mm tidak memenuhi ruang cetakan pada bagian *rim*. Namun perlu mempertimbangkan hasil pengisian pada *billet* terhadap rongga cetakan dan memodifikasi geometri dari cetakan agar proses deformasi material terdistribusi secara sempurna.

Ketidak tepatan dimensi hasil pengukuran roda kereta disebabkan oleh beberapa faktor. Faktor pertama adalah tidak terisinya rongga cetakan secara sempurna yang disebabkan oleh *billet* yang disimulasikan terlalu tebal atau diameter *billet* terlalu besar, sehingga beberapa bagian dari *billet* menghalangi jalannya cetakan untuk melakukan proses *forging* atau penekanan secara maksimal. Faktor kedua adalah adanya fenomena *spring back* dari material roda kereta. Hal ini sesuai dengan prinsip *residual stress*, dimana pada saat pembebanan pada suatu benda kerja dihilangkan, maka perilaku tegangan terhadap regangan akan bergerak

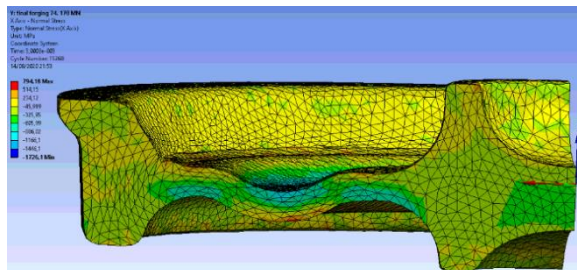
mendekati titik semula atau hampir nol. Faktor lainnya adalah pengukuran dimensi tidak pada garis yang sama persis dengan peletekan *path* sehingga dimensi yang dihasilkan sedikit berbeda.

Kemudian selain dari analisis *billet hasil forging*, pembahasan selanjutnya mengenai *residual stress* yang terdapat pada roda hasil *forging*.

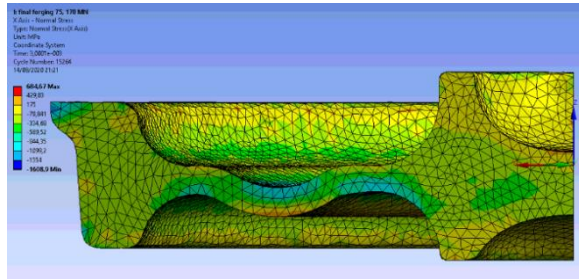
4.3. Pengaruh Ketebalan *Billet* terhadap *Residual Stress*

Penentuan ketebalan awal *billet* bertujuan untuk mendapatkan geometri hasil *forging* yang sesuai dengan yang direncanakan kemudian perlu mempertimbangkan ketebalan *billet* awal untuk mendapatkan parameter selain ketepatan dimensi ketebalan *billet* dimana parameter tersebut adalah residual stress yang ada pada roda hasil *forging*. Residual stress yang dihasilkan akan mempengaruhi kinerja roda pada saat operasional terutama pada kekuatan dan ketahanan terhadap *fatigue life* pada saat operasional. Oleh karena itu berikut adalah analisis pengaruh ketebalan *billet* terhadap residual stress pada arah radial, *circumferential*, dan axial.

4.3.1. Pada Arah *Radial*



Gambar 4. 6 *Radial residual stress* dengan tebal *billet* 74mm

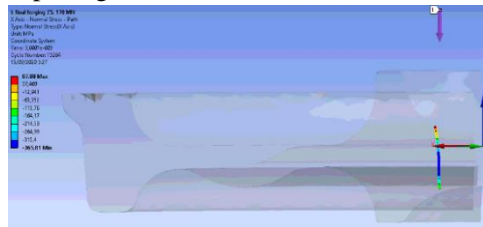


Gambar 4. 7 Radial residual stress dengan tebal billet 75mm

Gambar 4.6 dan 4.7 adalah distribusi *radial residual stress* pada hasil *forging* ketebalan 74 mm dan 75mm dengan gaya *forging* 170MN. Dari hasil *forging* menunjukkan bahwa pada roda kereta terdapat beberapa bagian yang memiliki *residual stress* yang bersifat tarik atau *tension* baik pada bagian *hub*, *web*, dan *rim*. Oleh karena itu perlu dilakukannya *heat treatment* untuk menghilangkan *residual stress* yang bersifat tarik pada arah *radial* agar meningkatkan kekuatan roda dan meningkatkan ketahanan pada saat operasional. Dimana arah *radial* pada roda kereta saat operasional adalah ketika roda menerima beban statis dan pada saat roda kereta memutar (keretanya berjalan). Berdasarkan hasil *forging* diatas, bagian *hub*, *web* tengah dan *rim*, merupakan bagian kritis dengan nilai *residual stress* sebesar 794,18Mpa pada ketebalan 74mm dan 684, 67Mpa pada ketebalan 75mm bersifat tarik atau *tension*. Maka dari itu perlu untuk dilakukannya pengamatan setelah proses *heat treatment*.

Selain *residual stress* yang bersifat tarik, pada hasil *forging* diatas juga terdapat *residual stress* yang bersifat tekan atau *compressive*. Bagian yang didominasi oleh *residual stress* bersifat tekan adalah bagian *web* dan *rim*. Dimana *residual stress* yang bersifat tekan ini akan mencegah terjadinya *crack* dan meningkatkan ketahanan terhadap *fatigue* pada saat operasional. Berdasarkan hasil *forging* diatas didapatkan nilai maksimal *compressive residual stress* sebesar -1726,1Mpa pada ketebalan

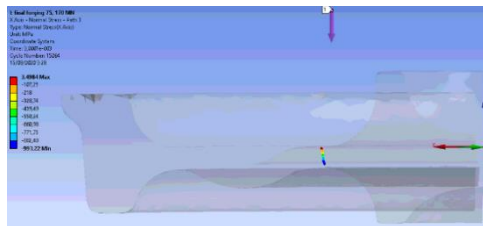
74mm dan $-1608,9\text{Mpa}$ pada ketebalan 75mm. Maka dari itu perlu dilakukannya pengamatan tentang pengaruh ketebalan awal *billet* terhadap terbentuknya *residual stress* yang bersifat tekan atau *compressive*. Pengamatan tersebut dilakukan pada 5 lokasi pengamatan seperti gambar 4.8 berikut.



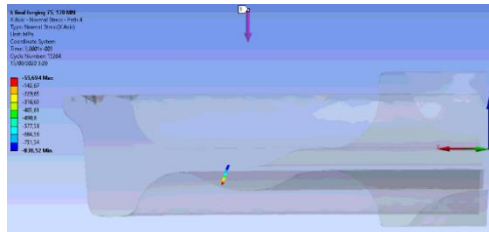
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Gambar 4. 8 Lokasi pengamatan *path* 1 hingga *path* 6 arah radial

Lokasi pengamatan *path* 1 mewakili daerah sebelum *hub*, *path* 2 mewakili *hub*, *path* 3 mewakili daerah penghubung antara *hub* dan *web*, *path* 4 mewakili bagian tengah *web*, *path* 5 mewakili daerah penghubung antara *web* dan *rim*, dan *path* 6 mewakili *rim*. Gambar 4.8 adalah hasil *final forging* dengan ketebalan *billet* awal 75mm dan pembebanan 170MN. Berdasarkan Gambar 4.8 didapatkan nilai *compressive residual stress* maksimum pada *path* 1 sebesar -365,81Mpa, pada *path* 2 sebesar -274,68Mpa, pada *path* 3 sebesar -993,22Mpa, pada *path* 4 sebesar -838,52 Mpa, pada *path*

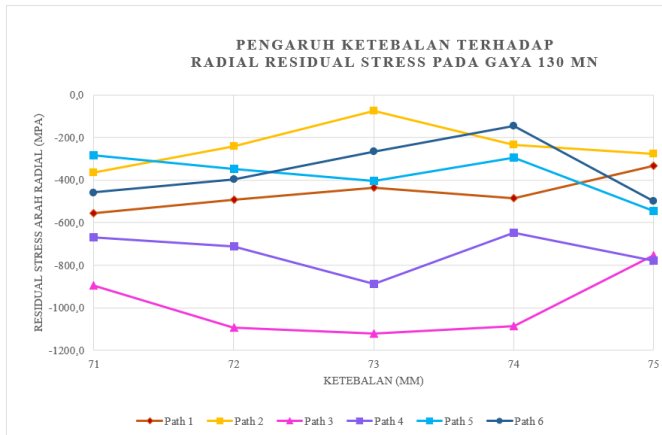
5 sebesar -388,91Mpa dan *path* 6 sebesar -335,43Mpa. Dimana nilai *residual stress* terbesar adalah nilai yang semakin negative karena semakin bersifat tekan atau *compressive*. Berikut adalah tabel hasil analisis *radial residual stress* pada setiap variasi ketebalan yang digunakan.

Tabel 4. 2 Nilai *Radial Residual Stress* pada Variasi Ketebalan

Gaya (MN)	Ketebalan (mm)	Nilai Radial Residual Stress (Mpa)					
		Path 1	Path 2	Path 3	Path 4	Path 5	Path 6
130	71	-557,5	-366,0	-896,8	-669,3	-282,9	-459,2
	72	-494,1	-241,6	-1094,8	-711,4	-348,3	-396,6
	73	-437,0	-74,4	-1122,5	-888,4	-403,5	-267,9
	74	-486,3	-233,7	-1087,1	-646,3	-293,7	-144,9
	75	-333,3	-278,5	-753,2	-777,6	-544,4	-498,8
140	71	-373,2	-338,8	-620,2	-356,5	-34,1	-425,3
	72	-566,0	-274,7	-958,8	-603,7	-331,4	-346,0
	73	-386,6	-322,2	1076,2	-659,2	-376,8	-213,2
	74	-467,6	-263,7	-909,9	-913,5	-412,2	-228,6
	75	-373,9	-235,1	-1024,7	-793,8	-442,0	-464,9
150	71	-507,1	-323,2	-889,0	-353,2	-274,2	-285,6
	72	-485,9	-256,1	-873,4	-409,1	-297,3	-347,5
	73	-379,6	-272,9	-918,0	546,8	-371,8	184,6
	74	-483,8	-325,1	-912,0	-760,5	-368,0	-187,5
	75	-240,2	-239,7	-727,8	-790,3	-524,7	-441,5
160	71	-405,6	-263,0	-806,3	-261,3	-240,8	-256,2
	72	-400,3	-186,7	-611,3	-491,1	-256,5	-266,9
	73	-300,7	-194,4	-924,6	-746,3	-402,8	-267,4
	74	-426,2	-298,6	-1016,1	-782,2	-511,7	-252,5
	75	-369,6	-291,3	-901,1	904,1	-485,6	-419,0
170	71	-446,0	-286,0	-865,1	-255,5	-296,2	-262,3
	72	-293,4	-185,0	-653,7	-406,7	-201,8	-216,7
	73	-190,4	-224,3	-665,5	-695,4	-389,8	-325,0
	74	-454,9	-192,1	-821,2	-683,5	-418,5	-202,0
	75	-365,8	-271,7	-993,2	-838,5	-388,9	-335,4

Tabel 4.2 merupakan nilai *residual stress* pada arah *radial* dari setiap variasi ketebalan yang digunakan. Kemudian dari tabel diatas akan didapatkan grafik hubungan antara ketebalan dan *residual stress* yang bertujuan untuk mengetahui pengaruh

ketebalan terhadap *radial residual stress*. Berikut adalah grafik berdasarkan tabel 4.2.



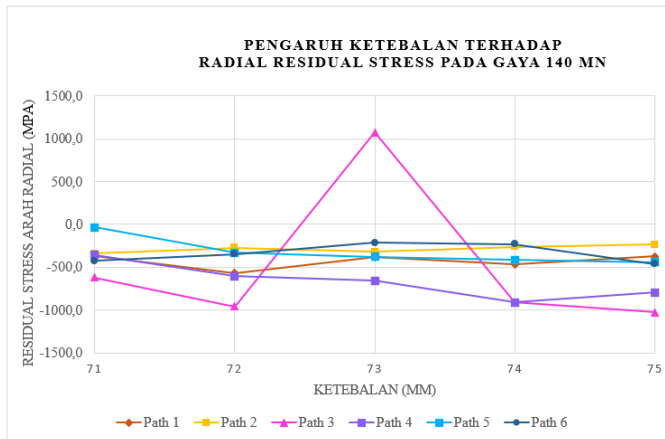
Gambar 4. 9 grafik pengaruh ketebalan terhadap *radial residual stress* gaya 130MN

Grafik 4.9 merupakan grafik hubungan antara pengaruh ketebalan terhadap *radial residual stress*. Dimana yang terlihat pada Gambar 4.9 grafik yang dihasilkan mengalami fluktuasi yang disebabkan oleh beberapa faktor antara lain faktor distorsi pada *mesh* atau elemen yang digunakan pada simulasi dan faktor berikutnya adalah keterbatasan cakupan pengamatan dengan *path*. Kemudian faktor lainnya adalah perbedaan geometri *billet* awal yang sangat signifikan setelah proses *pre-forming* dengan gaya yang sama dan ketebalan berbeda yang menyebabkan perbedaan pada proses diskritisasi *billet* tahap *final forging*. Analisis menggunakan *path* terbatas pada satu garis saja dan nilai yang didapat bergantung pada nilai *node* atau elemen terdekat yang dilalui oleh *path*. Namun kelebihan menggunakan *path* adalah analisis memberikan hasil yang spesifik.

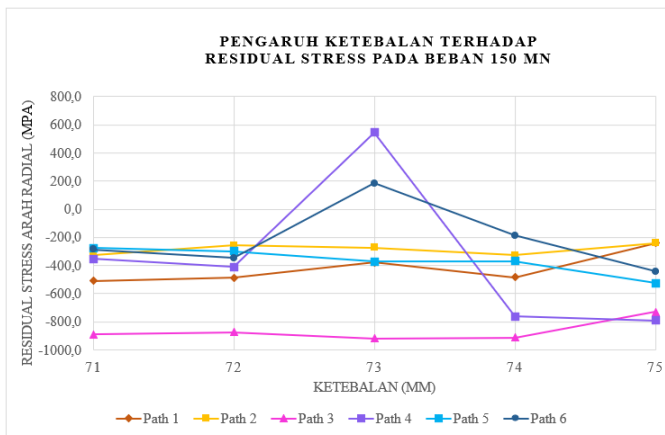
Dari hasil *forging* didapatkan bahwa pada *path 1*, *path 2* dan *path 6* memiliki *trandline residual stress* yang cenderung naik dari

ketebalan 71mm hingga ketebalan 73mm. Pada *path 3*, *path 4* dan *path 5* memiliki *trandline residual stress* turun dari ketebalan 71mm hingga ketebalan 73mm lalu naik kembali pada ketebalan 74mm. *Trandline* yang cenderung turun menunjukkan bahwa kenaikan nilai *residual stress* yang bersifat tekan pada arah radial.

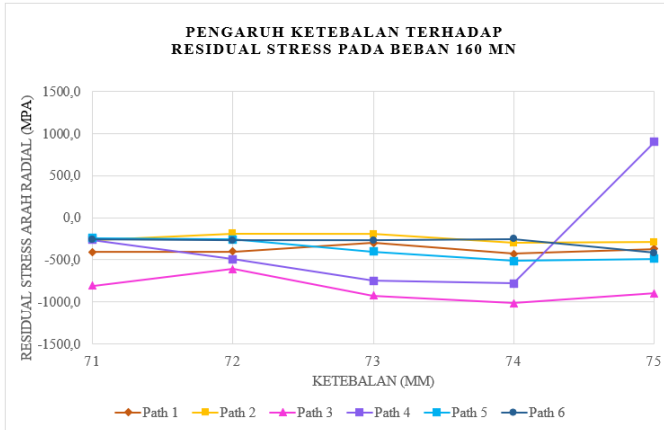
Berdasarkan grafik 4.9, jika dilihat dari naik turunnya *trandline radial residual stress* bagian roda kereta didapat bahwa semakin tebal *billet* maka bagian *hub* dan *rim* mengalami penurunan nilai *compressive radial residual stress* sedangkan bagian *web* semakin tebal *billet* maka mengalami peningkatan nilai *compressive radial residual stress*. Hal ini kurang sesuai dengan penjelasan pada distribusi *radial residual stress* yang ditunjukkan oleh Gambar 4.6 dan Gambar 4.7 dimana terdapat penurunan nilai *compressive residual stress* pada bagian *web* dari -1446,1MPa menjadi -1354MPa dan bagian *rim* dari -608,99MPa menjadi -334MPa. Sedangkan pada bagian *hub* yang terjadi bukan oenuruna melainkan peningkatan dari -325,95MPa menjadi -589,52MPa. Ketidak sesuaian ini terjadi karena yang ditinjau pada grafik adalah *path* dari ketebalan 71mm hingga ketebalan 75mm. Sedangkan pada distribusi residual stress yang ditinjau adalah seluruh body dari ketebalan 74mm hingga 75mm. Selain itu *trandline residual stress* yang naik pada *path 1*, *path 2* dan *path 6* juga sesuai dengan Gambar 4.6 dan Gambar 4.7, bahwa semakin tebal *billet* yang digunakan, maka semakin cenderung meningkat daerah distribusi *residual stress* yang bersifat tarik pada arah *radial* terutama pada bagian *hub* dan *rim* roda kereta.



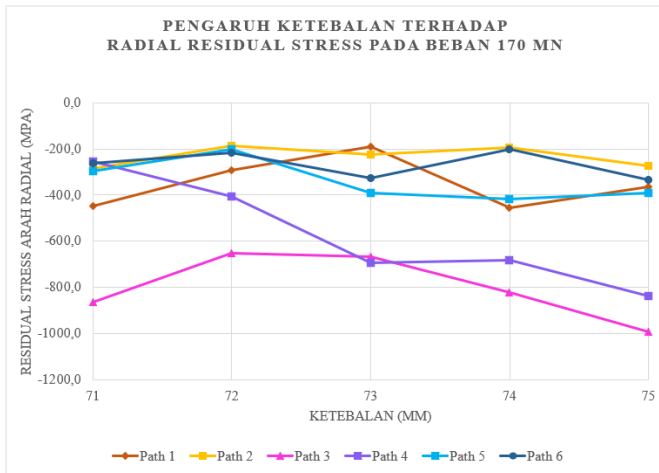
Gambar 4. 10 Grafik pengaruh ketebalan terhadap *radial residual stress* gaya 140MN



Gambar 4. 11 Grafik pengaruh ketebalan terhadap *radial residual stress* gaya 150MN

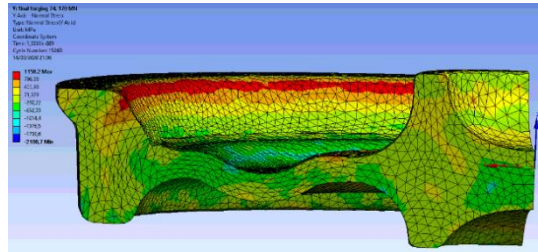


Gambar 4. 12 Grafik pengaruh ketebalan terhadap *radial residual stress* gaya 160 MN

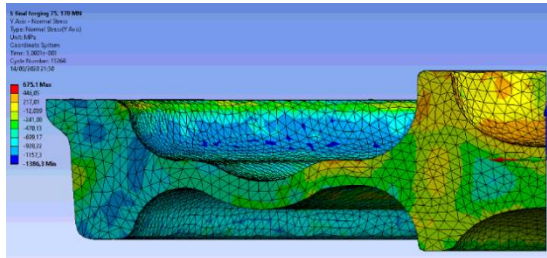


Gambar 4. 13 grafik pengaruh ketebalan terhadap *radial residual stress* gaya 170MN

4.3.2. Pada Arah *Circumferential*



Gambar 4. 14 *Circumferential residual stress* dengan tebal 74mm

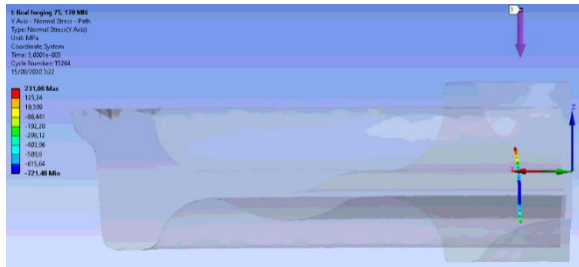


Gambar 4. 15 *Circumferential residual stress* dengan tebal 75mm

Gambar 4.14 dan 4.15 adalah distribusi *circumferential residual stress* pada hasil *forging* dengan ketebalan 74 mm dan 75mm dengan gaya *forging* 170MN. Dari hasil *forging* menunjukkan bahwa pada roda kereta terdapat beberapa bagian yang memiliki *residual stress* yang bersifat tarik atau *tension* baik pada bagian *hub*, *web*, dan *rim*. Oleh karena itu perlu dilakukannya *heat treatment* untuk menghilangkan *residual stress* yang bersifat tarik pada arah *circumferential* agar meningkatkan kekuatan roda dan meningkatkan ketahanan pada saat operasional. Dimana arah *circumferential* pada roda kereta saat opsersional adalah ketika roda menerima pembebanan. Berdasarkan hasil *forging* diatas, bagian *rim* dan *hub* merupakan bagian kritis dengan nilai *residual stress* sebesar 1158,2Mpa pada ketebalan 74mm dan 675,1Mpa pada ketebalan 75mm bersifat tarik atau *tension*. Dimana pada bagian

rim roda kereta merupakan bagian yang menjadi *concern* dalam pengamatan analisis *circumferential residual stress*. Maka dari itu perlu untuk dilakukannya pengamatan setelah proses *heat treatment*.

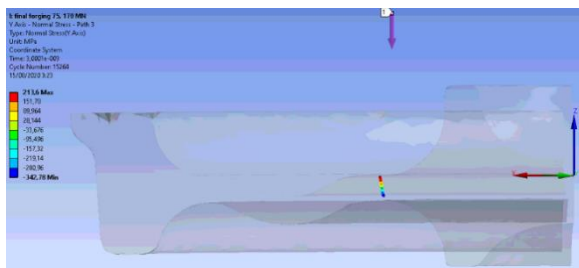
Selain *residual stress* yang bersifat tarik, pada hasil *forging* diatas juga terdapat *residual stress* yang bersifat tekan atau *compressive*. Bagian yang didominasi oleh *residual stress* bersifat tekan adalah bagian *web* dan *rim*. Dimana *residual stress* yang bersifat tekan ini akan mencegah terjadinya *crack* dan meningkatkan ketahanan terhadap *fatigue* pada saat operasional. Berdasarkan hasil *forging* diatas didapatkan nilai maksimal *compressive residual stress* sebesar -2180,7Mpa pada ketebalan 74mm dan -1386,3Mpa pada ketebalan 75mm. Kemudian perlu diperhatikan bahwa pada bagian *rim* ketebalan 74mm mengalami penurunan nilai *compressive residual stress* dan sebaliknya pada ketebalan 75mm mengalami kenaikan nilai *compressive residual stress*, ini berarti bahwa terdapat peningkatan nilai *compressive residual stress* searah dengan peningkatan ketebalan awal *billet*. Maka dari itu perlu dilakukannya pengamatan tentang pengaruh ketebalan awal *billet* terhadap terbentuknya *residual stress* yang bersifat tekan atau *compressive*. Hal ini dikarenakan *circumferential residual stress* memiliki pengaruh yang lebih signifikan daripada *residual stress* pada arah lainnya. Pengamatan tersebut dilakukan pada 5 lokasi pengamatan seperti gambar 4.16 berikut.



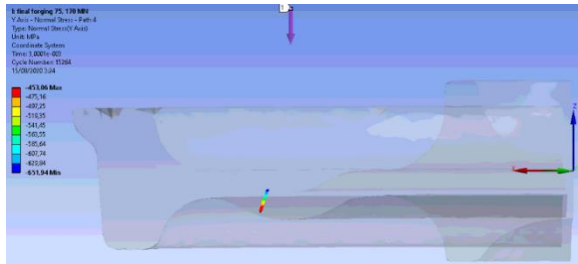
(a)



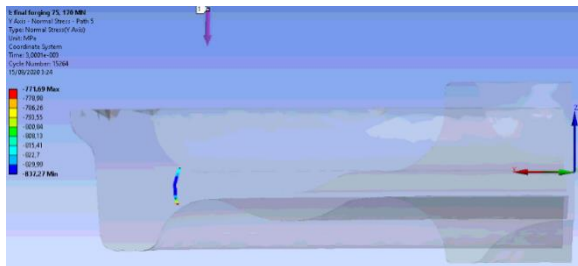
(b)



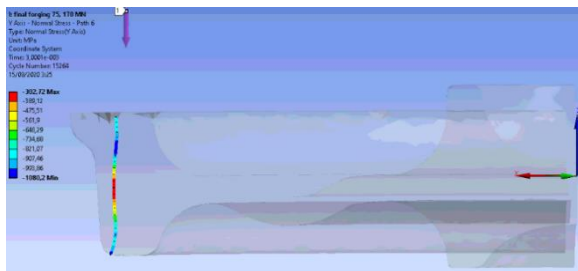
(c)



(d)



(e)



(f)

Gambar 4. 16 Lokasi pengamatan *path* 1 hingga *path* 6 arah *circumferential*

Lokasi pengamatan *path* 1 mewakili daerah sebelum *hub*, *path* 2 mewakili *hub*, *path* 3 mewakili daerah penghubung antara *hub* dan *web*, *path* 4 mewakili bagian tengah *web*, *path* 5 mewakili daerah penghubung antara *web* dan *rim*, dan *path* 6 mewakili *rim*. Gambar 4.16 adalah hasil *final forging* dengan ketebalan *billet*

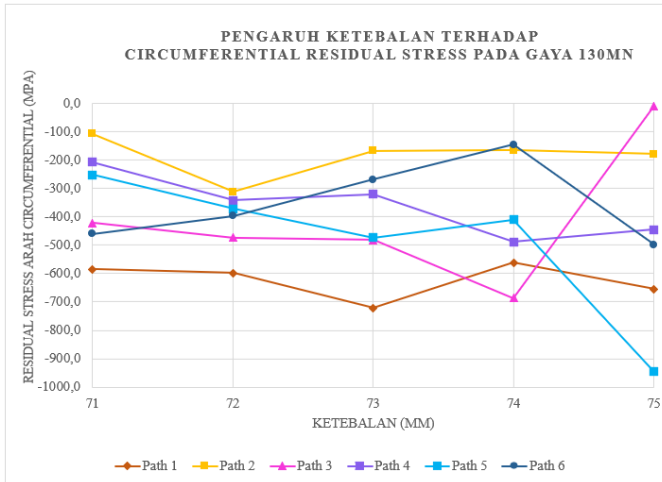
awal 75mm dan pembebanan 170MN. Berdasarkan Gambar 4.16 didapatkan nilai *compressive residual stress* maksimum pada *path* 1 sebesar -721,48Mpa, pada *path* 2 sebesar -124,43Mpa, pada *path* 3 sebesar -342,78Mpa, pada *path* 4 sebesar -651,94 Mpa, pada *path* 5 sebesar -837,27Mpa dan *path* 6 sebesar -1080,2Mpa. Dimana nilai *residual stress* terbesar adalah nilai yang semakin negative karena semakin bersifat tekan atau *compressive*. Berikut adalah tabel hasil analisis *circumferential residual stress* pada setiap variasi ketebalan yang digunakan.

Tabel 4. 3 Nilai *Circumferential Residual Stress* pada Variasi Ketebalan

Gaya (MN)	Ketebalan (mm)	Nilai Circumferential Residual Stress (Mpa)					
		Path 1	Path 2	Path 3	Path 4	Path 5	Path 6
130	71	-583,8	-107,0	-421,2	-207,2	-252,0	-620,9
	72	-597,1	-311,7	-473,3	-341,4	-371,5	-743,6
	73	-721,4	-166,4	-481,7	-319,8	-473,9	-485,7
	74	-562,0	-165,1	-685,6	-488,8	-410,1	-261,9
	75	-655,1	-178,5	-8,5	-444,4	-945,8	-901,5
140	71	-513,8	-264,2	-347,2	-180,1	2,4	-713,8
	72	-650,4	-110,8	-459,9	-268,1	-319,1	-583,0
	73	-628,2	-201,4	-365,0	-352,2	-411,6	-448,2
	74	-592,7	-166,5	-506,5	-554,8	-449,0	-307,6
	75	-680,0	-201,7	-69,2	-156,8	-220,7	-89,6
150	71	-698,0	-200,7	-406,1	-228,6	-217,0	-783,8
	72	-580,4	-375,3	-397,9	-152,7	-128,2	-605,7
	73	-395,7	-426,5	-302,4	-432,7	-372,9	-531,7
	74	-766,3	-91,8	-438,3	-487,4	-387,7	-307,5
	75	-638,7	-26,0	-73,7	-484,9	-826,9	-915,1
160	71	-643,2	-121,9	-346,8	-266,2	-280,5	-667,5
	72	-549,7	-314,7	-395,0	-250,7	-266,7	-622,6
	73	-124,5	-407,9	-269,3	-495,4	-433,3	-562,7
	74	-683,0	-275,4	-364,8	-702,5	-577,7	-352,0
	75	-712,4	-182,0	-241,5	-616,2	-881,1	-1013,3
170	71	-495,6	-283,8	-373,8	-297,6	-376,4	-613,5
	72	-142,9	-290,1	-133,5	-307,3	-176,0	-480,9
	73	-109,7	-429,6	-207,8	-669,5	-516,3	-580,1
	74	-637,9	-214,4	-253,2	-717,2	-517,6	-303,7
	75	-721,5	-124,4	-342,8	-651,9	-837,3	-1080,2

Tabel 4.3 merupakan nilai *residual stress* pada arah *circumferential* dari setiap variasi ketebalan yang digunakan. Kemudian dari tabel diatas akan didapatkan grafik hubungan

antara ketebalan dan *residual stress* yang bertujuan untuk mengetahui pengaruh ketebalan terhadap *circumferential residual stress*. Berikut adalah grafik berdasarkan tabel 4.3.



Gambar 4. 17 pengaruh ketebalan terhadap *circumferential residual stress* gaya 130MN

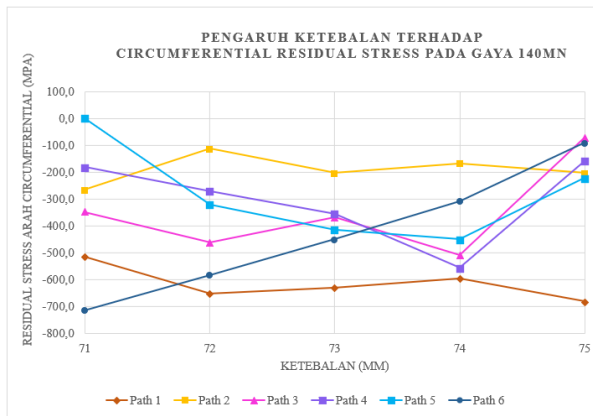
Grafik 4.17 merupakan grafik hubungan antara pengaruh ketebalan terhadap *circumferential residual stress*. Dimana yang terlihat pada Gambar 4.17 grafik yang dihasilkan mengalami fluktuasi yang disebabkan oleh beberapa faktor antara lain faktor distorsi pada *mesh* atau elemen yang digunakan pada simulasi dan faktor berikutnya adalah keterbatasan cakupan pengamatan dengan *path*. Kemudian faktor lainnya adalah perbedaan geometri *billet* awal yang sangat signifikan setelah proses *pre-forming* dengan gaya yang sama dan ketebalan berbeda yang menyebabkan perbedaan pada proses diskritisasi *billet* tahap *final forging*. Analisis menggunakan *path* terbatas pada satu garis saja dan nilai yang didapat bergantung pada nilai *node* atau elemen terdekat yang

dilalui oleh *path*. Namun kelebihan menggunakan *path* adalah analisis memberikan hasil yang spesifik.

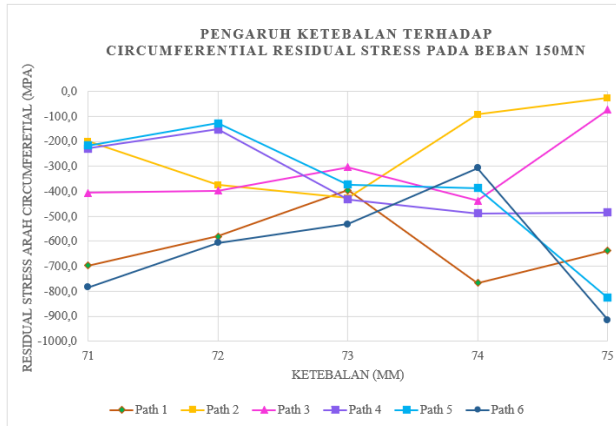
Dari hasil *forging* didapatkan bahwa pada *path* 1, *path* 3 dan *path* 5 memiliki *trandline residual stress* yang cenderung turun dari ketebalan 71mm hingga ketebalan 73mm. Pada *path* 2 *trandline* turun dari ketebalan 73mm hingga ketebalan 75mm. Pada *path* 4 memiliki *trandline residual stress* yang juga turun dari ketebalan 71mm hingga ketebalan 74mm meskipun naik pada ketebalan 73mm namun tidak terlalu signifikan. Sedangkan *path* 6 memiliki *trandline* naik dari ketebalan 71mm hingga 74mm. *Trandline* yang cenderung turun menunjukkan bahwa kenaikan nilai *residual stress* yang bersifat tekan pada arah *circumferential* seiring dengan peningkatan ketebalan *billet*.

Berdasarkan grafik, didapatkan jika dilihat dari naik turunnya *trandline circumferential residual stress* bagian roda kereta didapat bahwa semakin tebal *billet* maka bagian *hub* dan *rim* mengalami penurunan *compressive circumferential residual stress*. Sedangkan bagian *web* semakin tebal *billet* maka mengalami peningkatan *compressive circumferential residual stress*. Hal ini kurang sesuai dengan penjelasan pada distribusi *circumferential residual stress* yang ditunjukkan oleh Gambar 4.14 dan Gambar 4.15 dimana terdapat peningkatan nilai *residual stress* pada bagian *rim* dari 1158,2MPa menjadi -470,13MPa. Sedangkan bagian *web* dan bagian *hub* sudah sesuai dengan Gambar 4.14 dan Gambar 4.15. Bagian *hub* mengalami penurunan dari -290,22MPa menjadi -12,039MPa dan bagian *web* mengalami peningkatan dari -652,33MPa menjadi -928,88MPa. Ketidak sesuaian ini terjadi karena yang ditinjau pada grafik adalah *path* dari ketebalan 71mm hingga ketebalan 75mm. Sedangkan pada distribusi residual stress yang ditinjau adalah seluruh body dari ketebalan 74mm hingga 75mm. Pada grafik 4.17 jika pada *path* 6 atau bagian *rim* memiliki *trandline residual stress* yang naik dimana nilai *residual stress* pada arah *circumferential* turun khususnya ketebalan 71mm hingga

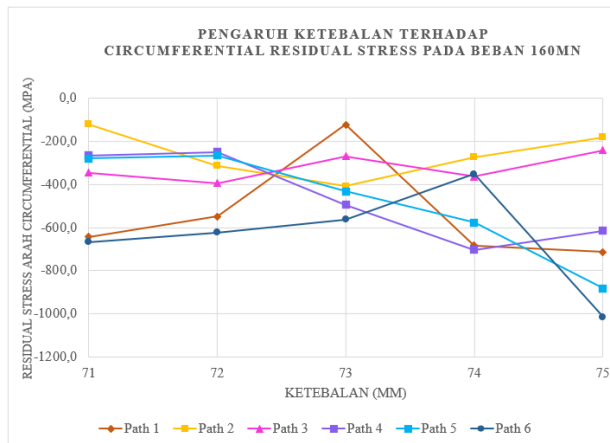
ketebalan 74mm, maka tidak sesuai dengan Gambar 4.14 dan standarisasi EN 13262. Dimana analisis *circumferential residual stress* pengamatannya diutamakan pada bagian *rim* roda kereta dan seharusnya *circumferential residual stress* pada *rim* bersifat tekan karena bagian roda ini bersentuhan langsung dengan rel kereta. Sehingga jika memiliki *residual stress* yang bersifat tekan akan membantu ketahanan dan kekuatan roda pada saat operasional.



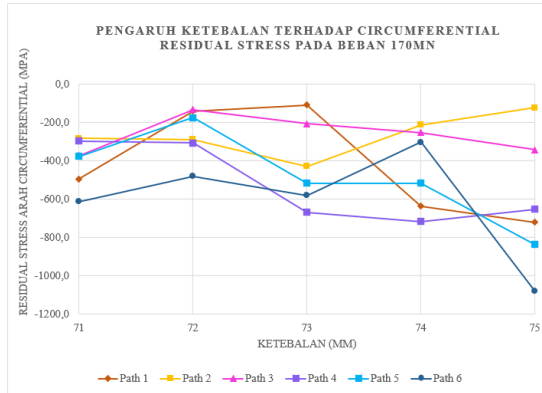
Gambar 4. 18 Pengaruh ketebalan terhadap *circumferential residual stress* beban 140MN



Gambar 4. 19 Pengaruh ketebalan terhadap *circumferential residual stress* beban 150MN

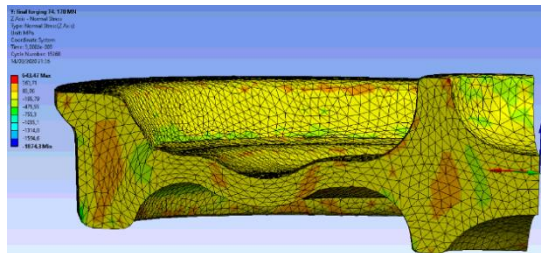


Gambar 4. 20 Pengaruh ketebalan terhadap *circumferential residual stress* beban 160MN

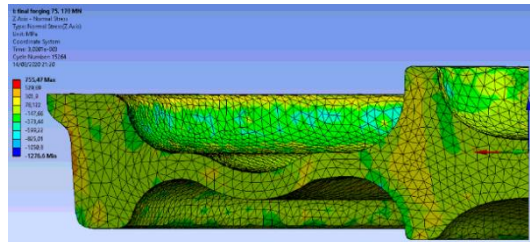


Gambar 4. 21 Pengaruh ketebalan terhadap *circumferential residual stress* beban 170MN

4.3.3. Pada Arah Axial



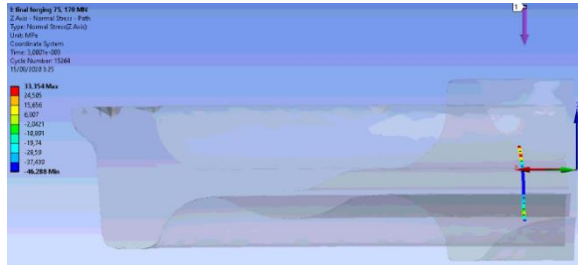
Gambar 4. 22 Axial residual stress dengan tebal 74mm



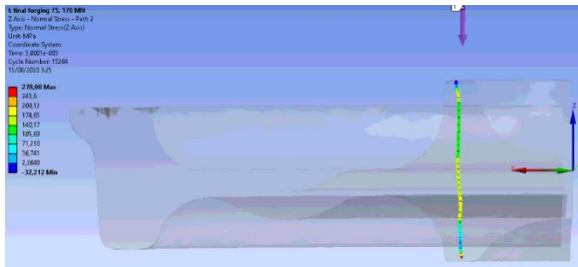
Gambar 4. 23 Axial residual stress dengan tebal 75mm

Gambar 4.22 dan 4.23 adalah distribusi *axial residual stress* pada hasil *forging* dengan ketebalan 74 mm dan 75mm dengan gaya *forging* 170MN. Dari hasil *forging* menunjukkan bahwa pada roda kereta terdapat beberapa bagian yang memiliki *residual stress* yang bersifat tarik atau *tension* baik pada bagian *hub*, *web*, dan *rim*. Oleh karena itu perlu dilakukannya *heat treatment* untuk menghilangkan *residual stress* yang bersifat tarik pada arah *axial* agar meningkatkan kekuatan roda dan meningkatkan ketahanan pada saat operasional. Dimana arah *axial* pada roda kereta saat operasional adalah ketika roda kereta berbelok. Berdasarkan hasil *forging* diatas, bagian *hub* dan *rim* merupakan bagian kritis dengan nilai *residual stress* sebesar 643,47Mpa pada ketebalan 74mm dan 755,47Mpa pada ketebalan 75mm bersifat tarik atau *tension* serta jika diamati lagi pada ketebalan 74mm *axial residual stress* didominasi oleh tegangan yang bersifat tarik . Maka dari itu perlu untuk dilakukannya pengamatan setelah proses *heat treatment* pada daerah daerah yang kritis terkait *residual stress* arah *axial*.

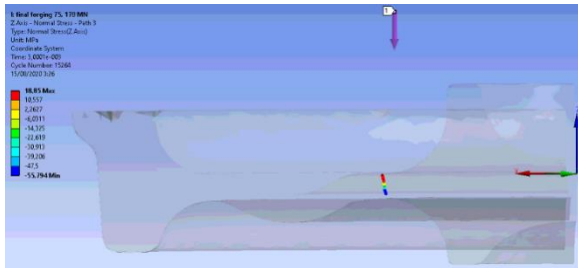
Selain *residual stress* yang bersifat tarik, pada hasil *forging* diatas juga terdapat *residual stress* yang bersifat tekan atau *compressive*. Bagian yang didominasi oleh *residual stress* bersifat tekan adalah bagian *web* dan *rim*. Dimana *residual stress* yang bersifat tekan ini akan mencegah terjadinya *crack* dan meningkatkan ketahanan terhadap *fatigue* pada saat operational. Berdasarkan hasil *forging* diatas didapatkan nilai maksimal *compressive residual stress* sebesar -1874,3Mpa pada ketebalan 74mm dan -1276,6Mpa pada ketebalan 75mm. Maka dari itu perlu dilakukannya pengamatan tentang pengaruh ketebalan awal *billet* terhadap terbentuknya *residual stress* yang bersifat tekan atau *compressive*. Pengamatan tersebut dilakukan pada 5 lokasi pengamatan seperti gambar 4.24 berikut.



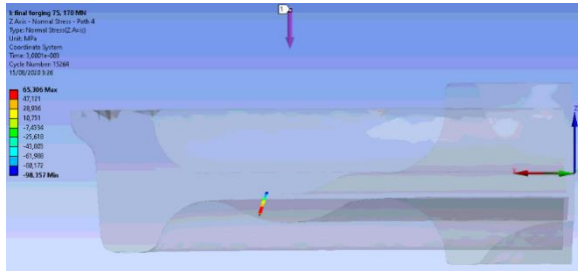
(a)



(b)



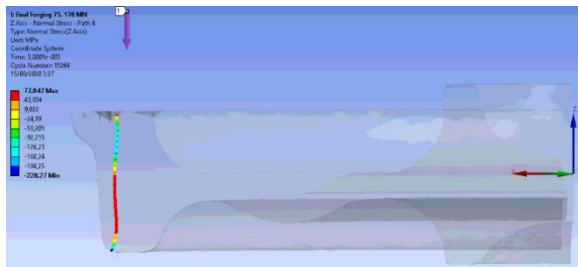
(c)



(d)



(e)



(f)

Gambar 4. 24 Lokasi pengamatan *path 1* hingga *path 6* arah *axial*

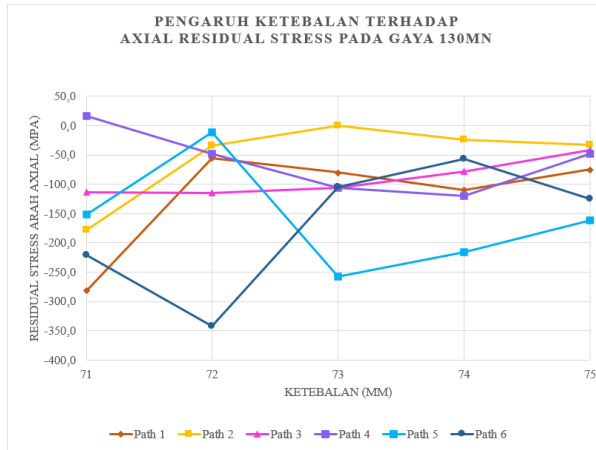
Lokasi pengamatan *path 1* mewakili daerah sebelum *hub*, *path 2* mewakili *hub*, *path 3* mewakili daerah penghubung antara *hub* dan *web*, *path 4* mewakili bagian tengah *web*, *path 5* mewakili daerah penghubung antara *web* dan *rim*, dan *path 6* mewakili *rim*. Gambar 4.24 adalah hasil *final forging* dengan ketebalan *billet*

awal 75mm dan pembebanan 170MN. Berdasarkan Gambar 4.24 didapatkan nilai *compressive residual stress* maksimum pada *path* 1 sebesar -46,228Mpa, pada *path* 2 sebesar -32,212Mpa, pada *path* 3 sebesar -55,794Mpa, pada *path* 4 sebesar -98,357Mpa, pada *path* 5 sebesar -85,107Mpa dan *path* 6 sebesar -228,27Mpa. Dimana nilai *residual stress* terbesar adalah nilai yang semakin negative karena semakin bersifat tekan atau *compressive*. Berikut adalah tabel hasil analisis *axial residual stress* pada setiap variasi ketebalan yang digunakan.

Tabel 4. 4 Nilai *Radial Residual Stress* pada Variasi Ketebalan

Gaya (MN)	Ketebalan (mm)	Nilai Axial Residual Stress (Mpa)					
		Path 1	Path 2	Path 3	Path 4	Path 5	Path 6
130	71	-281,0	-178,2	-113,4	16,7	-151,7	-221,0
	72	-55,9	-34,0	-114,5	-48,1	-10,9	-341,6
	73	-80,2	-0,3	-105,7	-106,3	-258,1	-105,1
	74	-110,0	-23,9	-78,5	-119,9	-215,5	-56,7
	75	-75,1	-32,7	-41,0	-47,5	-161,1	-125,0
140	71	-117,2	-119,8	-114,7	-121,8	-87,3	-221,5
	72	-111,2	-24,4	-83,3	-32,0	-42,8	-270,5
	73	-40,3	-74,5	-100,7	-60,9	-169,2	-189,2
	74	-151,6	-20,2	-69,2	-156,8	-220,7	-89,6
	75	-60,3	-41,5	-71,8	-33,8	-117,1	-156,4
150	71	-193,4	-97,7	-106,4	-27,9	-81,7	-138,7
	72	-158,4	29,6	-77,1	-63,5	-167,5	-200,5
	73	-95,0	-47,5	-58,3	-9,0	-173,3	-251,3
	74	-156,6	-12,1	-64,5	-103,2	-227,9	-25,2
	75	-67,8	-36,1	-37,7	-43,2	-113,7	-138,4
160	71	-103,2	-49,5	-96,4	-8,8	-97,0	-65,3
	72	-183,7	-32,9	-44,6	-41,8	-115,1	-246,5
	73	-109,7	-43,4	-102,7	-60,1	-157,8	-223,0
	74	-144,7	-77,1	-54,0	-140,2	-300,9	-76,8
	75	-56,6	-40,7	-45,9	-92,9	-125,9	-187,7
170	71	-103,4	-91,3	-85,5	-22,2	-202,7	-74,1
	72	-246,8	-20,6	-211,5	-93,9	-24,2	-259,8
	73	-135,9	-34,4	-55,7	-32,2	-149,7	-237,9
	74	-211,5	-89,2	-84,4	-112,3	-276,8	-166,8
	75	-46,3	-32,2	-55,8	-98,4	-85,1	-228,3

Tabel 4.4 merupakan nilai *residual stress* pada arah *axial* dari setiap variasi ketebalan yang digunakan. Kemudian dari tabel diatas akan didapatkan grafik hubungan antara ketebalan dan *residual stress* yang bertujuan untuk mengetahui pengaruh ketebalan terhadap *axial residual stress*. Berikut adalah grafik berdasarkan tabel 4.4.



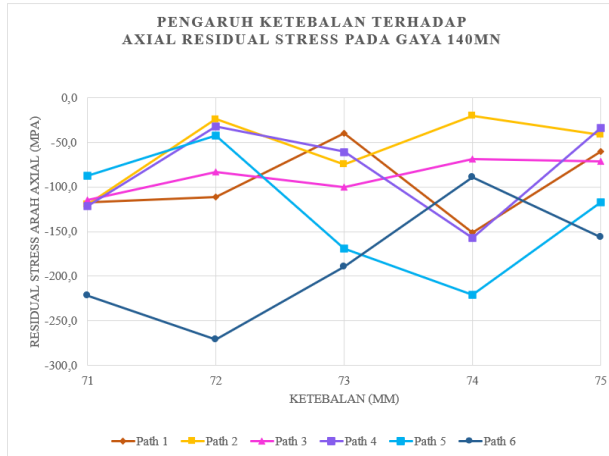
Gambar 4. 25 Pengaruh ketebalan terhadap *axial residual stress* gaya 130MN

Grafik 4.25 merupakan grafik hubungan antara pengaruh ketebalan terhadap *axial residual stress*. Dimana yang terlihat pada Gambar 4.25 grafik yang dihasilkan mengalami fluktuasi yang disebabkan oleh beberapa faktor antara lain faktor distorsi pada *mesh* atau elemen yang digunakan pada simulasi dan faktor berikutnya adalah keterbatasan cakupan pengamatan dengan *path*. Kemudian faktor lainnya adalah perbedaan geometri *billet* awal yang sangat signifikan setelah proses *pre-forming* dengan gaya yang sama dan ketebalan berbeda yang menyebabkan perbedaan pada proses diskritisasi *billet* tahap *final forging*. Analisis menggunakan *path* terbatas pada satu garis saja dan nilai yang didapat bergantung pada nilai *node* atau elemen terdekat yang

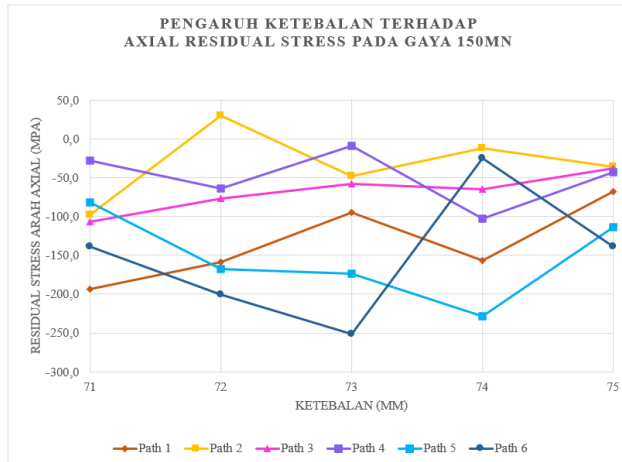
dilalui oleh *path*. Namun kelebihan menggunakan *path* adalah analisis memberikan hasil yang spesifik.

Dari hasil *forging* didapatkan bahwa pada *path* 1, *path* 2, *path* 3, dan *path* 6 memiliki *trandline residual stress* yang cenderung naik dari ketebalan 72mm hingga ketebalan 75mm. Sedangkan *path* 4 dan *path* 5 memiliki *trandline residual stress* turun. *Trandline* yang cenderung turun menunjukkan bahwa kenaikan nilai *residual stress* yang bersifat tekan pada arah *axial*.

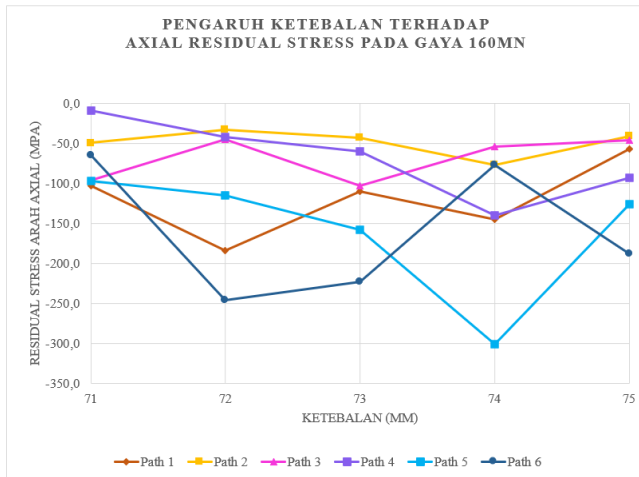
Berdasarkan grafik, didapatkan jika dilihat dari naik turunnya *trandline axial residual stress* bagian roda kereta didapat bahwa semakin tebal *billet* maka bagian *hub* mengalami penurunan nilai *axial compressive residual stress*. Sedangkan bagian *web* dan *rim* semakin tebal *billet* maka mengalami peningkatan nilai *axial compressive residual stress*. Hal ini sesuai dengan penjelasan pada distribusi *axial residual stress* yang ditunjukkan oleh Gambar 4.22 dan Gambar 4.23 dimana terdapat penurunan nilai *residual stress* pada bagian *hub* dari -195,79 Mpa menjadi -147,66MPa dan terdapat peningkatan nilai *residual stress* pada bagian *web* dari -195,79MPa menjadi -373,44MPa, begitu pula dengan bagian *rim* yaitu dari 83,90Mpa menjadi -373,44MPa. Yang perlu diperhatikan adalah pada distribusi *residual stress* ketebalan 74mm terdapat nilai *residual stress* yang bersifat tarik pada bagian *hub*, *web*, dan *rim* dan pada ketebalan 75mm terdapat pula nilai *residual stress* yang bersifat tarik pada bagian *hub* dan *rim*. Maka dari itu perlu dilakukannya *heat treatment* pada bagian tersebut.



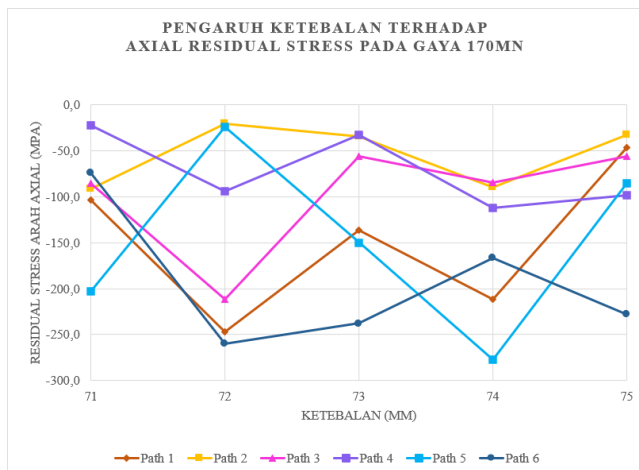
Gambar 4. 26 Pengaruh ketebalan terhadap axial *residual stress* gaya 140MN



Gambar 4. 27 Pengaruh ketebalan terhadap axial *residual stress* gaya 150MN



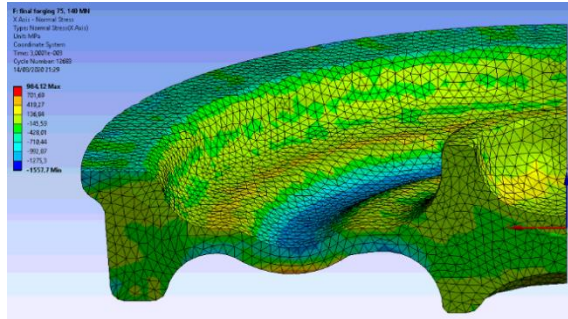
Gambar 4. 28 Pengaruh ketebalan terhadap axial *residual stress* gaya 160MN



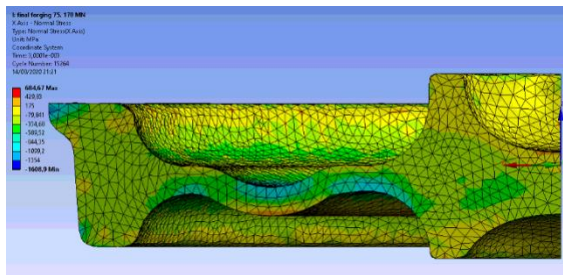
Gambar 4. 29 Pengaruh ketebalan terhadap axial *residual stress* gaya 170MN

4.4. Pengaruh Gaya *Forging* terhadap *Residual Stress*

4.4.1. Pada Arah *Radial*



Gambar 4. 30 *Radial residual stress* dengan gaya 140MN



Gambar 4. 31 *Radial residual stress* dengan gaya 170MN

Gambar 4.30 dan 4.31 adalah distribusi *radial residual stress* pada hasil *forging* beban 140MN dan 170MN dengan ketebalan *billet* 75mm. Dari hasil *forging* menunjukkan bahwa pada roda kereta terdapat beberapa bagian yang memiliki *residual stress* yang bersifat tarik atau *tension* baik pada bagian *hub*, *web*, dan *rim*. Oleh karena itu perlu dilakukannya *heat treatment* untuk menghilangkan *residual stress* yang bersifat tarik pada arah *radial* agar meningkatkan kekuatan roda dan meningkatkan ketahanan pada saat operasional. Dimana arah *radial* pada roda kereta saat operasional adalah ketika roda menerima beban statis dan pada saat roda kereta memutar (keretanya berjalan). Berdasarkan hasil

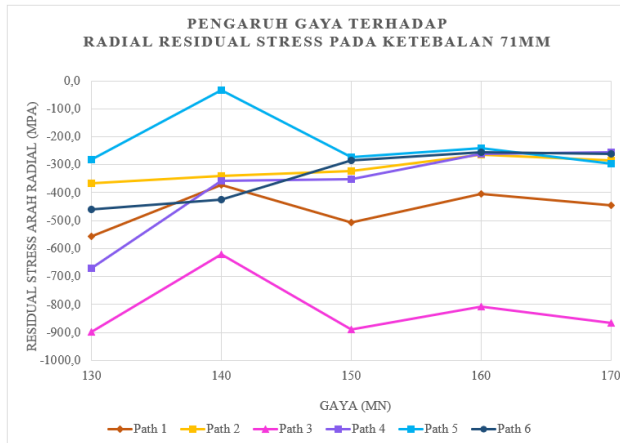
forging diatas, bagian *web* tengah permukaan bawah dan *hub* merupakan bagian kritis dengan nilai *residual stress* sebesar 984,12Mpa pada pembebanan 140MN dan 684,67Mpa pada pembebanan 170MN bersifat tarik atau *tension*. Maka dari itu perlu untuk dilakukannya pengamatan setelah proses *heat treatment* pada bagian yang kritis.

Selain *residual stress* yang bersifat tarik, pada hasil *forging* diatas juga terdapat *residual stress* yang bersifat tekan atau *compressive*. Bagian yang didominasi oleh *residual stress* bersifat tekan adalah bagian *web* tengah permukaan atas dan *rim*. Dimana *residual stress* yang bersifat tekan ini akan mencegah terjadinya *crack* dan meningkatkan ketahanan terhadap *fatigue* pada saat operational. Berdasarkan hasil *forging* diatas didapatkan nilai maksimal *compressive residual stress* sebesar -1557,7Mpa pada pembebanan 140MN dan -1608,9Mpa pada pembebanan 170MN. Maka dari itu perlu dilakukannya pengamatan tentang pengaruh besarnya gaya atau pembebanan terhadap terbentuknya *residual stress* yang bersifat tekan atau *compressive*. Pengamatan tersebut dilakukan pada 5 lokasi pengamatan seperti gambar 4.8 diatas, kemudian Berikut adalah tabel hasil analisis *radial residual stress* pada setiap variasi pembebanan yang digunakan.

Tabel 4. 5 Nilai *Radial Residual Stress* pada Variasi Pembebanan

Ketebalan (mm)	Gaya (MN)	Nilai Radial Residual Stress (Mpa)					
		Path 1	Path 2	Path 3	Path 4	Path 5	Path 6
71	130	-557,5	-366,0	-896,8	-669,3	-282,9	-459,2
	140	-373,2	-338,8	-620,2	-356,5	-34,1	-425,3
	150	-507,1	-323,2	-889,0	-353,2	-274,2	-285,6
	160	-405,6	-263,0	-806,3	-261,3	-240,8	-256,2
	170	-446,0	-286,0	-865,1	-255,5	-296,2	-262,3
72	130	-494,1	-241,6	-1094,8	-711,4	-348,3	-396,6
	140	-566,0	-274,7	-958,8	-603,7	-331,4	-346,0
	150	-485,9	-256,1	-873,4	-409,1	-297,3	-347,5
	160	-400,3	-186,7	-611,3	-491,1	-256,5	-266,9
	170	-293,4	-185,0	-653,7	-406,7	-201,8	-216,7
73	130	-437,0	-74,4	-1122,5	-888,4	-403,5	-267,9
	140	-386,6	-322,2	1076,2	-659,2	-376,8	-213,2
	150	-379,6	-272,9	-918,0	546,8	-371,8	184,6
	160	-300,7	-194,4	-924,6	-746,3	-402,8	-267,4
	170	-190,4	-224,3	-665,5	-695,4	-389,8	-325,0
74	130	-486,3	-233,7	-1087,1	-646,3	-293,7	-144,9
	140	-467,6	-263,7	-909,9	-913,5	-412,2	-228,6
	150	-483,8	-325,1	-912,0	-760,5	-368,0	-187,5
	160	-426,2	-298,6	-1016,1	-782,2	-511,7	-252,5
	170	-454,9	-192,1	-821,2	-683,5	-418,5	-202,0
75	130	-333,3	-278,5	-753,2	-777,6	-544,4	-498,8
	140	-373,9	-235,1	-1024,7	-793,8	-442,0	-464,9
	150	-240,2	-239,7	-727,8	-790,3	-524,7	-441,5
	160	-369,6	-291,3	-901,1	904,1	-485,6	-419,0
	170	-365,8	-271,7	-993,2	-838,5	-388,9	-335,4

Tabel 4.5 merupakan nilai *residual stress* pada arah *radial* dari setiap variasi pembebanan yang digunakan. Kemudian dari tabel diatas akan didapatkan grafik hubungan antara gaya dan *residual stress* yang bertujuan untuk mengetahui pengaruh besarnya gaya terhadap *radial residual stress*. Berikut adalah grafik berdasarkan tabel 4.5.



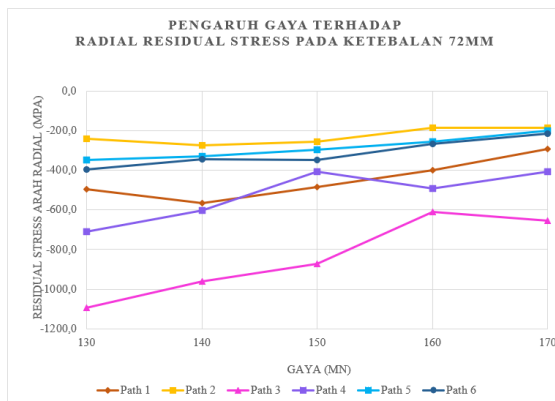
Gambar 4. 32 Pengaruh gaya terhadap *radial residual stress* ketebalan 71mm

Grafik 4.32 merupakan grafik hubungan antara pengaruh besarnya gaya terhadap *radial residual stress*. Dimana yang terlihat pada Gambar 4.9 grafik yang dihasilkan mengalami fluktuasi yang disebabkan oleh beberapa faktor antara lain faktor distorsi pada *mesh* atau elemen yang digunakan pada simulasi dan faktor berikutnya adalah keterbatasan cakupan pengamatan dengan *path*. Kemudian faktor lainnya adalah perbedaan geometri *billet* awal yang sangat signifikan setelah proses *pre-forming* dengan gaya yang sama dan ketebalan berbeda yang menyebabkan perbedaan pada proses diskritisasi *billet* tahap *final forging*. Analisis menggunakan *path* terbatas pada satu garis saja dan nilai yang didapat bergantung pada nilai *node* atau elemen terdekat yang dilalui oleh *path*. Namun kelebihan menggunakan *path* adalah analisis memberikan hasil yang spesifik.

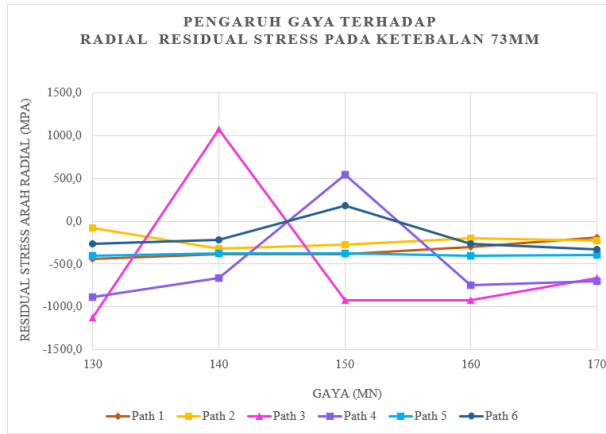
Dari hasil *forging* didapatkan bahwa pada *path 1*, *path 2*, *path 4* dan *path 6* memiliki *trandline residual stress* yang cenderung naik dari gaya 130MN hingga 160MN. Sedangkan *path 3*, *path 5* memiliki *trandline residual stress* turun dari gaya 140MN

hingga gaya 170MN. *Trandline* yang cenderung turun menunjukkan bahwa kenaikan nilai *residual stress* yang bersifat tekan pada arah radial.

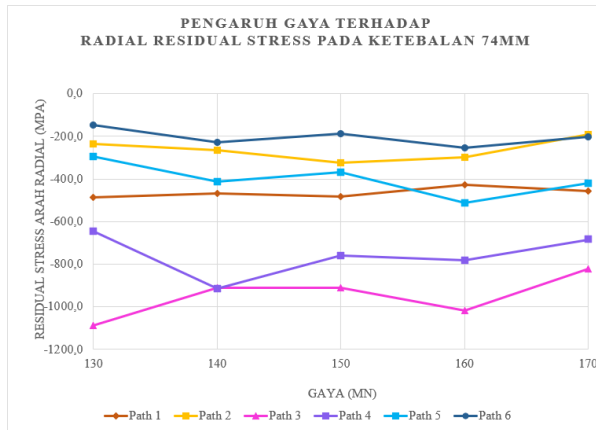
Berdasarkan grafik, didapatkan jika dilihat dari naik turunnya *trandline radial residual stress* bagian roda kereta didapat bahwa semakin besar gaya, maka bagian *hub*, *web* dan *rim* mengalami penurunan nilai *radial compressive residual stress*. Hal ini sesuai dengan penjelasan pada distribusi *radial residual stress* yang ditunjukkan oleh Gambar 4.30 dan Gambar 4.31 dimana terdapat penurunan nilai *residual stress* pada bagian semua bagian roda yaitu *hub*, *web* dan *rim*. Dimana terjadi peningkatan pada bagian *hub* dari -145,59MPa menjadi -79,841MPa, bagian *web* dari -1557,7MPa menjadi -1354MPa, dan bagian *rim* dari -145,59MPa menjadi -79,841MPa. Selain itu *trandline residual stress* yang naik pada *path 1*, *path 2*, *path 4* dan *path 6* juga sesuai dengan Gambar 4.30 dan Gambar 4.31, bahwa semakin besar gaya *forging* yang diberikan, maka semakin akan cenderung meningkat daerah distribusi *radial residual stress* yang bersifat tarik pada terutama pada bagian *hub* dan *rim* roda kereta.



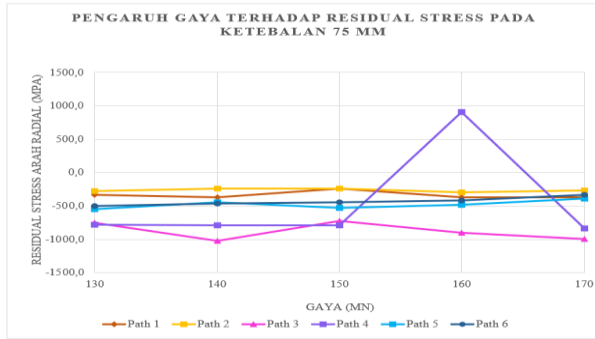
Gambar 4. 33 Pengaruh gaya terhadap *radial residual stress* ketebalan 72mm



Gambar 4. 34 Pengaruh gaya terhadap *radial residual stress* ketebalan 73mm

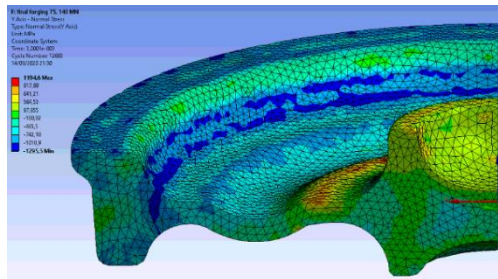


Gambar 4. 35 Pengaruh gaya terhadap *radial residual stress* ketebalan 74mm

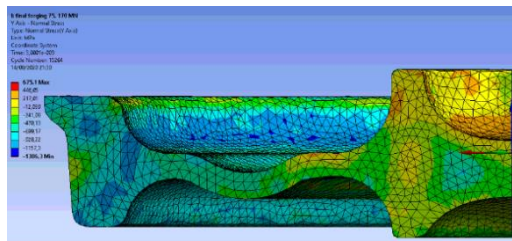


Gambar 4. 36 Pengaruh gaya terhadap *radial residual stress* ketebalan 75mm

4.4.2. Pada Arah *Circumferential*



Gambar 4. 37 *Circumferential residual stress* dengan gaya 140MN



Gambar 4. 38 *Circumferential residual stress* dengan gaya 170MN

Gambar 4.37 dan 4.38 adalah distribusi *circumferential residual stress* pada hasil *forging* beban 140MN dan beban 170MN dengan ketebalan 75mm. Dari hasil *forging* menunjukkan bahwa pada roda kereta terdapat beberapa bagian yang memiliki *residual stress* yang bersifat tarik atau *tension* baik pada bagian *hub*, *web*, dan *rim*. Oleh karena itu perlu dilakukannya *heat treatment* untuk menghilangkan *residual stress* yang bersifat tarik pada arah *circumferential* agar meningkatkan kekuatan roda dan meningkatkan ketahanan pada saat operasional. Dimana arah *circumferential* pada roda kereta saat operasional adalah ketika roda menerima pembebanan.

Berdasarkan hasil *forging* diatas, bagian *hub* dan *web* merupakan bagian kritis dengan nilai *residual stress* sebesar 1194,6Mpa pada pembebanan 140MN dan 675,1Mpa pembebanan 170MN bersifat tarik atau *tension*. Perlu diketahui bahwa pada bagian *rim* roda kereta merupakan bagian yang menjadi *concern* dalam pengamatan analisis *circumferential residual stress*. Maka dari itu perlu untuk dilakukannya pengamatan setelah proses *heat treatment* pada bagian yang kritis.

Selain *residual stress* yang bersifat tarik, pada hasil *forging* diatas juga terdapat *residual stress* yang bersifat tekan atau *compressive*. Bagian yang didominasi oleh *residual stress* bersifat tekan adalah bagian *web* dan *rim*. Dimana *residual stress* yang bersifat tekan ini akan mencegah terjadinya *crack* dan meningkatkan ketahanan terhadap *fatigue* pada saat operasional. Berdasarkan hasil *forging* diatas didapatkan nilai maksimal *compressive residual stress* sebesar -1295,5Mpa pada pembebanan 140MN dan -1386,3Mpa pada pembebanan 170MN. Maka dari itu perlu dilakukannya pengamatan tentang pengaruh besarnya gaya terhadap terbentuknya *residual stress* yang bersifat tekan atau *compressive*. Hal ini dikarenakan *circumferential residual stress* memiliki pengaruh yang lebih signifikan daripada *residual stress* pada arah lainnya. Pengamatan tersebut dilakukan pada 5 lokasi

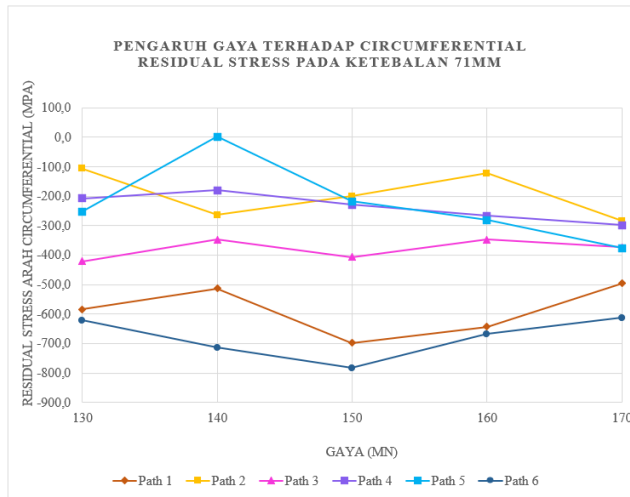
pengamatan seperti gambar 4.16 diatas, kemudian Berikut adalah tabel hasil analisis *circumferential residual stress* pada setiap variasi pembebanan yang digunakan.

Tabel 4. 6 Nilai *Circumferential Residual Stress* pada Variasi Pembebanan

Ketebalan (mm)	Gaya (MN)	Nilai Circumferential Residual Stress (Mpa)					
		Path 1	Path 2	Path 3	Path 4	Path 5	Path 6
71	130	-583,8	-107,0	-421,2	-207,2	-252,0	-620,9
	140	-513,8	-264,2	-347,2	-180,1	2,4	-713,8
	150	-698,0	-200,7	-406,1	-228,6	-217,0	-783,8
	160	-643,2	-121,9	-346,8	-266,2	-280,5	-667,5
	170	-495,6	-283,8	-373,8	-297,6	-376,4	-613,5
72	130	-597,1	-311,7	-473,3	-341,4	-371,5	-743,6
	140	-650,4	-110,8	-459,9	-268,1	-319,1	-583,0
	150	-580,4	-375,3	-397,9	-152,7	-128,2	-605,7
	160	-549,7	-314,7	-395,0	-250,7	-266,7	-622,6
	170	-142,9	-290,1	-133,5	-307,3	-176,0	-480,9
73	130	-721,4	-166,4	-481,7	-319,8	-473,9	-485,7
	140	-628,2	-201,4	-365,0	-352,2	-411,6	-448,2
	150	-395,7	-426,5	-302,4	-432,7	-372,9	-531,7
	160	-124,5	-407,9	-269,3	-495,4	-433,3	-562,7
	170	-109,7	-429,6	-207,8	-669,5	-516,3	-580,1
74	130	-562,0	-165,1	-685,6	-488,8	-410,1	-261,9
	140	-592,7	-166,5	-506,5	-554,8	-449,0	-307,6
	150	-766,3	-91,8	-438,3	-487,4	-387,7	-307,5
	160	-683,0	-275,4	-364,8	-702,5	-577,7	-352,0
	170	-637,9	-214,4	-253,2	-717,2	-517,6	-303,7
75	130	-655,1	-178,5	-8,5	-444,4	-945,8	-901,5
	140	-680,0	-201,7	-69,2	-156,8	-220,7	-89,6
	150	-638,7	-26,0	-73,7	-484,9	-826,9	-915,1
	160	-712,4	-182,0	-241,5	-616,2	-881,1	-1013,3
	170	-721,5	-124,4	-342,8	-651,9	-837,3	-1080,2

Tabel 4.6 merupakan nilai *residual stress* pada arah *circumferential* dari setiap variasi pembebanan yang digunakan. Kemudian dari tabel diatas akan didapatkan grafik hubungan antara gaya dan *residual stress* yang bertujuan untuk mengetahui

pengaruh besarnya gaya terhadap *radial residual stress*. Berikut adalah grafik berdasarkan tabel 4.6.



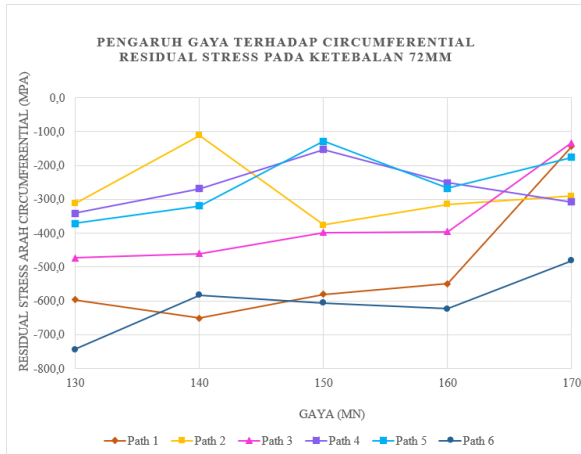
Gambar 4. 39 Pengaruh gaya terhadap *circumferential residual stress* ketebalan 71mm

Grafik 4.39 merupakan grafik hubungan antara pengaruh gaya atau pembebanan terhadap *circumferential residual stress*. Dimana yang terlihat pada Gambar 4.39 grafik yang dihasilkan mengalami fluktuasi yang disebabkan oleh beberapa faktor antara lain faktor distorsi pada *mesh* atau elemen yang digunakan pada simulasi dan faktor berikutnya adalah keterbatasan cakupan pengamatan dengan *path*. Analisis menggunakan *path* terbatas pada satu garis saja dan nilai yang didapat bergantung pada nilai *node* atau elemen terdekat yang dilalui oleh *path*. Namun kelebihan menggunakan *path* adalah analisis memberikan hasil yang spesifik.

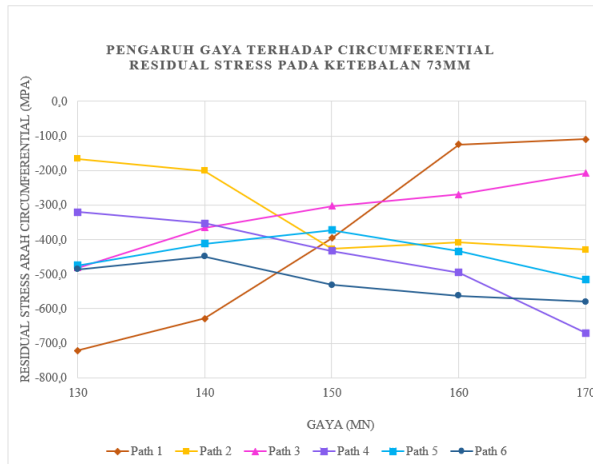
Dari hasil *forging* didapatkan bahwa pada *path 1*, *path 2*, *path 4*, *path 5*, dan *path 6* memiliki *trandline residual stress* yang cenderung turun. Sedangkan pada *path 3* memiliki *trandline residual stress* yang naik. *Trandline* yang cenderung turun

menunjukkan bahwa kenaikan nilai *circumferential compressive residual stress*.

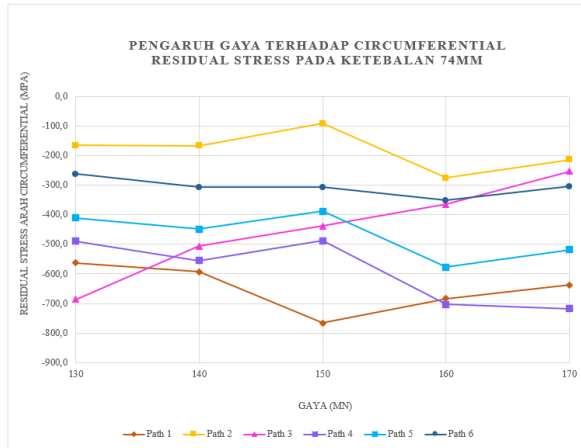
Berdasarkan grafik 4.39, didapatkan jika dilihat dari naik turunnya *trandline circumferential residual stress* bagian roda kereta didapat bahwa semakin besar gaya, maka bagian *hub* mengalami penurunan *circumferential compressive residual stress*. Sedangkan bagian *web* dan *rim* semakin besar gaya, maka semakin mengalami peningkatan *circumferential compressive residual stress*. Hal ini sesuai dengan penjelasan pada distribusi *circumferential residual stress* yang ditunjukkan oleh Gambar 4.38 dan Gambar 4.37 dimana terdapat penurunan nilai *residual stress* pada bagian *hub* dari -188,82MPa menjadi -12,099MPa. Sedangkan terjadi peningkatan pada bagian *rim* dari -742,18 menjadi -928,22MPa dan bagian *web* terjadi peningkatan nilai *residual stress* dari -188,82MPa menjadi -470,13Mpa. Selain itu terdapat pula daerah *residual stress* pada bagian *hub* yang bersifat tarik seiring besarnya gaya atau beban yang diberikan seperti yang ditunjukkan Gambar 4.37. Jika bagian *rim* memiliki kenaikan nilai *residual stress* yang bersifat tekan seiring dengan besarnya gaya yang diberikan maka hal ini sesuai dengan grafik 4.39 dan sesuai dengan standiasi EN 13262. Dimana analisis *circumferential residual stress* pengamatannya diutamakan pada bagian *rim* roda kereta dan seharusnya *circumferential residual stress* pada *rim* bersifat tekan karena bagian roda ini bersentuhan langsung dengan rel kereta. Sehingga jika memiliki *residual stress* yang bersifat tekan akan membantu ketahanan dan kekuatan roda pada saat operasional.



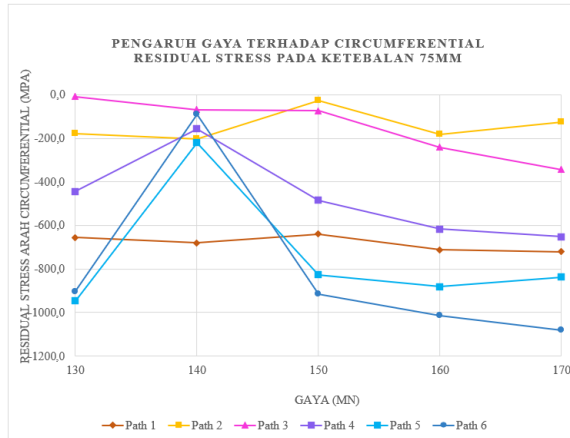
Gambar 4. 40 Pengaruh gaya terhadap *circumferential residual stress* ketebalan 72mm



Gambar 4. 41 Pengaruh gaya terhadap *circumferential residual stress* ketebalan 73mm

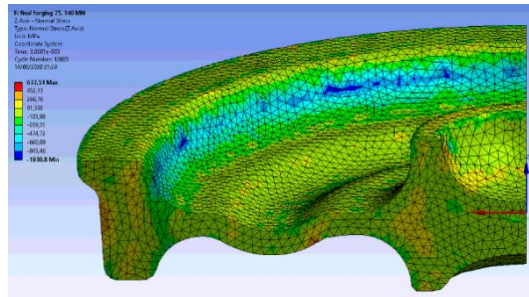


Gambar 4. 42 Pengaruh gaya terhadap *circumferential residual stress* ketebalan 74mm

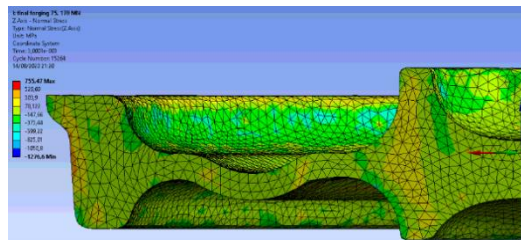


Gambar 4. 43 Pengaruh gaya terhadap *circumferential residual stress* ketebalan 74mm

4.4.3. Pada Arah Axial



Gambar 4. 44 *Axial residual stress* dengan gaya 140MN



Gambar 4. 45 *Axial residual stress* dengan gaya 170MN

Gambar 4.44 dan 4.45 adalah distribusi *circumferential residual stress* pada hasil *forging* beban 140MN dan beban 170MN dengan ketebalan 75mm. Dari hasil *forging* menunjukkan bahwa pada roda kereta terdapat beberapa bagian yang memiliki *residual stress* yang bersifat tarik atau *tension* baik pada bagian *hub*, *web*, dan *rim*. Oleh karena itu perlu dilakukannya *heat treatment* untuk menghilangkan *residual stress* yang bersifat tarik pada arah *axial* agar meningkatkan kekuatan roda dan meningkatkan ketahanan pada saat operasional. Dimana arah *axial* pada roda kereta saat operasional adalah ketika roda kereta berbelok. Berdasarkan hasil *forging* diatas, bagian *hub* dan *rim* merupakan bagian kritis dengan nilai *residual stress* sebesar 637,51Mpa pada pembebanan 140MN dan 755,47Mpa pada pembebanan 170MN bersifat tarik atau

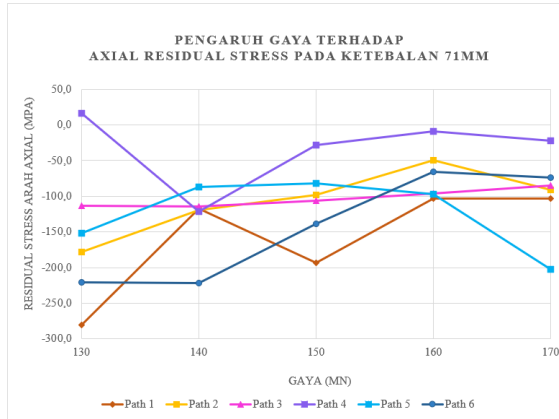
tension. Maka dari itu perlu untuk dilakukannya pengamatan setelah proses *heat treatment* pada daerah daerah yang kritis terkait *residual stress* arah *axial*.

Selain *residual stress* yang bersifat tarik, pada hasil *forging* diatas juga terdapat *residual stress* yang bersifat tekan atau *compressive*. Bagian yang didominasi oleh *residual stress* bersifat tekan adalah bagian *web* dan *rim*. Dimana *residual stress* yang bersifat tekan ini akan mencegah terjadinya *crack* dan meningkatkan ketahanan terhadap *fatigue* pada saat operational. Berdasarkan hasil *forging* diatas didapatkan nilai maksimal *compressive residual stress* sebesar -1030,8Mpa pada pembebanan 140MN dan -1276,6Mpa pada pembebanan 170MN. Maka dari itu perlu dilakukannya pengamatan tentang pengaruh besarnya gaya atau pembebanan terhadap terbentuknya *residual stress* yang bersifat tekan atau *compressive*. Pengamatan tersebut dilakukan pada 5 lokasi pengamatan seperti gambar 4.24 diatas, kemudian Berikut adalah tabel hasil analisis *axial residual stress* pada setiap variasi pembebanan yang digunakan.

Tabel 4. 7 Nilai *Axial Residual Stress* pada Variasi Pembebanan

Ketebalan (mm)	Gaya (MN)	Nilai <i>Axial Residual Stress</i> (Mpa)					
		Path 1	Path 2	Path 3	Path 4	Path 5	Path 6
71	130	-281,0	-178,2	-113,4	16,7	-151,7	-221,0
	140	-117,2	-119,8	-114,7	-121,8	-87,3	-221,5
	150	-193,4	-97,7	-106,4	-27,9	-81,7	-138,7
	160	-103,2	-49,5	-96,4	-8,8	-97,0	-65,3
	170	-103,4	-91,3	-85,5	-22,2	-202,7	-74,1
72	130	-55,9	-34,0	-114,5	-48,1	-10,9	-341,6
	140	-111,2	-24,4	-83,3	-32,0	-42,8	-270,5
	150	-158,4	29,6	-77,1	-63,5	-167,5	-200,5
	160	-183,7	-32,9	-44,6	-41,8	-115,1	-246,5
	170	-246,8	-20,6	-211,5	-93,9	-24,2	-259,8
73	130	-80,2	-0,3	-105,7	-106,3	-258,1	-105,1
	140	-40,3	-74,5	-100,7	-60,9	-169,2	-189,2
	150	-95,0	-47,5	-58,3	-9,0	-173,3	-251,3
	160	-109,7	-43,4	-102,7	-60,1	-157,8	-223,0
	170	-135,9	-34,4	-55,7	-32,2	-149,7	-237,9
74	130	-110,0	-23,9	-78,5	-119,9	-215,5	-56,7
	140	-151,6	-20,2	-69,2	-156,8	-220,7	-89,6
	150	-156,6	-12,1	-64,5	-103,2	-227,9	-25,2
	160	-144,7	-77,1	-54,0	-140,2	-300,9	-76,8
	170	-211,5	-89,2	-84,4	-112,3	-276,8	-166,8
75	130	-75,1	-32,7	-41,0	-47,5	-161,1	-125,0
	140	-60,3	-41,5	-71,8	-33,8	-117,1	-156,4
	150	-67,8	-36,1	-37,7	-43,2	-113,7	-138,4
	160	-56,6	-40,7	-45,9	-92,9	-125,9	-187,7
	170	-46,3	-32,2	-55,8	-98,4	-85,1	-228,3

Tabel 4.7 merupakan nilai *residual stress* pada arah *axial* dari setiap variasi pembebanan yang digunakan. Kemudian dari tabel diatas akan didapatkan grafik hubungan antara gaya dan *residual stress* yang bertujuan untuk mengetahui pengaruh besarnya gaya terhadap *radial residual stress*. Berikut adalah grafik berdasarkan tabel 4.7.



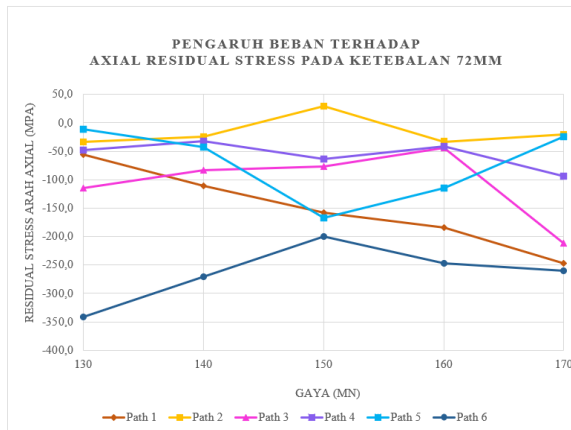
Gambar 4. 46 Pengaruh gaya terhadap axial *residual stress* ketebalan 71mm

Grafik 4.46 merupakan grafik hubungan antara pengaruh besar gaya atau pembebanan terhadap *axial residual stress*. Dimana yang terlihat pada Gambar 4.46 grafik yang dihasilkan mengalami fluktuasi yang disebabkan oleh beberapa faktor antara lain faktor distorsi pada *mesh* atau elemen yang digunakan pada simulasi dan faktor berikutnya adalah keterbatasan cakupan pengamatan dengan *path*. Analisis menggunakan *path* terbatas pada satu garis saja dan nilai yang didapat bergantung pada nilai *node* atau elemen terdekat yang dilalui oleh *path*. Namun kelebihan menggunakan *path* adalah analisis memberikan hasil yang spesifik.

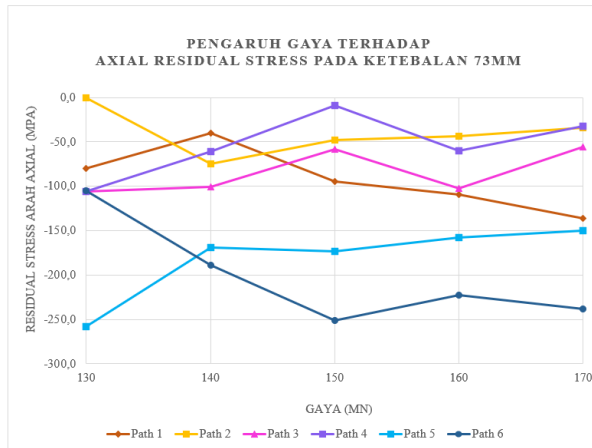
Dari hasil *forging* didapatkan bahwa pada *path 1*, *path 2*, *path 3*, *path 4* dan *path 6* memiliki *trandline residual stress* yang cenderung naik. Sedangkan dan *path 5* memiliki *trandline* turun *Trandline* yang cenderung turun menunjukkan bahwa kenaikan nilai *residual stress* yang bersifat tekan pada arah *axial*.

Berdasarkan grafik, didapatkan jika dilihat dari naik turunnya *trandline axial residual stress* bagian roda kereta didapat bahwa semakin besar gaya yang diberikan, maka bagian *hub*, *web* dan *rim* mengalami penurunan nilai *compressive residual stress* arah *axial*.

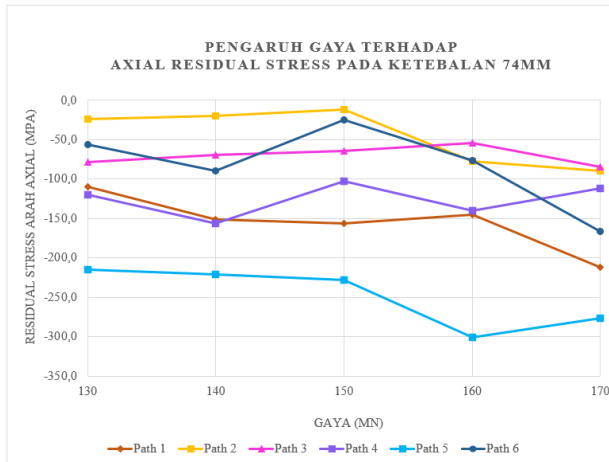
Hal ini tidak sesuai dengan penjelasan pada distribusi *axial residual stress* yang ditunjukkan oleh Gambar 4.44 dan Gambar 4.45 dimana terdapat peningkatan nilai *compressive residual stress* pada bagian roda yaitu *hub*, *web* dan *rim*. Dimana pada bagian *hub* terjadi peningkatan dari 81,392MPa menjadi 38,22MPa, bagian *web* dari -289,35MPa menjadi -373,44MPa, dan bagian *rim* dari 81,392Mpa menjadi -147,66Mpa. Ketidak sesuaian ini terjadi karena yang ditinjau pada grafik adalah *path* dari ketebalan 71mm hingga ketebalan 75mm. Sedangkan pada distribusi residual stress yang ditinjau adalah seluruh body dari ketebalan 74mm hingga 75mm. Selain itu pada bagian *hub* dan *rim* seiring meningkatnya gaya yang diberikan terdapat *residual stress* yang bersifat tarik seiring meningkatnya gaya, hal ini tidak sesuai dengan prinsip bahwa adanya peningkatan nilai *residual stress* pada arah aksial ini lurus dengan besar gaya yang diberikan, terlebih pengamatan tegangan sisa aksial pada *billet* ini memiliki arah yang sama dengan arah pembebanan pada proses *forging*.



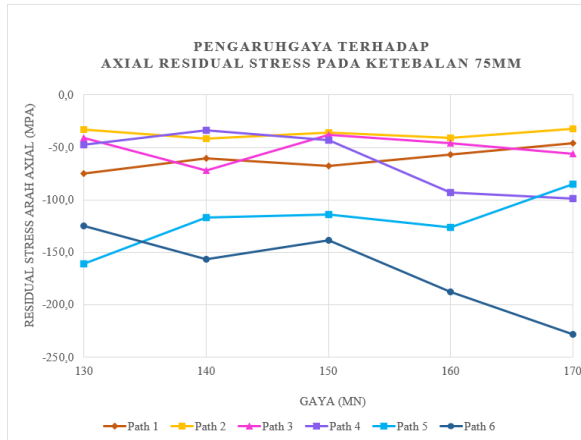
Gambar 4. 47 Pengaruh gaya terhadap axial *residual stress* ketebalan 72mm



Gambar 4. 48 Pengaruh gaya terhadap axial *residual stress* ketebalan 73mm



Gambar 4. 49 Pengaruh gaya terhadap axial *residual stress* ketebalan 74mm



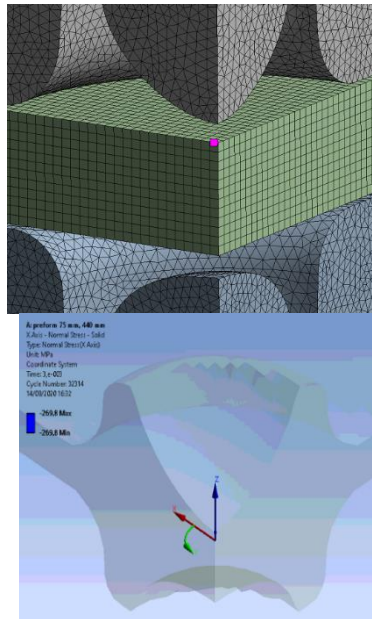
Gambar 4. 50 Pengaruh gaya terhadap axial *residual stress* ketebalan 75mm

4.5. Superposisi *Normal Stress Prefoming* dan *Final Forging*

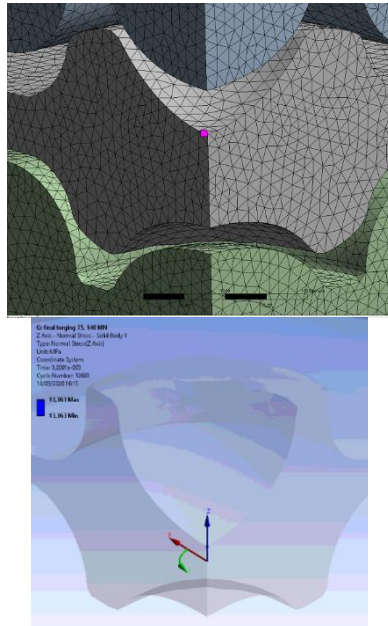
Pada proses *prefoming* yang dilakukan pada tahap pertama membentuk *billet* seperti pada Gambar 4.1 dan dilanjutkan ke tahap berikutnya yaitu *final forging* seperti Gambar 4.2. Dimana ketika *billet* pada tahap pertama terbentuk menghasilkan deformasi plastis dengan nilai *residual stress* lalu seharusnya nilai *residual stress* yang sudah ada ini di transfers ke tahap berikutnya yaitu *final forging* yang nantinya akan ikut diperhitungkan pada tahap kedua. Namun langkah tersebut belum bisa dilakukan oleh penulis karna penulis belum menemukan cara untuk menstransfer *residual stress* pada Ansys yang terbentuk pada tahap *pre-form*. Hal ini menjadi kekurangan pada analisis *residual stress* karena pada saat porses ekspor hasil *billet preform*, nilai *residual* tidak ikut terekspor ke tahap *final forging* yang artinya kondisi tegangan menjadi 0 atau geometri terbaca menjadi pemodelan yang baru. Untuk mengatasi hal ini, upaya yang dilakukan untuk mengikut sertakan *residual stress* yang dihasilkan pada tahap *pre-foming* adalah dengan

superposisi tegangan yang dilakukan secara manual. Namun superposisi ini dapat dilakukan apabila bentuk elemen dari *pre-forming* sama dengan *final forging*. Sehingga nilai *residual stress* bisa diamati melalui *node* yang sama pada kedua tahap yang telah ditentukan posisi dan nomor nodenya. Pada kenyataannya dalam pemodelan *final forging* terjadi *remeshing* sehingga bentuk *mesh* dan elemennya berubah. Oleh karena itu superposisi tegangan tahap *pre-forming* dan *final forging* yang terbaca dari *node – node* tidak bisa dilakukan.

Salah satu contoh superposisi yang dapat dilakukan pada proses simulasi ini adalah dengan memilih *node* yang berada pada pojok geometri seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4.51. karena pada bagian pojok geometri pada tahap *pre-forming* dan *final forging* merupakan posisi yang sama dan *node* yang terbaca adalah sama.



Gambar 4. 51 *Node* tahap *pre-forming*



Gambar 4. 52 *Node* tahap *final forging*
Normal stress arah radial (sumbu x) tahap *pre-forming*
 dijumlahkan dengan *normal stress* arah radial tahap *final forging*
 atau bisa tuliskan seperti

$$-269,8\text{MPa} + 13,363\text{MPa} = -265,437\text{MPa}$$

(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dapat disimpulkan sebagai berikut.

Setelah dilakukannya proses *forging* roda kereta dengan variasi ketebalan *billet* dan besar gaya atau pembebanan yang digunakan pada simulasi ini. Didapatkan pengaruh ketebalan *billet* awal terhadap proses *forging* yaitu semakin tebal *billet forging*, maka geometri semakin sesuai dengan cetakan dan nilai *compressive residual stress* pada arah radial dan arah *circumferential* naik pada bagian *web* dan turun pada bagian *hub* dan *rim*. Sedangkan pada arah *axial* nilai *compressive residual stress* turun pada bagian *hub* dan naik pada bagian *web* dan *rim*. Selanjutnya adalah pengaruh gaya atau pembebanan pada proses *forging* yaitu semakin besar gaya *forging*, maka geometri juga semakin sesuai dengan cetakan dan nilai *compressive residual stress* pada arah radial dan arah *axial* turun pada bagian *hub web* dan *rim*. Sedangkan pada arah *circumferential* nilai *compressive residual stress* turun pada bagian *hub* dan naik pada bagian *web* dan *rim*. Kemudian didapatkan konfigurasi variasi yang menghasilkan bentuk roda paling baik dibandingkan konfigurasi lainnya, yaitu *forging* dengan ketebalan awal *billet* 75mm dengan gaya *forging* 140MN dengan *residual stress* yang dihasilkan bersifat kompresi pada bagian roda yaitu *hub*, *web* dan *rim* baik pada arah *radial*, *axial* dan *circumferential*.

5.2. Saran

Setelah dilakukan penelitian ini, terdapat beberapa saran dari penulis agar penelitian berikutnya menjadi lebih baik, yaitu:

1. Pemilihan bentuk cetakan di *first stage of forging* perlu diperhatikan agar distribusi material lebih merata harapannya *compressive residual stress* lebih merata.
2. Perlu dilakukannya simulasi menggunakan komputer dengan spesifikasi lebih tinggi sehingga ukuran *mesh* bisa lebih kecil lagi.
3. Perlu menggunakan *mesh* yang lebih baik agar tidak terjadi distorsi pada hasil simulasi.
4. Mencari dasar teori yang lebih banyak dan berhubungan dengan *software* yang digunakan.

DAFTAR PUSTAKA

- Azom. (2013). AISI 4340 Alloy Steel (UNS G43400). *Azo Materials*, 1–4.
<http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=3352>
- Battin A.A. 2009. *Finite Element Analysis of Forging*. The University of Texas Arlington.
- Byrer, TG. (1985), *Forging a Handbook, Forging Industry Association.*, Cleveland, Ohio.
- Chandrasekaran, M. (2010). *Forging of metals and alloys for biomedical applications. Metals for Biomedical Devices, 235–250*
- Darmawan. (2001). *Teknologi jalan rel*. Bandung: Percetakan Jatayu.
- Esveld, Coenraad. (2001). *Modern railway track* (2nd ed). Zaltbommel: MRT- Productions.
- Fauzan, S. G. (2018). *Makalah Pemilihan Bahan dan Proses Roda Kereta Api*. Politeknik Manufaktur Negeri Bandung.
- Hartono. (2011Sept). *Pengalaman menggunakan roda kereta api dan harapan penggunaan produk lokal*. Makalah disampaikan pada seminar pengembangan sistem transportasi di Indonesia, Bandung.
- Hibbeler, R. C. (2011). *Mechanics of Materials* (Eight Edit). Pearson Prentice Hall.
- Hsia, S. Y., & Chou, Y. T. (2015). Fabrication improvement of cold forging hexagonal nuts by computational analysis and experiment verification. *Mathematical Problems in Engineering, 2015*. <https://doi.org/10.1155/2015/835038>

- Iskandar, Norman (2012) *Analisa Cacat Dimensi Pada Miniatur Produk Hasil Proses Cold Upset Forging*. Masters thesis, Program Pascasarjana Undip
- Kalpakkjian Serope., Steven. R.S., (2001), *Manufacturing Engineering and Technology*, Fourth Edition, Prentice-Hall. Inc.
- Lange, K. 1985, "Handbook of Metal Forming", MC Graw - Hill, New Jersey.
- Meyers, M. A. (1994). *Shear Bands: Metallurgical Aspects*. In *Dynamic Behavior of Materials*. <https://books.google.com.au/books?id=WoEDHrTOhoC>
- Murjito, ST., MT. 2006. Analisis perancangan cetakan untuk mencegah kegagalan pada proses tempa (Forging). Universitas Muhamadiyah
- Necaticora, O. (2004). *Friction Analysis in Cold Forging*. December, 93.
- Nejad, M. R. (2014). Using three - dimensional finite element analysis for simulation of *residual stresses* in railway wheels. *Echool of Mechanical Engineering*. Sharif University of Technologi. Tehran. Iran
- Pratomo, S., Taufiq, H., Afrilinda, E., & Doloksaribu, M. (2016). Pengembangan Material Tapak Roda Kereta Api Impor Dengan Penambahan Paduan Dan Perlakuan Panas Normalisasi Pendinginan Kipas. *Indonesian Journal of Industrial Research*, 10(2), 83–91.
- Pujianksono, B. (1996). *Pengukuran Tegangan Sisa dengan Metoda Defleksi dan Difraksi Sinar-X* (pp. 74–79).

- Raines, T. (2013). *Forging Vs. Casting : Wich is Better?*
- Roque, C. M. O. L., & Button, S. T. (2000). Application of the finite element method in cold forging processes. *Revista Brasileira de Ciencias Mecanicas/Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences*, 22(2), 189–202. <https://doi.org/10.1590/S0100-73862000000200005>
- Shen, X. hui, Chen, W., Yan, J., Zhang, L., & Zhang, J. (2015). Experiment and simulation of metal flow in multi-stage forming process of railway wheel. *Journal of Iron and Steel Research International*, 22(1), 21–29. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(15\)60004-8](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(15)60004-8)
- Pratomo, Sri Bimo., Taufiq, Husein, (2016), Development Of Imported Train Wheel
- Steelforging. (2007). *How does How Does Steel Forging Increase Strength.*
- Tarafderi, S., Sivaprasad, S., Ranganath, V.R. (2007). Comparative assessment of fatigue and fracture behavior of cast and forged railway wheels. *Journal of Wear* 167, 190-195
- Wang, Y., & Fang, G. (2011). Research on hot forging process of C-grade steel train wheel by FEM. *Advanced Materials Research*, 160–162, 492–497. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.160-162.492>
- Williams, J., & Fatemi, A. (2007). Fatigue performance of forged steel and ductile cast iron crankshafts. *SAE Technical Papers*, 1–32. <https://doi.org/10.4271/2007-01-1001>
- <http://www.steelforging.org/how-does-steel-forging-increase-strength/>

*Lampiran 1*Tabel Dimensi Hasil Simulasi *Pre-Forming* dan *Final Forging*

PARAMETER			PREFORM			FINAL FORGING		
TEBAL (mm)	BEBAN PREFOM (MN)	BEBAN FINAL FORGING (MN)	HUB	WEB	RIM	HUB	WEB	RIM
71	240	130	170,4	33,5	120,3	174,7	25,5	130,3
71		140	170,4	33,5	120,3	174,8	24,4	129,2
71		150	170,4	33,5	120,3	174,6	23,7	131,5
71		160	170,4	33,5	120,3	174,8	22,7	132,4
71		170	170,4	33,5	120,3	174,8	22,3	133,1
72		130	171,0	33,6	122,1	175,1	25,5	132,8
72		140	171,0	33,6	122,1	174,9	24,6	133,2
72		150	171,0	33,6	122,1	174,8	23,9	133,7
72		160	171,0	33,6	122,1	174,6	23,2	134,3
72		170	171,0	33,6	122,1	174,3	22,7	134,7
73		130	180,0	35,3	117,6	176,7	27,5	132,2
73		140	180,0	35,3	117,6	176,1	27,2	132,7
73		150	180,0	35,3	117,6	174,4	26,9	133,0
73		160	180,0	35,3	117,6	175,1	26,7	134,0
73		170	180,0	35,3	117,6	174,7	26,6	134,4
74		130	173,0	37,7	113,5	177,8	29,5	131,4
74		140	173,0	37,7	113,5	176,3	29,1	132,4
74		150	173,0	37,7	113,5	177,4	28,7	133,1
74		160	173,0	37,7	113,5	177,2	28,4	134,1
74		170	173,0	37,7	113,5	176,6	27,5	134,7
75		130	183,0	33,9	125,2	177,2	27,5	136,8
75		140	183,0	33,9	125,2	177,1	27,4	136,8
75		150	183,0	33,9	125,2	176,9	27,3	136,8
75		160	183,0	33,9	125,2	176,7	27,4	136,8
75		170	183,0	33,9	125,2	176,2	27,3	136,6

Lampiran 2

Nilai *Residual stress* Arah Radial

Gaya (MN)	Ketebalan (mm)	Nilai Radial <i>Residual Stress</i> (Mpa)					
		Path 1	Path 2	Path 3	Path 4	Path 5	Path 6
130	71	-583,8	-107,0	-421,2	-207,2	-252,0	-620,9
	72	-597,1	-311,7	-473,3	-341,4	-371,5	-743,6
	73	-721,4	-166,4	-481,7	-319,8	-473,9	-485,7
	74	-562,0	-165,1	-685,6	-488,8	-410,1	-261,9
	75	-655,1	-178,5	-8,5	-444,4	-945,8	-901,5
140	71	-513,8	-264,2	-347,2	-180,1	2,4	-713,8
	72	-650,4	-110,8	-459,9	-268,1	-319,1	-583,0
	73	-628,2	-201,4	-365,0	-352,2	-411,6	-448,2
	74	-592,7	-166,5	-506,5	-554,8	-449,0	-307,6
	75	-680,0	-201,7	-69,2	-156,8	-220,7	-89,6
150	71	-698,0	-200,7	-406,1	-228,6	-217,0	-783,8
	72	-580,4	-375,3	-397,9	-152,7	-128,2	-605,7
	73	-395,7	-426,5	-302,4	-432,7	-372,9	-531,7
	74	-766,3	-91,8	-438,3	-487,4	-387,7	-307,5
	75	-638,7	-26,0	-73,7	-484,9	-826,9	-915,1
160	71	-643,2	-121,9	-346,8	-266,2	-280,5	-667,5
	72	-549,7	-314,7	-395,0	-250,7	-266,7	-622,6
	73	-124,5	-407,9	-269,3	-495,4	-433,3	-562,7
	74	-683,0	-275,4	-364,8	-702,5	-577,7	-352,0
	75	-712,4	-182,0	-241,5	-616,2	-881,1	-1013,3
170	71	-495,6	-283,8	-373,8	-297,6	-376,4	-613,5
	72	-142,9	-290,1	-133,5	-307,3	-176,0	-480,9
	73	-109,7	-429,6	-207,8	-669,5	-516,3	-580,1
	74	-637,9	-214,4	-253,2	-717,2	-517,6	-303,7
	75	-721,5	-124,4	-342,8	-651,9	-837,3	-1080,2

Gaya (MN)	Ketebalan (mm)	Nilai Radial <i>Residual Stress</i> (Mpa)					
		Path 1	Path 2	Path 3	Path 4	Path 5	Path 6
130	71	-583,8	-107,0	-421,2	-207,2	-252,0	-620,9
	72	-597,1	-311,7	-473,3	-341,4	-371,5	-743,6
	73	-721,4	-166,4	-481,7	-319,8	-473,9	-485,7
	74	-562,0	-165,1	-685,6	-488,8	-410,1	-261,9
	75	-655,1	-178,5	-8,5	-444,4	-945,8	-901,5
140	71	-513,8	-264,2	-347,2	-180,1	2,4	-713,8
	72	-650,4	-110,8	-459,9	-268,1	-319,1	-583,0
	73	-628,2	-201,4	-365,0	-352,2	-411,6	-448,2
	74	-592,7	-166,5	-506,5	-554,8	-449,0	-307,6
	75	-680,0	-201,7	-69,2	-156,8	-220,7	-89,6
150	71	-698,0	-200,7	-406,1	-228,6	-217,0	-783,8
	72	-580,4	-375,3	-397,9	-152,7	-128,2	-605,7
	73	-395,7	-426,5	-302,4	-432,7	-372,9	-531,7
	74	-766,3	-91,8	-438,3	-487,4	-387,7	-307,5
	75	-638,7	-26,0	-73,7	-484,9	-826,9	-915,1
160	71	-643,2	-121,9	-346,8	-266,2	-280,5	-667,5
	72	-549,7	-314,7	-395,0	-250,7	-266,7	-622,6
	73	-124,5	-407,9	-269,3	-495,4	-433,3	-562,7
	74	-683,0	-275,4	-364,8	-702,5	-577,7	-352,0
	75	-712,4	-182,0	-241,5	-616,2	-881,1	-1013,3
170	71	-495,6	-283,8	-373,8	-297,6	-376,4	-613,5
	72	-142,9	-290,1	-133,5	-307,3	-176,0	-480,9
	73	-109,7	-429,6	-207,8	-669,5	-516,3	-580,1
	74	-637,9	-214,4	-253,2	-717,2	-517,6	-303,7
	75	-721,5	-124,4	-342,8	-651,9	-837,3	-1080,2

Lampiran 3

Nilai *Residual stress* Arah *Circumferential*

Gaya (MN)	Ketebalan (mm)	Nilai <i>Circumferential Residual Stress</i> (Mpa)					
		Path 1	Path 2	Path 3	Path 4	Path 5	Path 6
130	71	-583,8	-107,0	-421,2	-207,2	-252,0	-620,9
	72	-597,1	-311,7	-473,3	-341,4	-371,5	-743,6
	73	-721,4	-166,4	-481,7	-319,8	-473,9	-485,7
	74	-562,0	-165,1	-685,6	-488,8	-410,1	-261,9
	75	-655,1	-178,5	-8,5	-444,4	-945,8	-901,5
140	71	-513,8	-264,2	-347,2	-180,1	2,4	-713,8
	72	-650,4	-110,8	-459,9	-268,1	-319,1	-583,0
	73	-628,2	-201,4	-365,0	-352,2	-411,6	-448,2
	74	-592,7	-166,5	-506,5	-554,8	-449,0	-307,6
	75	-680,0	-201,7	-69,2	-156,8	-220,7	-89,6
150	71	-698,0	-200,7	-406,1	-228,6	-217,0	-783,8
	72	-580,4	-375,3	-397,9	-152,7	-128,2	-605,7
	73	-395,7	-426,5	-302,4	-432,7	-372,9	-531,7
	74	-766,3	-91,8	-438,3	-487,4	-387,7	-307,5
	75	-638,7	-26,0	-73,7	-484,9	-826,9	-915,1
160	71	-643,2	-121,9	-346,8	-266,2	-280,5	-667,5
	72	-549,7	-314,7	-395,0	-250,7	-266,7	-622,6
	73	-124,5	-407,9	-269,3	-495,4	-433,3	-562,7
	74	-683,0	-275,4	-364,8	-702,5	-577,7	-352,0
	75	-712,4	-182,0	-241,5	-616,2	-881,1	-1013,3
170	71	-495,6	-283,8	-373,8	-297,6	-376,4	-613,5
	72	-142,9	-290,1	-133,5	-307,3	-176,0	-480,9
	73	-109,7	-429,6	-207,8	-669,5	-516,3	-580,1
	74	-637,9	-214,4	-253,2	-717,2	-517,6	-303,7
	75	-721,5	-124,4	-342,8	-651,9	-837,3	-1080,2

Ketebalan (mm)	Gaya (MN)	Nilai Circumferential <i>Residual Stress</i> (Mpa)					
		Path 1	Path 2	Path 3	Path 4	Path 5	Path 6
71	130	-583,8	-107,0	-421,2	-207,2	-252,0	-620,9
	140	-513,8	-264,2	-347,2	-180,1	2,4	-713,8
	150	-698,0	-200,7	-406,1	-228,6	-217,0	-783,8
	160	-643,2	-121,9	-346,8	-266,2	-280,5	-667,5
	170	-495,6	-283,8	-373,8	-297,6	-376,4	-613,5
72	130	-597,1	-311,7	-473,3	-341,4	-371,5	-743,6
	140	-650,4	-110,8	-459,9	-268,1	-319,1	-583,0
	150	-580,4	-375,3	-397,9	-152,7	-128,2	-605,7
	160	-549,7	-314,7	-395,0	-250,7	-266,7	-622,6
	170	-142,9	-290,1	-133,5	-307,3	-176,0	-480,9
73	130	-721,4	-166,4	-481,7	-319,8	-473,9	-485,7
	140	-628,2	-201,4	-365,0	-352,2	-411,6	-448,2
	150	-395,7	-426,5	-302,4	-432,7	-372,9	-531,7
	160	-124,5	-407,9	-269,3	-495,4	-433,3	-562,7
	170	-109,7	-429,6	-207,8	-669,5	-516,3	-580,1
74	130	-562,0	-165,1	-685,6	-488,8	-410,1	-261,9
	140	-592,7	-166,5	-506,5	-554,8	-449,0	-307,6
	150	-766,3	-91,8	-438,3	-487,4	-387,7	-307,5
	160	-683,0	-275,4	-364,8	-702,5	-577,7	-352,0
	170	-637,9	-214,4	-253,2	-717,2	-517,6	-303,7
75	130	-655,1	-178,5	-8,5	-444,4	-945,8	-901,5
	140	-680,0	-201,7	-69,2	-156,8	-220,7	-89,6
	150	-638,7	-26,0	-73,7	-484,9	-826,9	-915,1
	160	-712,4	-182,0	-241,5	-616,2	-881,1	-1013,3
	170	-721,5	-124,4	-342,8	-651,9	-837,3	-1080,2

Lampiran 4

Nilai *Residual stress* Arah Axial

Gaya (MN)	Ketebalan (mm)	Nilai Axial <i>Residual Stress</i> (Mpa)					
		Path 1	Path 2	Path 3	Path 4	Path 5	Path 6
130	71	-281,0	-178,2	-113,4	16,7	-151,7	-221,0
	72	-55,9	-34,0	-114,5	-48,1	-10,9	-341,6
	73	-80,2	-0,3	-105,7	-106,3	-258,1	-105,1
	74	-110,0	-23,9	-78,5	-119,9	-215,5	-56,7
	75	-75,1	-32,7	-41,0	-47,5	-161,1	-125,0
140	71	-117,2	-119,8	-114,7	-121,8	-87,3	-221,5
	72	-111,2	-24,4	-83,3	-32,0	-42,8	-270,5
	73	-40,3	-74,5	-100,7	-60,9	-169,2	-189,2
	74	-151,6	-20,2	-69,2	-156,8	-220,7	-89,6
	75	-60,3	-41,5	-71,8	-33,8	-117,1	-156,4
150	71	-193,4	-97,7	-106,4	-27,9	-81,7	-138,7
	72	-158,4	29,6	-77,1	-63,5	-167,5	-200,5
	73	-95,0	-47,5	-58,3	-9,0	-173,3	-251,3
	74	-156,6	-12,1	-64,5	-103,2	-227,9	-25,2
	75	-67,8	-36,1	-37,7	-43,2	-113,7	-138,4
160	71	-103,2	-49,5	-96,4	-8,8	-97,0	-65,3
	72	-183,7	-32,9	-44,6	-41,8	-115,1	-246,5
	73	-109,7	-43,4	-102,7	-60,1	-157,8	-223,0
	74	-144,7	-77,1	-54,0	-140,2	-300,9	-76,8
	75	-56,6	-40,7	-45,9	-92,9	-125,9	-187,7
170	71	-103,4	-91,3	-85,5	-22,2	-202,7	-74,1
	72	-246,8	-20,6	-211,5	-93,9	-24,2	-259,8
	73	-135,9	-34,4	-55,7	-32,2	-149,7	-237,9
	74	-211,5	-89,2	-84,4	-112,3	-276,8	-166,8
	75	-46,3	-32,2	-55,8	-98,4	-85,1	-228,3

Ketebalan (mm)	Gaya (MN)	Nilai Axial Residual Stress (Mpa)					
		Path 1	Path 2	Path 3	Path 4	Path 5	Path 6
71	130	-281,0	-178,2	-113,4	16,7	-151,7	-221,0
	140	-117,2	-119,8	-114,7	-121,8	-87,3	-221,5
	150	-193,4	-97,7	-106,4	-27,9	-81,7	-138,7
	160	-103,2	-49,5	-96,4	-8,8	-97,0	-65,3
	170	-103,4	-91,3	-85,5	-22,2	-202,7	-74,1
72	130	-55,9	-34,0	-114,5	-48,1	-10,9	-341,6
	140	-111,2	-24,4	-83,3	-32,0	-42,8	-270,5
	150	-158,4	29,6	-77,1	-63,5	-167,5	-200,5
	160	-183,7	-32,9	-44,6	-41,8	-115,1	-246,5
	170	-246,8	-20,6	-211,5	-93,9	-24,2	-259,8
73	130	-80,2	-0,3	-105,7	-106,3	-258,1	-105,1
	140	-40,3	-74,5	-100,7	-60,9	-169,2	-189,2
	150	-95,0	-47,5	-58,3	-9,0	-173,3	-251,3
	160	-109,7	-43,4	-102,7	-60,1	-157,8	-223,0
	170	-135,9	-34,4	-55,7	-32,2	-149,7	-237,9
74	130	-110,0	-23,9	-78,5	-119,9	-215,5	-56,7
	140	-151,6	-20,2	-69,2	-156,8	-220,7	-89,6
	150	-156,6	-12,1	-64,5	-103,2	-227,9	-25,2
	160	-144,7	-77,1	-54,0	-140,2	-300,9	-76,8
	170	-211,5	-89,2	-84,4	-112,3	-276,8	-166,8
75	130	-75,1	-32,7	-41,0	-47,5	-161,1	-125,0
	140	-60,3	-41,5	-71,8	-33,8	-117,1	-156,4
	150	-67,8	-36,1	-37,7	-43,2	-113,7	-138,4
	160	-56,6	-40,7	-45,9	-92,9	-125,9	-187,7
	170	-46,3	-32,2	-55,8	-98,4	-85,1	-228,3

*Lampiran 5***BIODATA PENULIS**

Penulis bernama Roze Windu Yuni Syarah, dilahirkan di Sumenep, 14 Juni 1998, merupakan anak kedua dari 2 saudara. Penulis menempuh pendidikan formal yaitu TK Al-Amien Karanganyar, SDN 1 Karanganyar, SMPN 5 Sumenep, SMAN 1 Sumenep. Setelah lulus dari SMAN 1 Sumenep pada tahun 2016, Penulis mengikuti SNMPTN dan diterima di Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS pada tahun 2016 dan terdaftar dengan NRP. 0211164000039.

Di jurusan Teknik Mesin ini Penulis mengambil Bidang Studi Desain. Penulis juga aktif dalam kegiatan akademik maupun organisasi kemahasiswaan, Penulis aktif menjadi anggota di Divisi Kewirausahaan Lembaga Bengkel Mahasiswa Mesin (LBMM) pada tahun 2017 hingga tahun 2020. Penulis mempunyai motto hidup *“Tidak gampang takluk oleh kegagalan, terus menciptan momen kebangkitan”*. Untuk semua informasi tentang kritik dan saran terkait tugas akhir ini dapat menghubungi penulis melalui email rozewinduyn@gmail.com.