

TUGAS AKHIR - TM 184835

ANALISIS NUMERIK *RESIDUAL STRESS* PADA PROSES *FORGING* RODA KERETA CEPAT

KAFI HANNAN AL HADI
NRP 02111640000015

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

ANALISIS NUMERIK *RESIDUAL STRESS* PADA PROSES *FORGING* RODA KERETA CEPAT

KAFI HANNAN AL HADI
NRP 02111640000015

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

NUMERICAL ANALYSIS OF RESIDUAL STRESS ON THE HIGHSPEED TRAIN WHEEL FORGING PROCESS

KAFI HANNAN AL HADI
NRP 0211164000015

Advisor
Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA

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

HALAMAN PENGESAHAN

ANALISIS NUMERIK *RESIDUAL STRESS* PADA PROSES *FORGING* RODA KERETA CEPAT

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 :

Kafi Hannan Al Hadi

NRP. 02111640000015

Disetujui oleh:

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



SURABAYA
AGUSTUS, 2020

ANALISIS NUMERIK *RESIDUAL STRESS* PADA PROSES *FORGING* RODA KERETA CEPAT

Nama Mahasiswa : Kafi Hannan Al Hadi
NRP : 0211164000015
Departemen : Teknik Mesin FTIRS-ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA

ABSTRAK

Proyek canggih kereta api cepat sedang dikerjakan oleh Pemerintah Indonesia sebagai pertimbangan dalam pemenuhan akan moda transportasi cepat dan sebagai penunjang keberhasilan pembangunan Negara Indonesia sebagai negara yang memiliki cita-cita menjadi negara maju. Kereta cepat yang saat ini dibangun di Indonesia merupakan kerja sama dengan Tiongkok dan memiliki kecepatan operasional mencapai 300 km/jam. Sistem roda dan lintasan dari kereta cepat ini berbeda dengan kereta kecepatan rendah dan kecepatan menengah. Proses manufaktur yang ada di Indonesia untuk memproduksi roda kereta masih menggunakan metode produksi dengan cara *casting* atau pengecoran. Penggunaan metode *casting* dalam memproduksi roda kereta ini memiliki beberapa kekurangan apabila dibandingkan dengan metode *forging*. Kekuatan material yang dihasilkan melalui proses *forging* lebih tinggi daripada yang dihasilkan melalui proses *casting*. Suatu produk yang dibentuk melalui proses *forging* akan memiliki kekuatan *tensile*, dan kekuatan *fatigue* yang lebih tinggi apabila dibandingkan dengan produk yang dibuat dengan cara *casting*. Kekuatan *fatigue* tersebut terjadi karena adanya *compressive residual stress* yang ada pada produk hasil dari proses *forging*. Sebelum merancang proses produksi roda kereta dengan proses *forging*, perlu untuk menganalisa terlebih dahulu bagaimana rancangan proses yang tepat untuk menghasilkan roda kereta dengan karakteristik yang sesuai, dan dapat menghemat dalam segi ekonomi. Salah satu faktor yang harus dipertimbangkan adalah *residual stress* yang ada pada roda kereta hasil proses *forging*. *Residual stress* yang berupa *circumferential/hoop*

compressive stress yang ada pada roda kereta ini akan meningkatkan *fatigue life*, karena dapat mencegah terjadinya inisiasi *crack* pada roda kereta akibat pembebanan pada saat operasional, dan pembebanan pada saat pengereman. Oleh karena itu, perlu adanya analisa terkait *residual stress* tersebut untuk membantu dalam menganalisa rancangan proses *forging* roda kereta yang tepat.

Material roda kereta cepat yang digunakan dalam penelitian ini adalah material D1 medium *carbon steel* yang digunakan pada *China Railway Highspeed* (CHR), dan dimensi mengacu pada standard S1002CN yang digunakan sebagai standart kereta cepat di Iran. Proses *forging* yang digunakan dalam penelitian ini adalah *cold forging* dengan analisa metode elemen hingga. Tahapan pada penelitian ini adalah proses pemodelan 3D mesin *forging* dan *billet*, simulasi menggunakan *explicit dynamic* pada *software* elemen hingga, *meshing*, *set up*, dan analisa hasil. Hasil yang akan dianalisa pada penelitian ini adalah *residual stress*, dan juga akurasi dari geometri roda kereta yang dihasilkan dengan proses *cold forging*. Untuk mendapatkan analisa hasil tersebut, maka perlu untuk menetapkan beberapa variabel yang divariasikan. Pada penelitian ini memvariasikan ketebalan *billet* dengan tebal 70mm, 72mm, 74mm, 76mm, dan 78mm. Selain itu, pada penelitian ini juga memvariasikan besar gaya *forging* sebesar 200MN, 230MN, 260MN, 290MN, 320MN. Tujuan dari variasi ini adalah untuk mengamati bagaimana pengaruh ketebalan *billet*, dan gaya *forging* yang digunakan terhadap *residual stress* yang dihasilkan pada geometri roda kereta.

Dari penelitian ini didapatkan hasil bahwa nilai maksimum tegangan residual yang bersifat kompresi pada arah aksial memiliki peningkatan seiring dengan penambahan besar gaya *forging* yang diberikan. Peningkatan nilai maksimum tegangan residual yang bersifat kompresi pada arah aksial ini dapat diamati pada semua lokasi pengamatan, yaitu pada lokasi R/5 hingga R pada arah radial *billet* roda kereta. Selain itu, nilai maksimum tegangan sisa yang bersifat kompresi pada arah aksial ini memiliki kecenderungan

semakin menurun, seiring dengan penggunaan *billet* awal yang semakin tebal, dengan diameter *billet* yang sama, dan juga menggunakan besar gaya *forging* yang sama.

Selanjutnya, Nilai maksimum tegangan sisa yang bersifat kompresi pada arah radial memiliki penurunan seiring dengan penambahan besar gaya *forging* yang diberikan. Namun, nilai maksimum tegangan sisa yang bersifat kompresi pada arah radial ini memiliki kecenderungan untuk semakin naik seiring dengan penggunaan *billet* awal yang semakin tebal. Pada arah *circumferential*, nilai maksimum tegangan sisa yang bersifat kompresi memiliki penurunan, terutama pada bagian rim, seiring dengan penambahan besar gaya *forging* yang diberikan, dan juga penggunaan *billet* awal yang semakin tebal. Pada penelitian ini juga dapat diamati bahwa perencanaan proses *forging* roda kereta cepat, dengan ketepatan geometri yang bagus, dihasilkan dengan menggunakan ketebalan *billet* awal sebesar 74mm hingga 78mm, dengan diameter *billet* 430mm, dan gaya *forging* sebesar 260MN hingga 320MN.

Kata Kunci: *Forging*, *Residual Stress*, Roda Kereta Cepat, Elemen Hingga

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

NUMERICAL ANALYSIS OF RESIDUAL STRESS ON THE HIGHSPEED TRAIN WHEEL FORGING PROCESS

Student Name : Kafi Hannan Al Hadi
Student ID : 0211164000015
Department : Mechanical Engineering FTIRS-ITS
Academic Advisor : Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA

ABSTRACT

Highspeed railroad project is being undertaken as a consideration in fulfilling the mode of rapid transportation and as a support for the successful development of the State of Indonesia as a country that has aspirations to become a developed country. The fast train currently being built in Indonesia is a collaboration with China and has an operational speed of up to 300 km / hour. The wheel and track system of this fast train is different from the low speed and medium speed trains. The manufacturing process in Indonesia to produce train wheels still uses the production method by casting or casting. The use of casting methods in producing this train wheel has several disadvantages when compared to the forging method. The strength of the material produced through the forging process is higher than that produced through the casting process. Before designing the train wheel production process with the forging process, it is necessary to first analyze how to design the right process to produce a wheeled carriage with the appropriate characteristics and can save economically. One of the factors that must be considered is the residual stress on the wheels of the forging process. Residual stress in the form of circumferential / hoop compressive stress that exists on the wheels of this train will increase fatigue life, because it can prevent the initiation of cracks on the train wheels due to loading during operations, and loading during braking. Therefore, it is necessary to have an analysis related to the residual stress to help in analyzing the design of the right wheel forging process.

The fast train wheel material used in this study is D1 medium carbon steel material used in China Railway Highspeed (CHR), and the dimensions refer to the S1002CN standard which is used as a standard fast train in Iran. The forging process used in this study is cold forging with the finite element analysis method. The stages in this research are the 3D modeling process forging and billet machines, simulations using explicit dynamic on finite element software, meshing, set up, and analyzing the results. The results to be analyzed in this study are residual stress, and also the accuracy of the geometry of the wheel axle produced by the cold forging process. To get an analysis of these results, it is necessary to set a number of variables that are varied. In this study, varying the thickness of billets with a thickness of 70mm, 72mm, 74mm, 76mm, and 78mm. In addition, this study also varied the forging force of 200MN, 230MN, 260MN, 290MN, 320MN. The purpose of this variation is to observe how the influence of the thickness of the billet, and the forging force used on the residual stress generated in the geometry of the train wheels.

From this research, the results show that the maximum value of the residual stress that is compression in the axial direction has an increase along with the addition of a large force forging applied. An increase in the maximum value of the compressive residual stress in the axial direction can be observed at all observation locations, namely at locations R/5 to R in the radial direction of the train wheel billet. In addition, the maximum value of the residual stress that is compression in the axial direction has a tendency to decrease, along with the use of the initial billet that is getting thicker, with the same billet diameter, and also uses the same forging force.

Furthermore, the maximum value of compressive residual stress in the radial direction has decreased along with the large addition of the forging force applied. However, the maximum value of the residual stress that is compression in the radial direction has a tendency to increase along with the use of the initial billet which is getting thicker. In the circumferential direction, the maximum

value of the compressed residual stress has a decrease, especially in the rim, along with the large addition of the forging force applied, and also the use of the initial billet which is getting thicker. In this study it can also be observed that the planning of the fast train wheel forging process, with good geometrical accuracy, is produced using an initial billet thickness of 74mm to 78mm, a billet diameter of 430mm, and a forging force of 260MN to 320MN.

Keywords: Forging, Residual Stress, Highspeed Train Wheel, Finite Element

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah Subhanallahu Wa Ta'ala atas rahmat-Nya penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini. Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi persyaratan kelulusan pendidikan Sarjana S-1 di Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penyusunan Tugas Akhir ini dapat terlaksana dengan baik atas bantuan dan kerjasama dari berbagai pihak. Pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua penulis yang senantiasa memberi dukungan, semangat, doa dan nasihat untuk penulis.
2. Kakak penulis beserta keluarga yang selalu memberikan semangat sehingga penulis dapat menyelesaikan perkuliahan dengan baik.
3. Bapak Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA selaku dosen pembimbing tugas akhir ini, terima kasih atas motivasi, dukungan dan bimbingan dengan sangat sabar selama ini sehingga penulis bisa menyelesaikan tugas akhir ini.
4. Prof. Dr. Ir. Abdullah Shahab yang berusaha membimbing penulis selaku mahasiswa perwaliannya dalam perwalian dari awal 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.
6. Mas-mas, mbak-mbak, dan adek-adek LBMM yang telah yang telah mengajarkan/berbagi ilmu otomotif atau organisasi dan khususnya DIVISI KWU yang memberi wejangan dan kepercayaan untuk menjadi lebih baik bagi penulis.
7. Seluruh keluarga besar LBMM yang selalu membanggakan dan istimewa bagi penulis.
8. Mas Oka, Mas Noli, Mas Dzikri, Mas Yusuf, Mas Afis yang menjadi tempat berdiskusi terkait tugas akhir bagi penulis.

9. Saudaraku M59 yang selalu menemani di saat menempuh masa-masa perkuliahan dan membuat banyak cerita.

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

Surabaya, 20 Agustus 2020

Penulis

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xxiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Perumusan Masalah.....	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.3.1 Variabel yang diteliti	3
1.3.2 Variabel yang diabaikan	4
1.4 Tujuan Penelitian.....	4
1.5 Manfaat Penelitian.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Roda Kereta.....	7
2.2 Profil Roda Kereta.....	8
2.3 <i>Forging</i>	9
2.3.1 Sistem Operasi <i>Forging</i>	11
2.3.1.1 Karakteristik Material	12
2.3.1.1 Perkakas dan Peralatan (<i>Tooling and Equipment</i>)	12
2.3.1.2 Gesekan dan Pelumasan pada Interface Cetakan dan Benda Kerja	13
2.3.1.3 Zona Deformasi / Mekanisme Deformasi	13
2.3.1.4 Geometri dan Properti Produk	14
2.3.2 <i>Cold and Warm Forging</i>	14
2.3.3 <i>Isothermal and Hot Die Forging</i>	17
2.3.4 Jenis <i>Forging</i>	21
2.3.4.1 Berdasarkan Jenis Cetakan	21
2.3.4.1.1 Closed Die <i>Forging</i>	21
2.3.4.1.2 Impression Die <i>Forging</i>	22
2.3.4.1.3 Open Die <i>Forging</i>	23
2.3.4.2 Berdasarkan Jenis Mesin <i>Forging</i>	24

2.4	Konsep Tegangan dan Regangan.....	25
2.4.1	Konsep Tegangan	25
2.4.2	Konsep Regangan	27
2.4.3	Hubungan Tegangan dan Regangan	27
2.5	Deformasi Plastis : <i>Strain and Strain Rates</i>	28
2.5.1	Deformasi Lokal dan Bidang Kecepatan	28
2.5.2	Regangan	29
2.5.3	Kecepatan dan Laju Aliran Regangan.....	31
2.6	Deformasi Plastis pada Laju Regangan Tinggi	32
2.7	Rumus Empiris	36
2.8	Tegangan Residual	41
2.8.1	Konsep Tegangan Residual	41
2.8.2	Tegangan Residual pada Roda Kereta	42
2.9	Metode Elemen Hingga	43
2.10	Implementasi Komputer untuk Metode Elemen Hingga 44	
2.11	Ansys <i>Explicit Dynamics</i>	48
2.11.1	Analisa <i>Nonlinear</i>	48
2.11.1.1	Geometri <i>Nonlinear</i>	48
2.11.1.2	Material <i>Nonlinear</i>	49
2.11.1.3	Perubahan Status <i>Nonlinear</i>	50
2.11.2	Pendefinisian Kontak <i>Frictional</i>	51
2.11.3	Penggunaan <i>Mesh</i> pada <i>Explicit Dynamics</i>	52
2.11.4	Pemodelan Johnson-Cook.....	53
2.12	Penelitian Terdahulu.....	54
BAB III METODE PENELITIAN.....		79
3.1	Diagram Alir Penelitian	79
3.2	Observasi.....	80
3.3	Perumusan Permasalahan	80
3.4	Studi Literatur.....	80
3.5	Pengumpulan Data.....	81
3.5.1	Dimensi dan Material	81
3.5.2	Penentuan Ketebalan <i>Billet</i> , dan Besar Gaya <i>Forging</i>	83
3.6	Pemodelan	84

3.7	Simulasi.....	86
3.7.1	Pendefinisian Model	88
3.7.2	<i>Meshing</i>	89
3.7.3	Proses <i>Setup</i>	90
3.7.4	Uji Konvergensi.....	92
3.8	Analisis Simulasi	94
3.9	Verifikasi Pemodelan Johnson-Cook.....	98
3.10	Perbandingan Hasil Mesh Hexahedral dengan Tetrahedral	101
BAB IV PEMBAHASAN.....		105
4.1	Pengaruh Besarnya Gaya Forging terhadap Terbentuknya Tegangan Sisa Kompresi	105
4.2.1	Pengaruh Gaya Terhadap Tegangan Residual pada Arah Aksial	106
4.2.2	Pengaruh Gaya Terhadap Tegangan Residual pada Arah Radial	117
4.2.3	Pengaruh Gaya Terhadap Tegangan Residual pada Arah <i>Circumferential</i>	127
4.2	Pengaruh <i>Ketebalan Billet</i> terhadap Terbentuknya Tegangan Sisa Kompresi.....	139
4.3.1	Pengaruh <i>Ketebalan Billet</i> Terhadap Tegangan Residual pada Arah Aksial	140
4.3.2	Pengaruh <i>Ketebalan Billet</i> Terhadap Tegangan Residual pada Arah Radial	145
4.3.3	Pengaruh <i>Ketebalan Billet</i> Terhadap Tegangan Residual pada Arah <i>Circumferential</i>	149
4.3	Verifikasi Hasil Tegangan Residual Aksial	154
4.4	Superposisi Tegangan Residual pada Tahap <i>Pre</i> <i>Forming</i> dan <i>Final Forging</i>	157
4.5	Ketepatan Geometri pada Tiap Rancangan <i>Forging</i>	164
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....		175
5.1	Kesimpulan.....	175
5.2	Saran.....	176
DAFTAR PUSTAKA		xxv
LAMPIRAN.....		xxvii

BIODATA PENULIS..... xxxi

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Tipe Roda Kereta.....	8
Gambar 2.2 Profil Roda a) Kereta Kargo dan Penumpang (Russia), b) Kereta Cepat (Russia), c) Kereta Industri (Russia), d) Kereta Kargo dan Penumpang (Eropa), (e dan f) Kereta Cepat (Jepang).....	9
Gambar 2.3 Sistem Penempaan (1) Billet, (2) Tooling, (3) Tool/Material Interface, (4) Deformation Zone, (5) Forging Equipment, (6) Product, (7) Plant Environment.....	11
Gambar 2.4 Schematic Illustration of Forming Sequences in Cold Forging of a Gear Blank. (a) Sheared Blank. (b) Simultaneous Forward Rod and Backward Extrusion. (c) Forward extrusion. (d) Backward cup extrusion. (e) Simultaneous upsetting of flange and coining.....	15
Gambar 2.5 Various types of cold forging (extrusion) techniques (P, punch; C, container; W, workpiece; E, ejector)	15
Gambar 2.6 Examples of cold forged tubular or cup-shaped parts	16
Gambar 2.7 Weight reduction obtained by forging a disk by isothermal methods rather than conventional forging. A 60 lb (27 kg) weight reduction was obtained.	20
Gambar 2.8 Comparison between conventional and hot-die forging of a Ti-6Al-4V structural part on the basis of raw material saved.	20
Gambar 2.9 Comparison of various methods of producing torque ribs.	21
Gambar 2.10 Closed Die Forging	22
Gambar 2.11 Impression Die Forging.....	23
Gambar 2.12 Open Die Forging.....	24
Gambar 2.13 (a) Ilustrasi gaya yang bekerja pada suatu struktur (b) Ilustrasi orientasi sumbu masing-masing tegangan.....	26
Gambar 2.14 Kurva Tegangan dan Regangan	28
Gambar 2.15 Metal flow in certain forming processes. (a) Non-steady-state upset forging. (b) Steady-state extrusion.	29

Gambar 2.16 Perpindahan pada bidang x-y	29
Gambar 2.17 <i>Lower yield stress vs. strain rate for mild steel.</i> (From Campbell and Ferguson [2], Fig. 5, p. 68. Reprinted with permission of the publisher.)	33
Gambar 2.18 Pengaruh laju regangan terhadap respons tegangan- regangan (dalam kompresi) dari (a) aluminium 7075-T6 dan (b) paduan Ti-6% Al-4% V	34
Gambar 2.19 Klasifikasi skematis dari teknik pengujian menurut parameter laju regangan	35
Gambar 2. 20 Pengaruh laju regangan pada respons tegangan- regangan (dalam kompresi) dari titanium murni komersial. (Dari MA Meyers, G. Subhash, B. Khad, dan L. Prasad, Mekanika Bahan, 11 (1994) 175). (B) Efek pada tantalum (dari YG Chen, MA Meyers, F. Marquis, dkk.).....	36
Gambar 2.21 Pengaruh dari suhu dan laju regangan terhadap tegangan luluh besi.....	38
Gambar 2.22 Kurva Tegangan-Regangan	42
Gambar 2.23 Diagram Alur Metode Elemen Hingga	47
Gambar 2.24 Diagram alur perbaikan dalam menggunakan metode elemen hingga.....	48
Gambar 2.25 Kurva Tetgangan-Regangan <i>Nonlinear</i>	50
Gambar 2.26 Pengaktifan Elemen Kontak	50
Gambar 2.27 <i>Meshing</i> pada <i>billet</i> 485 kg setelah tahap <i>upsetting</i>	55
Gambar 2.28 Suhu pada radius yang rasio radius yang berbeda yang ada pada <i>billet</i> dengan ketebalan 125 mm	56
Gambar 2.29 Nilai tegangan efektif pada rasio radius yang berbeda pada <i>billet</i> selama proses <i>upsetting</i> menjadi 125 mm ...	57
Gambar 2.30 Aliran material yang ditunjukkan dengan tujuh <i>grid</i> <i>line</i> pada radius $r/8$ hingga $7r/8$ selama proses <i>upsetting</i>	57
Gambar 2.31 Tegangan tekan aksial pada radius yang berbeda..	57
Gambar 2.32 Hasil prediksi dari metode elemen hingga terhadap gaya tekan yang dibutuhkan selama proses <i>upsetting</i>	58
Gambar 2.33 <i>Meshing</i> pada tahap akhir proses <i>forging</i>	59

Gambar 2.34 Aliran material yang terjadi selama proses <i>forging</i> dengan tujuh tingkat garis radius pada <i>billet</i>	59
Gambar 2.35 Perbedaan suhu pada tujuh tingkat radius pada <i>billet</i>	59
Gambar 2.36 Nilai tegangan efektif pada rasio radius yang berbeda pada <i>billet</i> selama proses <i>forging</i> dari ketebalan 125 mm	60
Gambar 2.37 Tegangan tekan aksial pada radius yang berbeda pada tahap <i>forging</i>	60
Gambar 2.38 Gaya yang dibutuhkan untuk proses <i>forging</i> dari ketebalan <i>billet</i> awal yang berbeda dan diameter sama	60
Gambar 2.39 Gaya yang dibutuhkan untuk proses <i>forging</i> dari diameter <i>billet</i> awal yang berbeda dan ketebalan sama	61
Gambar 2.40 Proses penempaan panas roda kereta	62
Gambar 2.41 Perbandingan karakteristik proses <i>forging</i> dengan parameter tinggi <i>billet</i> yang berbeda	63
Gambar 2.42 Perbandingan nilai <i>forming load</i> yang dihasilkan dengan parameter panas yang berbeda	63
Gambar 2.43 <i>Forming load</i> dengan kecepatan <i>forming</i> yang berbeda.....	64
Gambar 2.44 Profil dan dimensi dari tahapan proses <i>forging</i> (a) <i>Upsetting</i> , (b) <i>Pre-forging</i> , (c) <i>Final forging</i> , (d) <i>Rolling</i> , (e) <i>Dishing</i>	65
Gambar 2.45 Posisi dan ukuran pin yang tertanam pada <i>billet</i> roda kereta.....	66
Gambar 2.46 Deformasi pin pada roda kereta	67
Gambar 2.47 Garis aliran dari pin yang diperoleh dari simulasi	67
Gambar 2.48 Garis grid pada beberapa tahapan <i>forging</i>	69
Gambar 2.49 Distribusi ekuivalen regangan plastik pada beberapa tahapan <i>forging</i>	69
Gambar 2.50 Operasi pembentukan roda kereta.....	70
Gambar 2.51 Kondisi awal dan akhir proses <i>forging</i> (a) tahap awal (b) tahap akhir.....	71
Gambar 2.52 Perbandingan antara penggunaan metode (a) <i>least square positioning</i> , (b) <i>univariate interpolation positioning</i>	71

Gambar 2.53 Penggunaan metode perbaikan <i>mesh</i> pada model 3D	72
Gambar 2.54 Contoh penerapan <i>mesh</i> pada model 3D 360° dengan titik tengah sebagai kumpulan antarmuka	73
Gambar 2.55 Bagian spesimen yang digunakan	74
Gambar 2.56 Skema pengujian kompresi hopkinson bar	74
Gambar 2.57 Hasil pengujian material dengan suhu dan laju regangan yang berbeda	75
Gambar 2.58 Perbandingan hasil eksperimen dengan pemodelan Johnson-Cook pada laju regangan 1500/s dan dengan suhu yang berbeda	76
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian	80
Gambar 3.2 Dimensi Roda Kereta yang digunakan	82
Gambar 3.3 Geometri Roda Kereta Cepat	85
Gambar 3.4 Geometri cetakan roda kereta	86
Gambar 3.5 Diagram alir proses simulasi	88
Gambar 3.6 Dimensi Cetakan dan <i>Billet</i> untuk <i>Final Forging</i> ...	89
Gambar 3.7 Dimensi Cetakan Awal untuk <i>Pre Forming</i>	89
Gambar 3.8 <i>Mesh</i> pada <i>billet</i> pada tahap <i>pre forming</i>	90
Gambar 3.9 <i>Mesh</i> pada <i>billet</i> pada tahap <i>final forging</i>	90
Gambar 3.10 Grafik uji konvergensi Tahap <i>Pre Forming</i>	93
Gambar 3.11 Grafik uji konvergensi Tahap <i>Final Forging</i>	94
Gambar 3.12 Pengamatan <i>residual stress</i> pada arah aksial, radial, dan <i>circumferential</i> roda kereta	95
Gambar 3.13 (a) R/5 ; (b) 2R/5 ; (c) 3R/5 ; (d) 4R/5 ; (e) R	97
Gambar 3.14 Pengamatan geometri roda kereta yang dihasilkan	98
Gambar 3.15 Pengamatan verifikasi pemodelan Johnson-Cook.	99
Gambar 3.16 Distorsi pada <i>Mesh Hexahedral</i>	102
Gambar 3.17 Distorsi pada <i>Mesh Tetrahedral</i>	103
Gambar 3.18 <i>Equivalent Stress</i> dengan <i>Mesh Hexahedral</i>	104
Gambar 3.19 <i>Equivalent Stress</i> dengan <i>Mesh Tetrahedral</i>	104

Gambar 4.1 Tegangan Sisa Arah Aksial dengan Gaya <i>Forging</i> 290MN.....	10
7	
Gambar 4.2 Tegangan Sisa Arah Aksial dengan Gaya <i>Forging</i> 320MN.....	107
Gambar 4.3 (a) R/5; (b) 2R/5; (c) 3R/5; (d) 4R/5; (e) R.....	109
Gambar 4.4 Gaya <i>Forging</i> vs. Nilai Maksimum Tegangan Sisa Kompresi pada Arah Aksial dengan Ketebalan <i>Billet</i> 70mm....	112
Gambar 4.5 Gaya <i>Forging</i> vs. Nilai Maksimum Tegangan Sisa Kompresi pada Arah Aksial dengan Ketebalan <i>Billet</i> 72mm....	113
Gambar 4.6 Gaya <i>Forging</i> vs. Nilai Maksimum Tegangan Sisa Kompresi pada Arah Aksial dengan Ketebalan <i>Billet</i> 74mm....	114
Gambar 4.7 Gaya <i>Forging</i> vs. Nilai Maksimum Tegangan Sisa Kompresi pada Arah Aksial dengan Ketebalan <i>Billet</i> 76mm....	114
Gambar 4.8 Gaya <i>Forging</i> vs. Nilai Maksimum Tegangan Sisa Kompresi pada Arah Aksial dengan Ketebalan <i>Billet</i> 78mm....	115
Gambar 4.9 Distorsi pada <i>Mesh</i>	116
Gambar 4.10 Tegangan Sisa Arah Radial dengan Gaya <i>Forging</i> 290MN.....	118
Gambar 4.11 Tegangan Sisa Arah Radial dengan Gaya <i>Forging</i> 320MN.....	119
Gambar 4.12 (a) R/5; (b) 2R/5; (c) 3R/5; (d) 4R/5; (e) R.....	121
Gambar 4.13 Gaya <i>Forging</i> vs. Nilai Maksimum Tegangan Sisa Kompresi pada Arah Radial dengan Ketebalan <i>Billet</i> 70mm....	123
Gambar 4.14 Gaya <i>Forging</i> vs. Nilai Maksimum Tegangan Sisa Kompresi pada Arah Radial dengan Ketebalan <i>Billet</i> 72mm....	125
Gambar 4.15 Gaya <i>Forging</i> vs. Nilai Maksimum Tegangan Sisa Kompresi pada Arah Radial dengan Ketebalan <i>Billet</i> 74mm....	125
Gambar 4.16 Gaya <i>Forging</i> vs. Nilai Maksimum Tegangan Sisa Kompresi pada Arah Radial dengan Ketebalan <i>Billet</i> 76mm....	126
Gambar 4.17 Gaya <i>Forging</i> vs. Nilai Maksimum Tegangan Sisa Kompresi pada Arah Radial dengan Ketebalan <i>Billet</i> 78mm....	126
Gambar 4.18 Tegangan Sisa Arah <i>Circumferential</i> dengan Gaya <i>Forging</i> 290MN.....	129

Gambar 4.19 Tegangan Sisa Arah <i>Circumferential</i> dengan Gaya <i>Forging</i> 320MN	129
Gambar 4.20 (a) R/5; (b) 2R/5; (c) 3R/5; (d) 4R/5; (e) R	131
Gambar 4.21 Gaya <i>Forging</i> vs. Nilai Maksimum Tegangan Sisa Kompresi pada Arah <i>Circumferential</i> dengan Ketebalan <i>Billet</i> 70mm	134
Gambar 4.22 Gaya <i>Forging</i> vs. Nilai Maksimum Tegangan Sisa Kompresi pada Arah <i>Circumferential</i> dengan Ketebalan <i>Billet</i> 72mm	137
Gambar 4.23 Gaya <i>Forging</i> vs. Nilai Maksimum Tegangan Sisa Kompresi pada Arah <i>Circumferential</i> dengan Ketebalan <i>Billet</i> 74mm	137
Gambar 4.24 Gaya <i>Forging</i> vs. Nilai Maksimum Tegangan Sisa Kompresi pada Arah <i>Circumferential</i> dengan Ketebalan <i>Billet</i> 76mm	138
Gambar 4.25 Gaya <i>Forging</i> vs. Nilai Maksimum Tegangan Sisa Kompresi pada Arah <i>Circumferential</i> dengan Ketebalan <i>Billet</i> 78mm	138
Gambar 4.26 Tegangan Sisa Arah Aksial dengan Ketebalan <i>Billet</i> 74mm	141
Gambar 4.27 Tegangan Sisa Arah Aksial dengan Ketebalan <i>Billet</i> 78mm	141
Gambar 4.28 Ketebalan <i>Billet</i> vs. Nilai Maksimum Tegangan Sisa Kompresi pada Arah Aksial Roda Kereta.....	143
Gambar 4.29 Geometri Awal <i>Billet</i> , dan Elemen pada Tahap <i>Final Forging</i> dengan Tebal Awal <i>Billet</i> 70mm.....	144
Gambar 4.30 Geometri Awal <i>Billet</i> , dan Elemen pada Tahap <i>Final Forging</i> dengan Tebal Awal <i>Billet</i> 78mm.....	144
Gambar 4.31 Tegangan Sisa Arah Radial dengan Ketebalan <i>Billet</i> 74mm	146
Gambar 4.32 Tegangan Sisa Arah Radial dengan Ketebalan <i>Billet</i> 78mm	147
Gambar 4.33 Ketebalan <i>Billet</i> vs. Nilai Maksimum Tegangan Sisa Kompresi pada Arah Radial Roda Kereta.....	148

Gambar 4.34 Tegangan Sisa Arah <i>Circumferential</i> dengan Ketebalan <i>Billet</i> 74mm.....	151
Gambar 4.35 Tegangan Sisa Arah <i>Circumferential</i> dengan Ketebalan <i>Billet</i> 78mm.....	152
Gambar 4.36 Ketebalan <i>Billet</i> vs. Nilai Maksimum Tegangan Sisa Kompresi pada Arah <i>Circumferential</i> Roda Kereta.....	153
Gambar 4.37 Tegangan Aksial pada Penelitian Ini.....	155
Gambar 4.38 Tegangan Aksial pada Penelitian Sebelumnya....	156
Gambar 4.39 Tahapan Simulasi.....	157
Gambar 4.40 (a) <i>Preforming</i> ; (b) <i>Final Forging</i>	160
Gambar 4.41 (a) <i>Preforming</i> ; (b) <i>Final Forging</i>	161
Gambar 4.42 (a) <i>Preforming</i> ; (b) <i>Final Forging</i>	162
Gambar 4.43 (a) <i>Preforming</i> ; (b) <i>Final Forging</i>	163
Gambar 4.44 Proses <i>Forging</i> dengan Ketebalan <i>Billet</i> 70mm, dan Gaya 200MN.....	166
Gambar 4.45 Proses <i>Forging</i> dengan Ketebalan <i>Billet</i> 70mm, dan Gaya 320MN.....	166
Gambar 4.46 Proses <i>Forging</i> dengan Ketebalan <i>Billet</i> 78mm, dan Gaya 320MN.....	167
Gambar 4.47 Hasil Pengukuran pada Bagian Rim Roda Kereta	169
Gambar 4.48 Hasil Pengukuran pada Bagian Web Roda Kereta	169

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Konstanta Konstitutif untuk Berbagai Material pada Laju Regangan 1/s.....	40
Tabel 2.2 Komposisi kimia dari <i>C-Grade Steel</i> [%].....	61
Tabel 2.3 Parameter simulasi	65
Tabel 2.4 Hasil perbandingan posisi pin dari proses simulasi dan eksperimen	68
Tabel 2.5 Komposisi kimia material D1 <i>medium carbon steel</i> ...	74
Tabel 2.6 Nilai dari parameter material untuk pemodelan Johnson-Cook.....	76
Tabel 3.1 Karakteristik Roda Kereta Cepat dengan tipe S1002CN.....	82
Tabel 3.2 Data Material Roda Kereta Cepat yang Terdapat di Beberapa Negara	83
Tabel 3.3 Variasi ketebalan <i>billet</i> yang digunakan	84
Tabel 3.4 Variasi gaya <i>forging</i> yang digunakan	84
Tabel 3.5 Data properties material standar	88
Tabel 3.6 Nilai dari parameter material untuk pemodelan Johnson-Cook.....	88
Tabel 3.7 Hasil uji konvergensi Tahap <i>Pre Forming</i>	92
Tabel 3.8 Hasil Uji Konvergensi Tahap <i>Final Forging</i>	93
Tabel 3.9 Data perubahan tegangan dan regangan hasil simulasi	99
Tabel 4.1 Nilai Maksimum Tegangan Sisa Kompresi pada Arah Aksial.....	111
Tabel 4.2 Nilai Maksimum Tegangan Sisa Kompresi pada Arah Radial	122
Tabel 4.3 Nilai Maksimum Tegangan Sisa Kompresi pada Arah Circumferential	133
Tabel 4.4 Pengamatan Dimensi Ketebalan Roda Kereta Cepat Hasil Proses <i>Forging</i>	172

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Mobilitas merupakan sebuah kebutuhan di dalam kehidupan manusia yang akan terjadi setiap saat. Melalui mobilitas ini, manusia dapat melaksanakan berbagai kegiatannya dalam memenuhi berbagai kepentingan dalam kehidupan sehari-hari. Seperti yang kita ketahui bersama, semakin berkembangnya zaman, mobilitas ini juga akan berkembang menjadi lebih cepat dan mudah seperti yang ada pada saat ini. Berbagai sarana transportasi diciptakan untuk menunjang mobilitas yang terus berkembang menjadi lebih cepat dan lebih mudah. Negara Indonesia memiliki berbagai macam moda transportasi baik itu di darat, di laut, maupun di udara. Salah satu transportasi darat yang terus berkembang di Negera Indonesia adalah kereta api.

Saat ini, pemerintah terus berupaya untuk membangun dan mengembangkan kereta api yang ada di Indonesia seperti pembangunan kereta api ringan ataupun LRT (*Light Rail Transit*), MRT (*Mass Rapid Transit*), kereta api cepat Jakarta-Bandung, dan kereta api *medium speed* Jakarta-Surabaya. Proyek canggih kereta api cepat ini sedang dikerjakan oleh Pemerintah Indonesia sebagai pertimbangan dalam pemenuhan akan moda transportasi cepat dan sebagai penunjang keberhasilan pembangunan Negara Indonesia sebagai negara yang memiliki cita-cita menjadi negara maju. Kereta cepat memiliki kecepatan operasional antara 250 km/jam hingga 300 km/jam. Akan tetapi, rekor yang ada di negara lain seperti Jepang dengan kereta *Maglev* telah mencapai kecepatan 580 km/jam dan Prancis dengan kereta TGV telah mencapai kecepatan 574 km/jam.

Kereta api cepat yang saat ini dibangun di Indonesia merupakan kerja sama dengan Tiongkok dan memiliki kecepatan operasional mencapai 350 km/jam. Penerapan moda transportasi kereta cepat ini merupakan yang pertama di Indonesia. Oleh karena itu, perlu dilakukan penelitian pada setiap bagian kereta cepat ini agar

didapatkan desain yang paling optimum. Salah satu bagian terpenting dari kereta adalah roda. Bersamaan dengan pembangunan infrastruktur kereta cepat ini, Pemerintah Indonesia juga memiliki wacana untuk mengembagkan sektor industri yaitu di bidang produksi roda kereta. Pabrik roda kereta yang direncanakan ini merupakan industri berkapasitas besar yang memproduksi berbagai macam roda kereta.

Proses manufaktur dari roda kereta ini bisa dibuat dengan 2 proses yang berbeda. Proses yang pertama adalah dengan melakukan *casting* atau pengecoran material terlebih dahulu dan setelah itu dilakukan proses permesinan lebih lanjut untuk dapat memperoleh geometri dan dimensi yang diinginkan. Proses yang kedua adalah dengan dilakukan proses *forging* atau penempaan terhadap *billet* yang sudah disiapkan, yang selanjutnya dilakukan proses permesinan lebih lanjut untuk mendapatkan geometri dan dimensi yang diinginkan. Proses manufaktur yang ada di Indonesia untuk memproduksi roda kereta masih menggunakan metode produksi dengan cara *casting* atau pengecoran. Penggunaan metode *casting* dalam memproduksi roda kereta ini memiliki beberapa kekurangan apabila dibandingkan dengan metode *forging*. Kekuatan material yang dihasilkan melalui proses *forging* lebih tinggi daripada yang dihasilkan melalui proses *casting*. Penelitian yang dilakukan oleh Ali Fatemi, dkk. menunjukkan bahwa *crankshaft* yang dibentuk melalui proses *forging* akan memiliki kekuatan *tensile*, dan kekuatan *fatigue* yang lebih tinggi apabila dibandingkan dengan *crankshaft* yang dibuat dengan *ductile cast iron*. Kekuatan *fatigue* tersebut terjadi karena adanya *compressive residual stress* yang ada pada *crankshaft*. (Williams & Fatemi, 2007)

Akan tetapi, dalam proses *forging* ini juga diperlukan analisa yang mendalam untuk merancang proses yang tepat, dan dapat menghemat dari segi ekonomis. Salah satu faktor yang berpengaruh dari produk hasil proses *forging* ini adalah *residual stress* yang ada. *Circumferential/hoop compressive residual stress* pada roda kereta akan membantu meningkatkan *fatigue life*.

Sementara itu, *tensile residual stress* pada roda kereta akan mempercepat terjadinya inisiasi *crack*, dan menurunkan *fatigue life* dari roda kereta. Oleh karena itu, perlu untuk melakukan analisa *residual stress* pada proses *forging* roda kereta cepat, yang akan membantu dalam menyusun bagaimana proses pembuatan roda kereta cepat yang tepat dengan proses *forging*.

Berangkat dari latar belakang tersebut, penulis terdorong untuk mengambil tugas akhir tentang analisa *residual stress* pada proses produksi roda kereta cepat yang saat ini sedang direncanakan oleh Pemerintah Indonesia dengan menggunakan metode *forging*, dengan harapan penelitian ini dapat menjadi masukan untuk merencanakan proses *forging* yang tepat.

1.2 Perumusan Masalah

Dari uraian masalah yang terjadi, yaitu tentang perancangan proses *forging* untuk memproduksi roda kereta cepat, maka dapat disusun perumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh dari besar gaya *forging*, dan ketebalan *billet* terhadap *residual stress* arah aksial pada roda kereta cepat?
2. Bagaimana pengaruh dari besar gaya *forging*, dan ketebalan *billet* terhadap *residual stress* arah radial pada roda kereta cepat?
3. Bagaimana pengaruh dari besar gaya *forging*, dan ketebalan *billet* terhadap *residual stress* arah *circumferential* pada roda kereta cepat?
4. Bagaimana akurasi geometri roda kereta cepat yang dihasilkan dari setiap rancangan proses *forging* tersebut?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1.3.1 Variabel yang diteliti

1. Analisis deformasi yang terjadi pada *billet*.
2. Analisis tegangan residual yang ada pada roda kereta cepat hasil *forging*.

1.3.2 Variabel yang diabaikan

1. Penelitian ini hanya meliputi analisa deformasi, dan tegangan residual yang terjadi pada *billet* yang akan menjadi roda kereta cepat.
2. Material yang digunakan sebagai *billet* adalah D1 *medium carbon steel* yang digunakan pada China Railway Highspeed (CRH), dan yang digunakan sebagai cetakan adalah *structural steel*.
3. Material bersifat homogen dan isotrop.
4. Dimensi dari cetakan disesuaikan dengan dimensi roda kereta cepat yang digunakan sebagai roda kereta cepat di Negara Iran dengan tipe roda S1002CN.
5. Analisis tidak memasukkan pengaruh yang ada akibat dari faktor lubrikasi, dan suhu.
6. Analisa menggunakan nilai koefisien gesekan sebesar 0,15.
7. Variasi ketebalan *billet* yang digunakan pada penelitian ini adalah 70mm, 72mm, 74mm, 76mm, dan 78mm.
8. Variasi besarnya pembebanan *forging* yang digunakan adalah 200MN, 230MN, 260MN, 290MN, dan 320MN.
9. Jumlah tahapan yang digunakan adalah 2 tahapan proses *forging*.
10. Jari-jari *billet* yang digunakan sebesar 430mm.
11. Cetakan dianggap sebagai *rigid body*.
12. Geometri *billet* dianggap *axisymmetric*.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui pengaruh dari besar gaya *forging*, dan ketebalan *billet* terhadap *residual stress* yang dihasilkan pada arah aksial roda kereta cepat.
2. Mengetahui pengaruh dari besar gaya *forging*, dan ketebalan *billet* terhadap *residual stress* yang dihasilkan pada arah radial roda kereta cepat.
3. Mengetahui pengaruh dari besar gaya *forging*, dan ketebalan *billet* terhadap *residual stress* yang dihasilkan pada arah *circumferential* roda kereta cepat.

4. Mengetahui akurasi geometri roda kereta cepat yang dihasilkan dengan proses *forging* yang telah direncanakan.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat membantu pemerintah dalam mempersiapkan perkembangan sektor industri dengan membangun pabrik produksi roda kereta.
2. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat menjadi tambahan referensi tentang analisa pembuatan roda keta cepat melalui proses *forging*, sehingga nantinya dapat dirancang proses *forging* yang tepat untuk memproduksi roda kereta cepat sesuai dengan standar yang diinginkan.
3. Sebagai media penelitian dan pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya bidang manufaktur roda kereta.

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

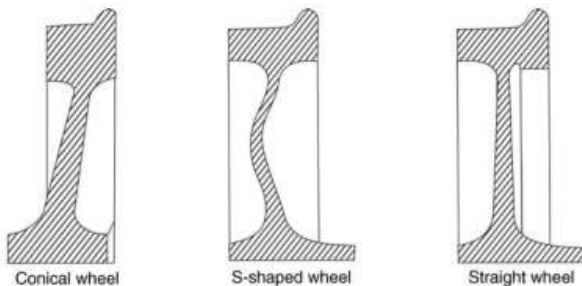
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

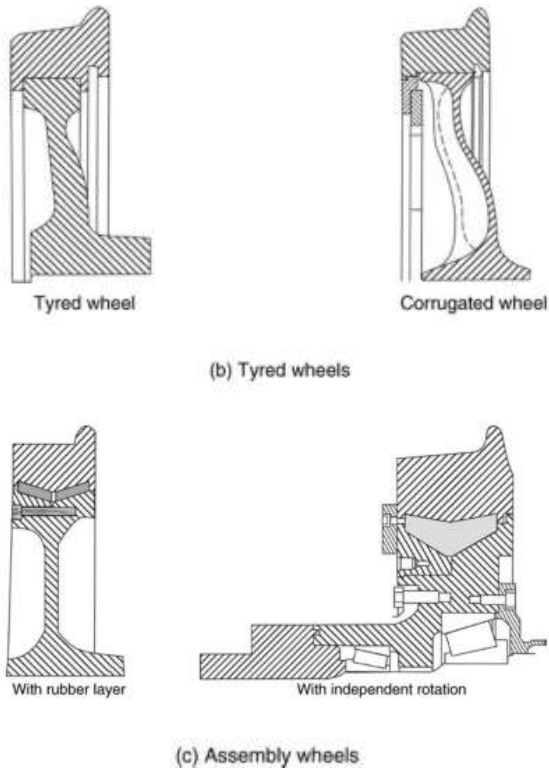
2.1 Roda Kereta

Roda kereta dan poros roda merupakan salah satu bagian penting yang ada pada sistem kereta. Kegagalan mekanis ataupun *over design* pada komponen ini dapat menyebabkan kereta tergelincir. Roda kereta diklasifikasikan ke dalam beberapa bentuk seperti tipe *solid*, *tyre*, dan *assembly* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1. Tipe roda *solid* (Gambar 2.1 a) memiliki tiga elemen utama yaitu roda, cakram, dan *hub*. Tipe roda *tyred* (Gambar 3.9b) memiliki roda yang terpasang pada cakram roda, dan dapat dilepas ataupun diganti ketika sudah mencapai batas pemakaian maksimum. Roda kereta memiliki beberapa macam bentuk *disc* apabila dilihat dari penampang potongan, diantaranya adalah tipe lurus, berbentuk kerucut, berbentuk S, *spoked*, atau bergelombang.

Keinginan untuk mengurangi gaya interaksi antara roda kereta dengan rel, dengan cara mengurangi massa *unsprung*, telah menyebabkan terjadinya perkembangan untuk membuat roda kereta yang tangguh seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.9c. Roda tersebut menggabungkan lapisan bahan dengan modulus elastisitas rendah (karet, poliuretan). Hal ini membantu mengurangi gaya frekuensi yang lebih tinggi yang bekerja pada antarmuka roda dengan rel. (Orlova & Boronenko, 2006)



(a) Solid wheels

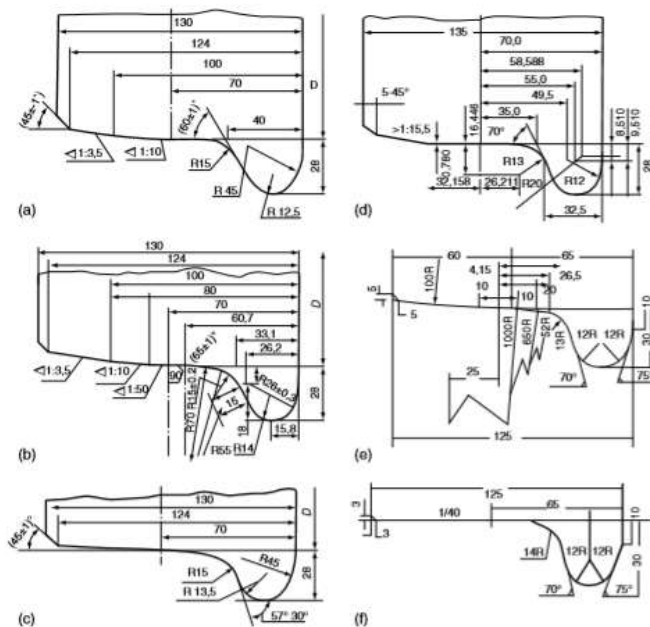


Gambar 2.1 Tipe Roda Kereta
(Orlova & Boronenko, 2006)

2.2 Profil Roda Kereta

Dalam memahami perilaku dinamis kereta, perlu untuk mempertimbangkan konisitas antarmuka. Konisitas merupakan perbedaan jari-jari pada roda untuk pergeseran lateral tertentu pada *wheelset*. Pada sekitar tepi lingkaran roda memiliki konisitas 1:10, ataupun 1:20 untuk jenis *rolling stock* biasa. Sementara itu, konisitas untuk *rolling stock* kecepatan tinggi dikurangi menjadi 1:40 ataupun 1:50. Pada Gambar 2.2 ditunjukkan bagaimana pada profil roda memiliki *relief* ke sisi luar roda. Hal ini bertujuan untuk

membantu mengangkat bagian luar roda dari rel, sehingga memudahkan pergerakan saat berpindah. (Orlova & Boronenko, 2006)



Gambar 2.2 Profil Roda a) Kereta Kargo dan Penumpang (Russia), b) Kereta Cepat (Russia), c) Kereta Industri (Russia), d) Kereta Kargo dan Penumpang (Eropa), (e dan f) Kereta Cepat (Jepang)
(Orlova & Boronenko, 2006)

2.3 Forging

Proses penempaan adalah salah satu metode populer dalam pembentukan logam. Banyak suku cadang industri yang diproduksi dengan metode ini karena menghasilkan produk dengan kekuatan yang tinggi dan tingkat produksi suku cadang yang baik. Parameter seperti suhu, geometri bahan baku, dan cetakan yang ada dalam

proses penempaan ini efektif dalam mengurangi biaya produksi dan meningkatkan kualitas komponen. Apabila desain dan pembuatan komponen dilakukan dengan cara yang konvensional, maka hal tersebut akan menghasilkan pemborosan waktu dan biaya yang tinggi. Analisa aliran material untuk proses forging dapat diprediksi dengan baik melalui simulasi komputer. Untuk mengurangi biaya dalam proses penempaan dan menjadikan metode penempaan ini kompeten dengan metode produksi lainnya, maka penting untuk mengoptimalkan desain dari material yang akan ditempa dan juga cetaknya. Selain itu, perlu juga untuk mempertimbangkan kekuatan, energi, dan waktu yang diperlukan dalam proses penempaan untuk mencapai analisis dan desain yang akurat. Dengan begitu, penempaan menawarkan potensi penghematan energi dan bahan, terutama dalam jumlah produksi menengah dan besar. (Maarefdoust & Kadkhodayan, 2010)

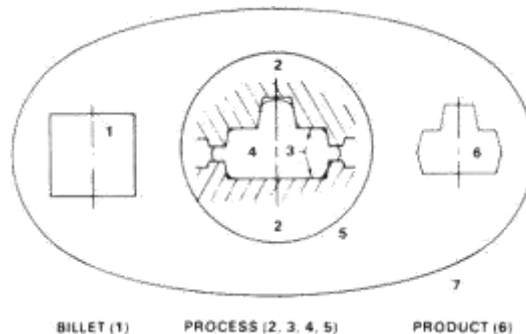
Tempa didefinisikan sebagai proses di mana logam dideformasi plastis dengan aplikasi suhu dan tekanan. Penempaan ini digunakan tidak hanya untuk mengubah bentuk dari logam, akan tetapi juga untuk mengubah sifat logam karena dalam proses penempaan ini akan memperbaiki ukuran butir dari logam, dan oleh karena itu akan terjadi perbaikan struktur pada logam tersebut. Komponen yang diproduksi dengan proses penempaan sering kali digunakan dalam aplikasi kekuatan dan keandalan yang tinggi di mana tekanan, tegangan, pembebanan, dan keselamatan manusia merupakan pertimbangan yang sangat kritis.

Proses penempaan memiliki berbagai parameter seperti kompleksitas bentuk komponen, gesekan antara cetakan dan benda kerja, jenis penekanan dalam tempa, suhu benda kerja dan cetakan, serta beberapa parameter lainnya. Proses penempaan dikatakan berhasil apabila rongga cetakan terisi penuh oleh material dan tegangan pada komponen yang dihasilkan kurang dari tegangan maksimum sesuai dengan material komponen tersebut, serta proses penempaan dilakukan dengan gaya yang minimum. (Parikh et al., 2010)

2.3.1 Sistem Operasi *Forging*

Sistem penempaan terdiri dari beberapa variabel, diantaranya adalah input material dan geometri dari komponen yang akan ditempa, kondisi *interface* dari peralatan penempaan dan material yang akan ditempa, mekanisme deformasi plastik, karakteristik dari produk akhir yang diinginkan, dan juga termasuk lingkungan tempat proses penempaan dilakukan.

Pendekatan sistem dalam penempaan memungkinkan pembelajaran tentang hubungan input dan output, serta pengaruh dari variabel proses pada kualitas produk dan nilai ekonomi dari proses penempaan. Gambar 2.1 menunjukkan beberapa komponen yang ada dalam sistem penempaan. Kunci keberhasilan dari proses penempaan adalah untuk mendapatkan bentuk dan sifat produk yang diinginkan. Hal tersebut dapat terwujud apabila pemahaman dan kontrol terhadap aliran logam dilakukan dengan baik. Arah aliran logam, besarnya deformasi, dan suhu yang terlibat sangat mempengaruhi sifat komponen yang terbentuk. Aliran logam menentukan sifat mekanis yang terkait dengan deformasi lokal dan pembentukan cacat seperti retak dan lipatan pada permukaan atau di bawah permukaan. (Altan & Ngaile, 2005)



Gambar 2.3 Sistem Penempaan (1) *Billet*, (2) *Tooling*, (3) *Tool/Material Interface*, (4) *Deformation Zone*, (5) *Forging Equipment*, (6) *Product*, (7) *Plant Environment*
(Altan & Ngaile, 2005)

2.3.1.1 Karakteristik Material

Analisa proses penempaan memiliki variabel terpenting berkaitan dengan bahan yang akan ditempa yang meliputi komposisi material, riwayat deformasi dan perlakuan panas, aliran tegangan, dan kemampuan tempa dalam berbagai arah.

Apabila struktur mikro dari bahan yang akan ditempa telah diketahui, maka aliran tegangan (σ), dapat diekspresikan sebagai fungsi dari regangan (ε), *strain rate* ($\dot{\varepsilon}$), dan suhu (T).

$$\sigma = f(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T) \quad (\text{Persamaan 2.1})$$

Untuk merumuskan persamaan konstitutif (Persamaan 2.1), perlu untuk melakukan uji puntir, uji tekanan dan regangan pada bidang, dan uji kompresi aksisimetri seragam. Selama pengujian ini, deformasi plastik akan menghasilkan peningkatan suhu tertentu. Hal ini harus dipertimbangkan dalam mengevaluasi dan menggunakan hasil pengujian. Material yang akan melalui proses penempaan harus memiliki kemampuan untuk menerima kerja, kemampuan untuk mengalami penempaan, ataupun kemampuan untuk berubah bentuk supaya dapat terdeformasi tanpa kegagalan. Hal tersebut bergantung pada:

- (a) Kondisi yang ada selama proses deformasi (seperti suhu, laju deformasi, tekanan, dan riwayat regangan), dan
- (b) Variabel material (seperti komposisi material, rongga, dan struktur mikro awal).

Dalam proses penempaan panas, gradien suhu pada material yang mengalami deformasi juga mempengaruhi aliran logam dan fenomena kegagalan. (Altan & Ngaile, 2005)

2.3.1.1 Perkakas dan Peralatan (*Tooling and Equipment*)

Pemilihan mesin untuk melakukan suatu proses tertentu dipengaruhi oleh beberapa faktor yang diantaranya adalah waktu, ketepatan, dan karakteristik beban ataupun energi dari mesin tersebut. Pemilihan peralatan yang optimal untuk proses penempaan memerlukan pertimbangan dari seluruh komposisi yang ada dalam sistem penempaan yang meliputi berbagai ukuran

ataupun dimensi yang ada, kondisi lingkungan di tempat penempaan, dan persyaratan perawatan, serta persyaratan ulang dari bagian spesifik dan proses yang sedang dipertimbangkan.

Variabel dari peralatan ini meliputi:

- (a) desain dan geometri,
- (b) permukaan akhir,
- (c) kekakuan, dan
- (d) sifat mekanik dan termal selama kondisi penggunaan. (Altan & Ngaile, 2005)

2.3.1.2 Gesekan dan Pelumasan pada Interface Cetakan dan Benda Kerja

Mekanisme gesekan pada *interface* merupakan mekanisme yang sangat kompleks. Salah satu cara mengekspresikan gesekan secara kuantitatif adalah melalui koefisien gesek, μ , atau faktor gesekan geser, m . Dengan demikian, tegangan geser gesekan, τ , adalah:

$$\tau = \mu\sigma_n \quad (\text{Persamaan 2.2})$$

Atau

$$\tau = f\sigma = \frac{m}{\sqrt{3}}\sigma \quad (\text{Persamaan 2.3})$$

Dimana σ_n adalah tegangan normal pada *interface*, σ adalah laju tegangan dari material yang mengalami deformasi, dan f adalah koefisien gesek ($f = m/\sqrt{3}$). Ada berbagai metode untuk mengevaluasi gesekan, yaitu dengan memperkirakan nilai dari μ ataupun m . Dalam penempaan, pengujian yang paling sering digunakan adalah uji kompresi cincin, uji lonjakan, dan uji ekstrusi dingin. (Altan & Ngaile, 2005)

2.3.1.3 Zona Deformasi / Mekanisme Deformasi

Dalam proses penempaan, material dideformasi plastis untuk menghasilkan bentuk produk yang diinginkan. Aliran logam dipengaruhi oleh beberapa faktor utama, yaitu:

- (a) geometri peralatan
- (b) kondisi gesekan
- (c) karakteristik material

(d) kondisi termal yang ada di zona deformasi

Detil dari aliran logam mempengaruhi kualitas dan sifat produk yang terbentuk, serta gaya dan kebutuhan energi dari proses tersebut. Mekanisme deformasi yang berupa aliran logam, regangan, laju regangan, dan tegangan, dapat diselidiki dengan menggunakan salah satu metode analisis perkiraan seperti analisis elemen hingga, perbedaan elemen hingga, dan lain-lain. (Altan & Ngaile, 2005)

2.3.1.4 Geometri dan Properti Produk

Makrogeometri dan mikrogeometri dari produk yang berupa dimensi dan penyelesaian permukaan dari produk tersebut dipengaruhi oleh variabel proses. Kondisi proses seperti suhu, regangan, dan laju regangan menentukan variasi mikrostruktur yang terjadi selama deformasi dan sering mempengaruhi sifat produk akhir. Akibatnya, pendekatan sistem yang realistis harus mencakup pertimbangan sebagai berikut:

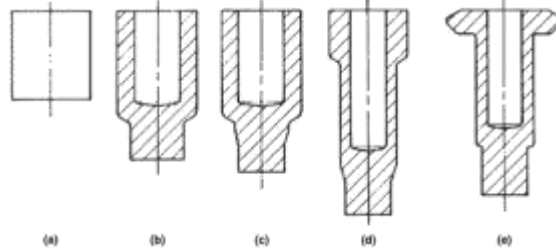
- (a) hubungan antara sifat dan struktur mikro dari bahan yang terbentuk.
- (b) pengaruh dari kondisi proses dan perlakuan panas terhadap variasi struktur mikro. (Altan & Ngaile, 2005)

2.3.2 Cold and Warm Forging

Penempaan dingin didefinisikan sebagai pembentukan atau penempaan bahan curah pada suhu kamar tanpa pemanasan awal dari tahap *preform* ataupun *intermediate*. Ekstrusi dingin merupakan jenis proses penempaan khusus, dimana logam dingin mengalir secara plastis di bawah gaya tekan ke dalam berbagai bentuk. Istilah penempaan dingin dan ekstrusi dingin sering digunakan secara bergantian dan merujuk pada operasi pembentukan terkenal seperti ekstrusi, *upsetting* atau *heading*, *coining*, *ironing*, dan *swaging* [Feldmann, 1961; Wick, 1961; Billigmann et al., 1973; Watkins, 1973; dan Altan et al., 1983].

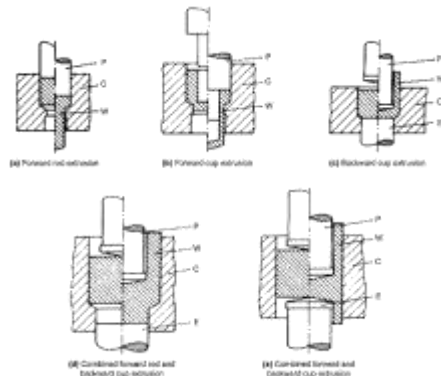
Penempaan dingin biasanya dilakukan dalam proses mekanis atau hidrolik. Beberapa langkah pembentukan digunakan untuk

menghasilkan bagian akhir atau geometri yang relatif kompleks, dimulai dengan bentuk *slug* atau *billet* yang sederhana, seperti yang ditunjukkan pada Gambar. 2.4. Beberapa teknik dasar penempaan dingin diilustrasikan pada Gambar 2.5. Melalui kombinasi teknik-teknik ini berbagai macam komponen dapat diproduksi, seperti yang diilustrasikan secara skematis pada Gambar 2.6.



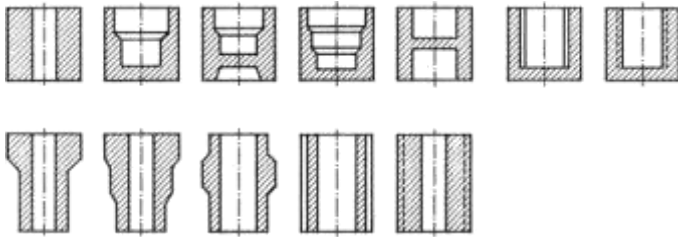
Gambar 2.4 *Schematic Illustration of Forming Sequences in Cold Forging of a Gear Blank. (a) Sheared Blank. (b) Simultaneous Forward Rod and Backward Extrusion. (c) Forward extrusion. (d) Backward cup extrusion. (e) Simultaneous upsetting of flange and coining*

[Sagemuller, 1968]



Gambar 2.5 *Various types of cold forging (extrusion) techniques (P, punch; C, container; W, workpiece; E, ejector)*

[Feldmann, 1977]



Gambar 2.6 *Examples of cold forged tubular or cup-shaped parts*
[Feldmann, 1977]

Sementara itu, dalam penempaan hangat, *billet* dipanaskan terlebih dahulu hingga mencapai suhu di bawah suhu rekristalisasi. Sebagai contoh adalah untuk baja antara suhu 1290 hingga 1470 F (700 hingga 800 C). Hal tersebut bertujuan untuk mengurangi aliran tegangan dan tekanan dalam proses penempaan. Dalam penempaan dingin, *billet* atau *slug* berada pada suhu kamar ketika deformasi dimulai.

Penempaan dingin dan hangat adalah proses yang sangat penting dan ekonomis, terutama untuk memproduksi komponen berbentuk bulat atau hampir bulat dalam jumlah besar. Beberapa keuntungan yang diberikan oleh proses ini adalah:

- Tingkat produksi yang tinggi
- Toleransi dimensi dan permukaan yang luar biasa untuk bagian-bagian yang ditempa
- Penghematan yang signifikan dalam material dan permesinan
- Kekuatan tarik yang lebih tinggi di bagian yang ditempa daripada bahan aslinya, sebagai akibat dari adanya *strain hardening*
- Aliran butir yang menguntungkan untuk meningkatkan kekuatan

Sejauh ini sektor produksi yang menggunakan proses penempaan dingin dan hangat terbesar adalah industri mobil. Namun, penempaan dingin juga digunakan dalam pembuatan

sepeda, sepeda motor, mesin pertanian, peralatan *off road*, serta mur dan baut. (Altan & Ngaile, 2005)

2.3.3 Isothermal and Hot Die Forging

Penempaan *isothermal*, dan penempaan panas adalah suatu proses penempaan yang dilakukan pada suhu tinggi, dimana suhu yang digunakan mencapai suhu rekristalisasi dari material *billet* yang digunakan. Penempaan tekan hidrolik *isothermal* telah dikembangkan untuk menunjang proses penempaan dengan bentuk menyerupai jaring yang sulit untuk diproses. Penempaan isothermal pertama kali dipraktikkan dalam proses produksi menggunakan bahan IN-100. Paduan seperti IN-100, Rene 95, Rene 88, N 18, U-720, Waspaloy, Gamma-TiAl, Ti-6-2-4-6, IMI 834, Ti-6Al-4V, dan lainnya dapat ditempa secara ekonomis hanya dengan menggunakan teknik tempa *isothermal*.

Dalam proses penempaan *isothermal*, cetakan dipanaskan pada suhu yang sama dengan benda kerja. Hal ini memungkinkan bentuk konfigurasi produk yang menyerupai jaring dapat dibentuk. Selain itu, penempaan jenis *isothermal* ini juga menunjang penggunaan bahan baku yang lebih sedikit dan proses permesinan lanjut yang minimum. Dalam penempaan *isothermal* untuk material titanium dan *superalloy* berbasis nikel menggunakan suhu penempaan yang sangat tinggi (1700 hingga 2200 F, atau 925 hingga 1205 C). Oleh karena itu, paduan *superalloy* dan molibdenum sering digunakan sebagai bahan perkakas untuk penempaan. Akan tetapi, paduan molibdenum rentan terhadap oksidasi cepat pada suhu tinggi. Maka dari itu, proses penempaan ini menggunakan ruang hampa udara atau *inert*. Hal tersebut mengakibatkan meningkatnya investasi modal untuk melakukan penempaan *isothermal*.

Superalloy berbasis nikel dikembangkan untuk kekuatan suhu tinggi yang unggul dan ketahanan mulur. Hal tersebut menyebabkan mereka sulit diproses dalam bentuk tempa. Laju regangan yang digunakan dalam penempaan isothermal biasanya rendah. Hal tersebut bertujuan untuk mengurangi pemanasan adiabatik, mempertahankan perilaku bahan superplastik, dan memenuhi persyaratan pemrosesan *superalloy* P / M. Walaupun

laju regangan rendah dan waktu tempa panjang dalam penempaan isothermal, namun pada pelaksanaannya, kondisi cetakan pada penempaan isothermal ini dipanaskan pada suhu yang sama dengan benda kerja. Oleh karena itu, tidak ada proses pendinginan pada cetakan seperti yang ada pada penempaan konvensional. Untuk memenuhi proses ini dibutuhkan suhu dan kontrol laju regangan yang akurat, penambahan bahan titanium dan *superalloy* berbasis nikel, dan persyaratan yang ketat terkait dengan struktur mikro dan properti yang kompleks.

Selain penempaan isothermal, penempaan tekan hidrolik panas juga banyak digunakan untuk memproduksi komponen *aerospace*. Temperatur cetakan yang digunakan dalam penempaan panas biasanya beberapa ratus derajat lebih rendah dari suhu benda kerja. Akan tetapi, suhu cetakan tersebut jauh lebih tinggi daripada suhu cetakan yang digunakan dalam penempaan konvensional. Suhu cetakan pada penempaan panas ini mulai dari 400 hingga 800 F (205 hingga 425 C). Dikarenakan suhu cetakan yang lebih tinggi ini, maka dibutuhkan material yang lebih kuat untuk material cetakan. *Superalloy* sering digunakan sebagai material untuk cetakan penempaan panas.

Untuk menjaga suhu tinggi yang konstan pada cetakan, diperlukan pemanasan yang konsisten dari cetakan tersebut. Sistem induksi, tahanan, dan radiasi biasanya digunakan untuk memanaskan cetakan pada penempaan panas. Laju regangan yang digunakan biasanya lebih tinggi daripada yang digunakan dalam penempaan isothermal. Hal tersebut bertujuan untuk mengurangi pendinginan pada cetakan. Karena laju regangan yang lebih tinggi digunakan dalam penempaan panas, *superalloy* P / M biasanya tidak ditempa oleh proses ini. Akan tetapi, paduan titanium dan *superalloy* cor sering ditempa oleh proses penempaan panas.

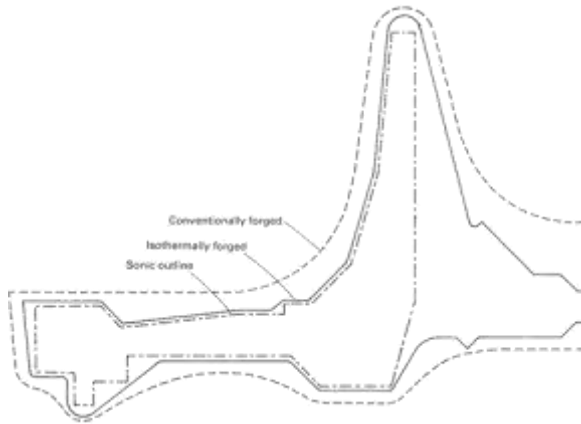
Proses pendinginan pasca penempaan panas akan terjadi dengan cepat karena penempaan panas tidak dilakukan dalam lingkungan vakum. Pendinginan dengan air ataupun dengan minyak dapat diterapkan segera setelah penempaan. Hal tersebut biasanya tidak mungkin untuk penempaan isothermal. Walaupun begitu, pemilihan

penempaan isothermal atau penempaan panas harus berdasarkan komponen yang akan ditempa bergantung pada material, struktur mikro dan sifat material, serta dari segi ekonomi. Dalam menempa *superalloy* P/M paduan tinggi, proses penempaan isothermal adalah satu-satunya metode yang terbukti berhasil. (Altan & Ngaile, 2005)

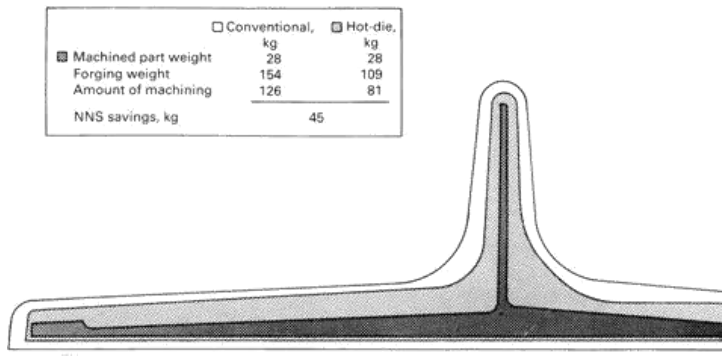
Penempaan isothermal dan penempaan panas memiliki keuntungan sebagai berikut: [Semiatin et al., 1983]:

- Toleransi yang lebih baik daripada penempaan konvensional. Hal tersebut dikarenakan tidak adanya pendinginan cetakan. Pengurangan biaya pengerjaan dan kerugian material. Proses penempaan ini memungkinkan untuk membentuk radius sudut dan fillet yang lebih kecil, sudut draf yang lebih kecil. Hal tersebut mengarah pada penghematan bahan dan penurunan berat tempa seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.7 dan Gambar 2.8.
- Tidak adanya pendinginan cetakan juga menghasilkan pengurangan pada tahap *preforming* dan *blocking*, sehingga mengurangi biaya pada cetakan.
- Kecepatan deformasi yang lambat seperti mesin hidrolik dapat digunakan karena pendinginan cetakan bukan merupakan masalah. Hal ini akan mengurangi laju regangan dan aliran tegangan dari bahan yang ditempa. Selain itu, dikarenakan adanya pengurangan tekanan tempa, maka bagian yang lebih besar dapat ditempa menggunakan peralatan yang ada.

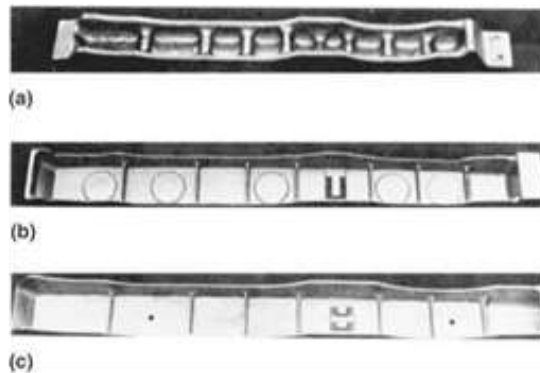
Gambar 2.9 menunjukkan perbandingan antara penempaan isothermal dan metode konvensional lainnya dalam memproduksi komponen struktural pesawat jenis *web rib*.



Gambar 2.7 Weight reduction obtained by forging a disk by isothermal methods rather than conventional forging. A 60 lb (27 kg) weight reduction was obtained.
[Shah, 1988]



Gambar 2.8 Comparison between conventional and hot-die forging of a Ti-6Al-4V structural part on the basis of raw material saved.
[Shah, 1988]



Gambar 2.9 *Comparison of various methods of producing torque ribs.*

[DuMond, 1975 and 1976)

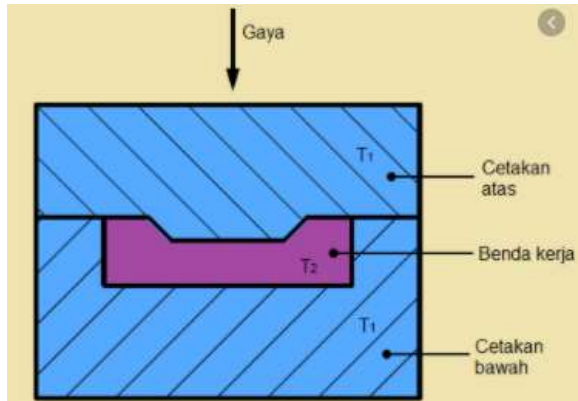
2.3.4 Jenis Forging

2.3.4.1 Berdasarkan Jenis Cetakan

2.3.4.1.1 *Closed Die Forging*

Closed die forging merupakan proses penempaan yang menggunakan sepasang blok cetakan yang secara presisi membentuk benda kerja yang diinginkan. Blok cetakan dibuat melalui proses permesinan atau *casting*. Penempaan dengan proses *closed die forging* ini akan menghasilkan produk yang memiliki toleransi ukuran yang lebih presisi. Blok cetakan terdiri dari dua bagian, yaitu cetakan bagian atas, dan cetakan bagian bawah. *Closed die forging* umumnya diaplikasikan untuk benda kerja berukuran relatif kecil. *Closed die forging* diterapkan secara bertahap dimulai dengan proses *fullering* dan *edging* pada bahan baku untuk memberikan bentuk awal benda kerja. Kemudian dilakukan penempaan kasar dengan *rough die block*. Pada tahapan ini terjadi perubahan bentuk yang relative besar. Setelah itu, tahap penempaan akhir dilakukan dengan cetakan *finishing* untuk memperoleh benda kerja yang sesuai dengan bentuk dan ukuran

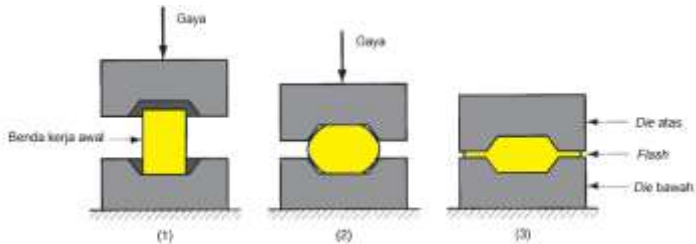
dari rancangan produk akhir. Pada proses tempa ini, volume benda kerja harus cukup untuk dapat mengisi seluruh rongga cetakan dengan sempurna. Proses *closed die forging* ditunjukkan pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10 *Closed Die Forging*

2.3.4.1.2 *Impression Die Forging*

Pada proses *closed die forging*, penggunaan volume benda kerja yang tepat sangatlah sulit. Oleh karena itu, sering digunakan volume benda kerja yang relatif lebih besar. Kelebihan volume ini akan menyebabkan terjadinya aliran material secara lateral yang melebar ke luar dari rongga cetakan, dan membentuk bagian logam tipis yang biasa disebut *flash*. Untuk mencegah terjadinya *flash* yang berlebihan, maka pada blok cetakan disediakan rongga penampung yang disebut *flash gutter*. Setelah tahapan tempa selesai, nantinya *flash* akan dipotong dengan menggunakan cetakan *trimming*. Skema proses penempaan dengan cara ini biasa disebut dengan *impression die forging*. Pada proses *impression die forging* ini akan sengaja menghasilkan *flash* yang nantinya akan dihilangkan setelah proses penempaan. Proses *impression die forging* ditunjukkan pada Gambar 2.11.

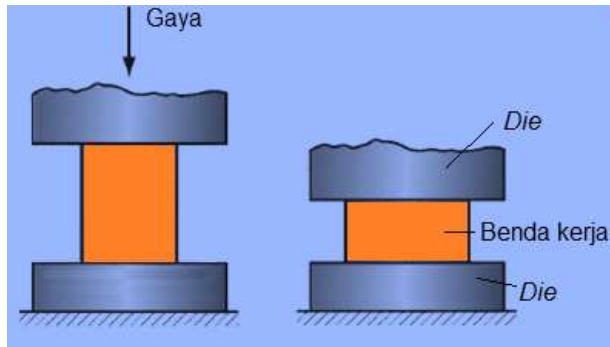


Gambar 2.11 *Impression Die Forging*

2.3.4.1.3 *Open Die Forging*

Open die forging adalah jenis penempaan (forging) yang paling sederhana. Proses penempaan jenis ini dioperasikan dengan menekan benda kerja menggunakan dua buah die (cetakan) berbentuk rata. Secara umum, open-die forging mampu mengerjakan benda-benda mulai dari yang kecil hingga yang besar. Proses *open die forging* mirip dengan proses pengujian tekan pada uji material. Proses ini dikenal dengan sebutan upsetting atau penempaan upset atau flat-die forging. Upsetting adalah pengurangan tinggi suatu benda kerja yang berakibat pada meningkatnya dimensi penampang benda kerja tersebut.

Pada beberapa aplikasi, permukaan cetakan yang digunakan memiliki kontur yang tipis. Kontur tersebut berfungsi untuk membantu pembentukan benda kerja. Bila perlu, benda kerja dapat diputar atau diposisikan ke berbagai macam posisi supaya perubahan bentuk yang diinginkan bisa tercapai. Keterampilan dari seorang operator menjadi salah satu faktor penentu kesuksesan dalam penempaan ini. *Open die forging* menghasilkan bentuk-bentuk yang masih kasar. Oleh karena itu, *open die forging* memerlukan proses lanjutan supaya bisa mencapai bentuk dan ukuran akhir yang mendekati toleransi. Walaupun menghasilkan bentuk yang kasar, proses *open die forging* tetap dibutuhkan karena dapat menciptakan aliran butir dan struktur metalurgi yang baik pada logam. Proses open die forging ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2.12 *Open Die Forging*
(Altan & Ngaile, 2005)

2.3.4.2 Berdasarkan Jenis Mesin *Forging*

- **HAMMER FORGING**

Hammer forging adalah proses penempaan yang paling sederhana. Pada umumnya, landasan cetakan atau *lower die* yang dipakai berbentuk datar. Proses *hammer forging* ini diprioritaskan untuk membuat benda kerja yang sederhana, dan skala produksi yang kecil. Proses *hammer forging* ini membutuhkan waktu yang lama, dan hasilnya sangat bergantung pada skill operator.

- **DROP FORGING**

Drop forging adalah proses penempaan yang memaksa logam untuk terdeformasi plastis sesuai dengan bentuk cetakan. Cetakan pada umumnya dibagi menjadi dua bagian, dimana satu bagian diletakkan pada *hammer* atau *upper die*, dan yang lainnya terletak pada *anvil* atau landasan. Cetakan yang digunakan harus kuat dan tangguh terhadap beban *impact*, keausan, dan temperature. Pada umumnya cetakan terbuat dari baja dengan campuran krom, *molybdenum*, dan nikel.

- **PRESS FORGING**

Press forging adalah proses penempaan dengan cara penekanan secara perlahan-lahan pada benda kerja sampai menghasilkan aliran logam yang *uniform*. *Press forging* biasanya digunakan pada

benda kerja dengan penampang tebal dan besar. Pada umumnya, proses *press forging* ini dapat dilakukan dengan menggunakan mesin *mechanical press*, dan dengan menggunakan mesin *hydraulic press*. Pada saat ini mesin *hydraulic press* dengan kapasitas terbesar dapat mencapai kekuatan hingga 80.000 ton.

- **UPSET FORGING**

Upset forging adalah proses penempaan yang dikhususkan untuk pembesaran diameter pada ujung batang logam yang ditekan pada arah memanjang. Pada dasarnya, benda kerja yang dilakukan proses *upset forging* ini berupa bar bulat, *wire*, ataupun benda kerja berbentuk silindris. (Altan & Ngaile, 2005)

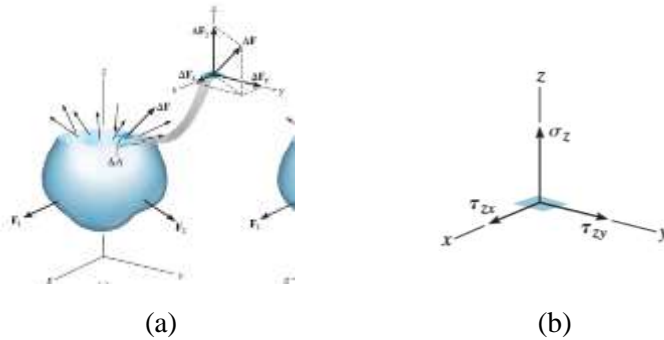
2.4 Konsep Tegangan dan Regangan

2.4.1 Konsep 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 2.13a). 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:

$$\sigma_z = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_z}{\Delta A} \dots\dots\dots \text{(Persamaan 2.4)}$$

$$\sigma_{avg} = \frac{F}{A} \dots\dots\dots \text{(Persamaan 2.5)}$$



Gambar 2.13 (a) Ilustrasi gaya yang bekerja pada suatu struktur
 (b) Ilustrasi orientasi sumbu masing-masing tegangan
 (Hibbeler, 2011)

Jika gaya normal tersebut bersifat “tarikan” seperti pada Gambar 2.13a, tegangan normal tersebut disebut tegangan tarik. Sedangkan apabila bersifat “dorongan”, tegangan normal tersebut disebut tegangan kompresif.

Tegangan geser didefinisikan sebagai intensitas gaya tangensial (tegak lurus) yang bekerja pada luasan ΔA . Sehingga secara matematis dirumuskan sebagai berikut:

$$\tau_{zx} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_x}{\Delta A} \quad (\text{Persamaan 2.6})$$

$$\tau_{zy} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_y}{\Delta A} \quad (\text{Persamaan 2.7})$$

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

$$\tau_{avg} = \frac{V}{A} \quad (\text{Persamaan 2.8})$$

Sumbu kerja dari masing-masing tegangan tersebut ditunjukkan oleh Gambar 2.13 b. Gaya yang bekerja pada luasan

bidang secara tegak lurus tersebut biasanya disebut dengan gaya geser yang disimbolkan dengan huruf V (Hibbeler, 2011).

2.4.2 Konsep 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)

$$\epsilon = \frac{L_1 - L_0}{L_0} = \frac{\delta}{L_0} \quad (\text{Persamaan 2.9})$$

Keterangan:

ϵ = regangan

L_0 = panjang awal (mm)

L_1 = panjang akhir (mm)

δ = perubahan panjang (mm)

2.4.3 Hubungan Tegangan dan Regangan

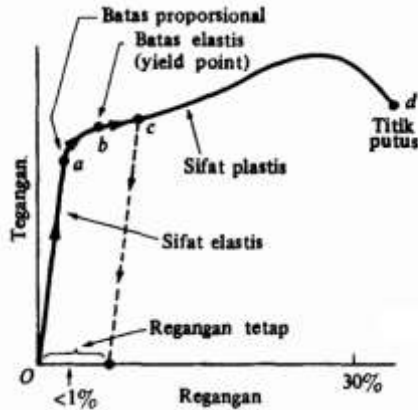
Hubungan tegangan dan regangan dapat ditunjukkan dalam gambar. Rasio antara tegangan dan regangan normal dapat disebut Modulus Young atau Modulus Elastisitas, merupakan *tangen* dari sudut yang terbentuk antara garis hubungan tegangan dan regangan dengan garis sumbu regangan dan dinotasikan : (Hibbeler, 2011)

$$E = \tan \theta = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (\text{Persamaan 2.10})$$

Keterangan :

E = modulus elastisitas (kg.mm/s^2)

θ = sudut antara garis hubungan regangan dengan garis sumbu regangan ($^{\circ}$)



Gambar 2.14 Kurva Tegangan dan Regangan

2.5 Deformasi Plastis : *Strain and Strain Rates*

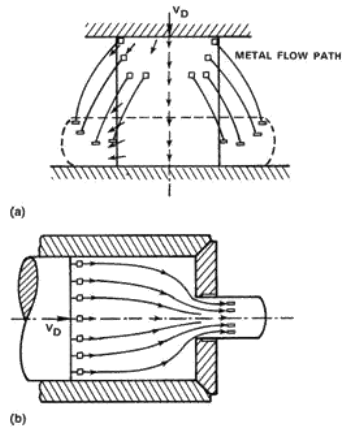
Tujuan penerapan teori plastisitas dalam pembentukan logam adalah untuk mengetahui mekanisme deformasi plastis dalam proses pembentukan logam. Investigasi semacam itu memungkinkan analisis dan prediksi sebagai berikut:

- (a) aliran logam (kecepatan, laju regangan, dan regangan)
- (b) suhu dan perpindahan panas
- (c) variasi lokal dalam kekuatan material atau aliran tegangan
- (d) tegangan, pembentukan beban, tekanan, dan energi.

Dengan demikian, mekanisme deformasi menyediakan sarana untuk menentukan bagaimana logam mengalir, bagaimana geometri yang diinginkan dapat diperoleh melalui deformasi plastis, dan bagaimana sifat mekanik yang diharapkan dari bagian yang dihasilkan dari proses pembentukan. (Meyers, 1994)

2.5.1 Deformasi Lokal dan Bidang Kecepatan

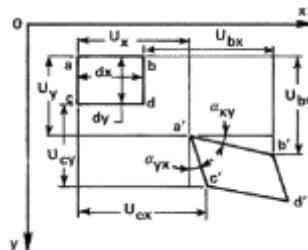
Perpindahan lokal dari elemen volume dijelaskan melalui medan kecepatan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.15. Untuk menyederhanakan analisis, sering diasumsikan bahwa medan kecepatan tidak tergantung pada sifat material. Namun, asumsi seperti itu tidak benar. (Meyers, 1994)



Gambar 2.15 *Metal flow in certain forming processes. (a) Non-steady-state upset forging. (b) Steady-state extrusion.*
[Lange, 1972]

2.5.2 Regangan

Dalam menyelidiki aliran logam secara kuantitatif, perlu untuk menentukan *strain* (atau deformasi), laju regangan (laju deformasi), dan kecepatan (perpindahan per unit waktu). Gambar 2.16 mengilustrasikan deformasi blok persegi panjang a - b - c - d yang sangat kecil menjadi jajar genjang setelah mengalami deformasi plastis. Meskipun ilustrasi ini dalam dua dimensi, namun prinsip-prinsip ini berlaku juga untuk kasus tiga dimensi. (Meyers, 1994)



Gambar 2.16 Perpindahan pada bidang x-y
[Altan et al., 1983]

Koordinat suatu titik pada awalnya x dan y (serta z dalam tiga dimensi). Setelah deformasi kecil, titik yang sama memiliki koordinat x' dan y' . Dengan mengabaikan susunan komponen yang lebih tinggi, maka dapat ditentukan besar perpindahan titik b , u_{bx} , sebagai fungsi dari perpindahan titik a , u_x . Perbedaan tersebut terdapat pada variasi fungsi u_x pada panjang dx , seperti:

$$U_{bx} = U_x + \frac{\partial U_x}{\partial x} dx \quad (\text{Persamaan 2.11})$$

Nilai u_x juga bergantung pada y dan z . Oleh karena itu, perpanjangan relatif pada panjang ab (yang semula sama dengan dx), atau regangan pada arah x (ε_x) menjadi:

$$\varepsilon_x = \frac{(U_{bx} - U_x)}{dx} \quad (\text{Persamaan 2.12})$$

Atau,

$$\varepsilon_x = (U_x + \frac{\partial U_x}{\partial x} dx - U_x) / dx = \frac{\partial U_x}{\partial x} \quad (\text{Persamaan 2.13})$$

Demikian pula pada arah y dan z ,

$$\varepsilon_y = \frac{\partial U_y}{\partial y}; \varepsilon_z = \frac{\partial U_z}{\partial z} \quad (\text{Persamaan 2.14})$$

Variasi sudut karena deformasi kecil yang dipertimbangkan pada Gambar. 2.13 sangat kecil. Oleh karena itu, $\tan \alpha_{xy} = \alpha_{xy}$ dan $\tan \alpha_{yx} = \alpha_{yx}$. maka:

$$\alpha_{xy} = (U_{by} - U_y) / (U_{bx} + dx - U_x) \quad (\text{Persamaan 2.15})$$

Nilai untuk u_{bx} diberikan dalam Persamaan 2.11, dan untuk u_{by} dapat diperoleh dengan cara yang sama seperti:

$$U_{by} = U_y + \frac{\partial U_y}{\partial y} dy \quad (\text{Persamaan 2.16})$$

Dengan menggunakan persamaan 2.11 dan 2.16, dan mengingat bahwa $\varepsilon_x = \partial u_x / \partial x$ jauh lebih kecil daripada 1, maka persamaan 2.15 mengarah ke:

$$\alpha_{xy} = \frac{\partial U_y}{\partial x} \quad (\text{Persamaan 2.17})$$

dan demikian pula,

$$\alpha_{yx} = \frac{\partial U_x}{\partial y} \quad (\text{Persamaan 2.18})$$

Maka, deformasi sudut total dalam bidang xy, atau regangan geser γ_{xy} , adalah:

$$\gamma_{xy} = \alpha_{xy} + \alpha_{yx} = \frac{\partial U_y}{\partial x} + \frac{\partial U_x}{\partial y} \quad (\text{Persamaan 2.19})$$

Sama halnya dengan,

$$\gamma_{yz} = \frac{\partial U_y}{\partial z} + \frac{\partial U_z}{\partial y} \quad (\text{Persamaan 2.20})$$

dan,

$$\gamma_{xz} = \frac{\partial U_z}{\partial x} + \frac{\partial U_x}{\partial z} \quad (\text{Persamaan 2.21})$$

2.5.3 Kecepatan dan Laju Aliran Regangan

Distribusi komponen kecepatan (v_x , v_y , v_z) dalam material yang mengalami deformasi menggambarkan aliran logam dalam material tersebut. Kecepatan adalah variasi perpindahan dalam waktu atau dalam arah x, y, dan z [Backofen, 1972, dan Rowe, 1977].

$$v_x = \frac{\partial U_x}{\partial t}; v_y = \frac{\partial U_y}{\partial t}; v_z = \frac{\partial U_z}{\partial t} \quad (\text{Persamaan 2.22})$$

Sementara itu, laju aliran regangan yang menggambarkan variasi regangan terhadap waktu adalah:

$$\dot{\varepsilon}_x = \frac{\partial \varepsilon_x}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial (U_x)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial (U_x)}{\partial t} = \frac{\partial v_x}{\partial x} \quad (\text{Persamaan 2.23})$$

Sama halnya dengan,

$$\dot{\epsilon}_x = \frac{\partial v_x}{\partial x}; \dot{\epsilon}_y = \frac{\partial v_y}{\partial y}; \dot{\epsilon}_z = \frac{\partial v_z}{\partial z} \quad (\text{Persamaan 2.24})$$

Keadaan deformasi plastis pada sebuah logam dapat dinyatakan dengan perpindahan (u), kecepatan (v), regangan (ϵ), dan laju regangan ($\dot{\epsilon}$) dalam sistem koordinat x, y, z . Dalam hal ini juga memungkinkan untuk menyatakan nilai yang sama dalam sistem koordinat x', y', z' , dengan sudut rotasi dari x, y, z ke x', y', z' yang telah diketahui. Oleh karena itu, dalam setiap elemen kecil di dalam bagian yang terdeformasi plastis dimungkinkan untuk mengarahkan sistem koordinat sedemikian rupa sehingga elemen tersebut tidak mengalami pergeseran dan hanya mengalami kompresi atau tarikan. Dalam hal ini regangan geser ($\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{xz}$) bernilai nol, dan elemen akan mengalami perubahan bentuk sepanjang sumbu utama deformasi. (Meyers, 1994)

2.6 Deformasi Plastis pada Laju Regangan Tinggi

Deformasi plastis pada laju regangan tinggi dinyatakan dengan persamaan konstitutif yang menghubungkan antara regangan, laju regangan, dan suhu. Secara skematis, tegangan dapat dirumuskan seperti:

$$\sigma = f(\epsilon, \dot{\epsilon}, T) \quad (\text{Persamaan 2.25})$$

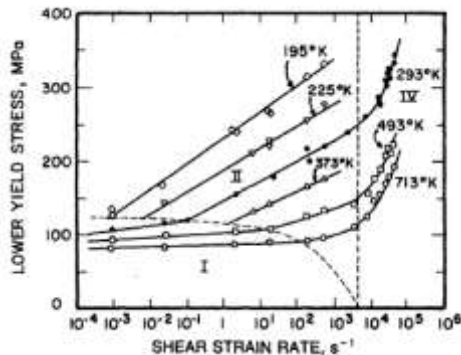
Dimana ϵ adalah regangan, $\dot{\epsilon}$ adalah laju regangan, dan T adalah suhu. Dalam hal ini, tegangan dan regangan yang ada diubah menjadi tegangan dan regangan efektif menurut persamaan berikut ini:

$$\sigma_{eff} = \frac{\sqrt{2}}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]^{1/2} \quad (\text{Persamaan 2.26})$$

$$\epsilon_{eff} = \frac{\sqrt{2}}{2} [(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_1 - \epsilon_3)^2]^{1/2} \quad (\text{Persamaan 2.27})$$

Hal tersebut bertujuan untuk mengubah tegangan dan regangan yang semula merupakan tensor orde dua menjadi besaran skalar σ_{eff} dan ϵ_{eff} . Selain itu, terdapat juga opsi lain untuk menjabarkan persamaan tersebut melalui τ dan γ yang merupakan tegangan

geser dan regangan geser. Seperti yang diketahui bahwa tegangan geser merupakan komponen penting dalam mekanisme deformasi plastis. (Meyers, 1994)



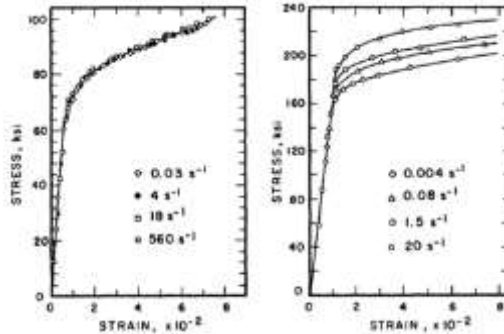
Gambar 2.17 Lower yield stress vs. strain rate for mild steel.
(From Campbell and Ferguson [2], Fig. 5, p. 68. Reprinted with permission of the publisher.)

Pada Gambar 2.17 ditunjukkan plot terdahulu yang dilakukan oleh Campbell dan Ferguson [2]. Pada gambar ini ditunjukkan bagaimana hubungan antara kekuatan luluh yang lebih rendah dengan logaritma laju regangan dari baja ringan pada suhu yang berbeda. Dari gambar tersebut dapat dilakukan pengamatan sebagai berikut:

1. Tegangan luluh meningkat seiring dengan meningkatnya laju regangan.
2. Peningkatan tegangan luluh seiring dengan meningkatnya laju regangan terjadi lebih tinggi pada suhu yang lebih rendah.

Seperti yang telah diketahui, pengamatan pertama terjadi hampir *universal* dan berlaku untuk sebagian besar material. Pemodelan konstitutif akan menyederhanakan data pada Gambar 2.14 menjadi sebuah persamaan tunggal, dan dapat dilakukan ekstrapolasi ataupun interpolasi. Dalam mekanisme deformasi

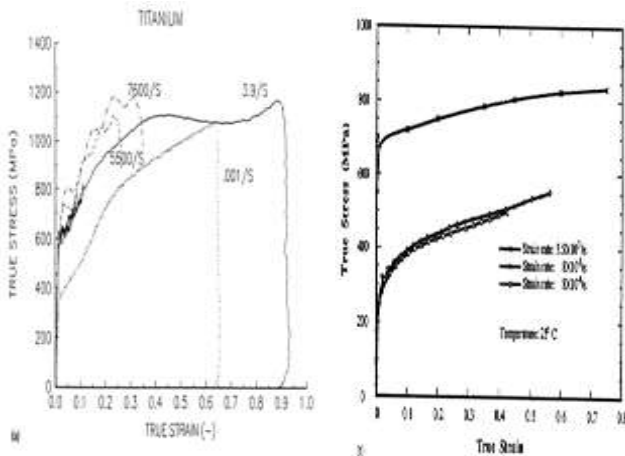
plastis, perlu untuk mengetahui bagaimana hasil atau aliran tegangan selama proses penarikan ataupun kompresi uniaksial. Hal tersebut bertujuan untuk mengetahui tingkat tegangan yang terdapat pada material yang mengalami deformasi plastis karena pembebanan yang kompleks dan dinyatakan dalam Von Mises ataupun J_2 .



Gambar 2.18 Pengaruh laju regangan terhadap respons tegangan-regangan (dalam kompresi) dari (a) aluminium 7075-T6 dan (b) paduan Ti-6% Al-4% V.
(Meyers, 1994)

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			
10^5		SHEAR-WAVE PROPAGATION	
10^4	DYNAMIC-HIGH -Taylor anvil tests -Hopkinson Bar -Expanding ring	PLASTIC-WAVE PROPAGATION	INERTIAL FORCES NEGLIGIBLE
10^3			
10^2	DYNAMIC-LOW High-velocity hydraulic, or pneumatic machines; cam plastometer	MECHANICAL RESONANCE IN SPECIMEN AND MACHINE IS IMPORTANT	
10^1			
10^0	QUASI-STATIC Hydraulic, servo-hydraulic or screw-driven testing machines	TESTS WITH CONSTANT CROSS- HEAD VELOCITY STRESS THE SAME THROUGHOUT LENGTH OF SPECIMEN	
10^{-1}			
10^{-2}			
10^{-3}			
10^{-4}			
10^{-5}	CREEP AND STRESS- RELAXATION -Conventional testing machines -Creep testers	VISCO-PLASTIC RESPONSE OF METALS	
10^{-6}			
10^{-7}			
10^{-8}			
10^{-9}			

Gambar 2.19 Klasifikasi skematis dari teknik pengujian menurut parameter laju regangan (Meyers, 1994)



Gambar 2. 20 Pengaruh laju regangan pada respons tegangan-regangan (dalam kompresi) dari titanium murni komersial. (Dari MA Meyers, G. Subhash, B. Khad, dan L. Prasad, *Mekanika Bahan*, 11 (1994) 175). (B) Efek pada tantalum (dari YG Chen, MA Meyers, F. Marquis, dkk.)

Pada Gambar 2.19 ditunjukkan bagaimana klasifikasi dari analisa yang tepat dalam dengan metode numerik berdasarkan tingkat laju regangan yang berbeda-beda. Pada Gambar 2.18, dan Gambar 2.20 dapat dilihat pula bahwa ketika laju regangan meningkat, proses deformasi berubah secara bertahap dari isothermal penuh menjadi adiabatik penuh. Hal tersebut terjadi karena tidak ada cukup waktu bagi panas yang dihasilkan dalam deformasi untuk keluar dari benda uji coba. Hal ini menyebabkan timbulnya beberapa kasus seperti ketidakstabilan geser adiabatik yang memiliki dampak signifikan pada sifat mekanis material.

2.7 Rumus Empiris

Beberapa persamaan telah dibuat dan berhasil digunakan untuk menggambarkan perilaku plastis material sebagai fungsi laju regangan dan suhu. Persamaan tersebut menguraikan data pada Gambar 2.21 menjadi satu persamaan tunggal. Pada laju regangan

rendah dan konstan, logam mengalami kecenderungan untuk mengeras saat dikenai kerja apabila dikorelasikan dengan persamaan yang menjabarkan Gambar 2.21. Hal tersebut biasa diketahui sebagai pengerasan parabola.

$$\sigma = \sigma_0 + k\varepsilon^n \quad (\text{Persamaan 2.28})$$

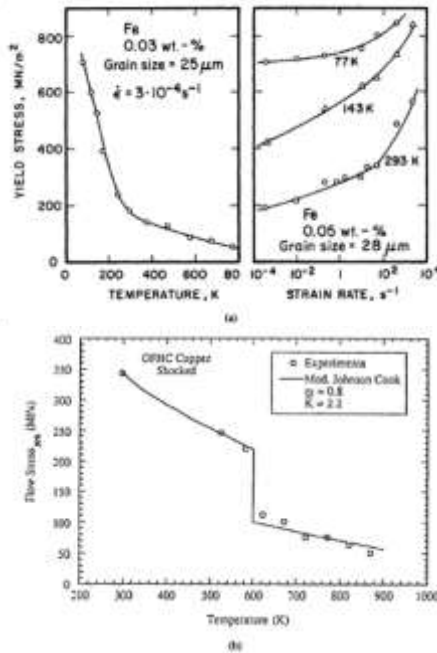
Dalam persamaan ini σ_0 adalah tegangan luluh, n adalah koefisien pengerasan, dan K adalah faktor *preexponential*. Pengaruh dari suhu dan laju regangan pada baja ringan dijelaskan secara terpisah seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.18. Pengaruh suhu pada aliran tegangan dapat dijabarkan melalui persamaan berikut:

$$\sigma = \sigma_r \left[1 - \left(\frac{T - T_t}{T_m - T_t} \right)^m \right] \quad (\text{Persamaan 2.29})$$

Dalam persamaan tersebut T_m adalah suhu titik lebur, T_r adalah suhu referensi di mana tegangan referensi diukur, dan T adalah suhu untuk mana tegangan (σ) dihitung. Persamaan tersebut akan membentuk kurva parabolik, dan parameter m menentukan tingkat kecekungan kurva yang dihasilkan. Sementara itu, pengaruh dari laju regangan dapat dijabarkan secara sederhana dengan beberapa variabel sebagai berikut.

$$\sigma, \alpha, \ln \dot{\varepsilon}$$

Hubungan dari beberapa variabel tersebut sering dianalisa pada laju regangan yang tidak terlalu tinggi. Seperti pada Gambar 2.18, diperoleh data dengan menggunakan laju regangan $10^2/s$.



Gambar 2.21 Pengaruh dari suhu dan laju regangan terhadap tegangan luluh besi.
(Meyers, 1994)

Johnson and Cook, dan Johnson et al. menggunakan komposisi dasar tersebut untuk mengusulkan persamaan berikut ini:

$$\sigma = (\sigma_0 + B\varepsilon^n) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right) [1 - (T^*)^m] \quad (\text{Persamaan 2.30})$$

Dalam persamaan tersebut terdapat lima parameter yang ditentukan secara eksperimental (σ_0 , B , C , n , m). Lima parameter ini dapat mendeskripsikan beberapa jenis logam dengan baik. Pada Persamaan 2.36 terdapat pula variabel T^* . Variabel tersebut dapat dihitung melalui persamaan berikut ini:

$$T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \quad (\text{Persamaan 2.31})$$

Dalam persamaan tersebut T_r adalah suhu referensi dimana σ_0 diukur, dan ϵ_0 adalah laju regangan referensi. Johnson and Cook melakukan pengujian terhadap sejumlah material dan memperoleh nilai dari parameter-parameter tersebut seperti yang diberikan pada Tabel 2.1. Persamaan Johnson-Cook adalah model konstitutif yang banyak digunakan. Namun, salah satu masalah yang terdapat pada persamaan ini adalah bahwa semua parameter digabungkan dengan cara dikalikan antara satu dengan yang lain. Walaupun demikian, persamaan Johnson-Cook tetap menjadi pemodelan konstitutif yang banyak digunakan. Persamaan empiris tambahan telah diusulkan oleh peneliti lain yang ditinjau oleh Meyer dan Klopp et al.

$$\tau = \tau_0 \gamma^n T^{-v} \dot{\gamma}_p^m \quad (\text{Persamaan 2.32})$$

Dalam Persamaan 2.38, τ adalah tegangan geser, γ adalah regangan geser, v adalah parameter suhu pelunakan, n adalah sensitifitas pengerasan, dan m adalah sensitifitas laju regangan. Selain persamaan tersebut juga terdapat persamaan lain seperti:

$$\tau = \tau_0 \left(1 + \frac{\gamma}{\gamma_0}\right)^N \left(\frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_r}\right)^m e^{-\lambda \Delta T} \quad (\text{Persamaan 2.33})$$

Dimana τ_0 adalah tegangan luluh material pada laju regangan tertentu, dan ΔT adalah perubahan suhu yang terjadi dari suhu referensi menjadi $(T - T_0)$. Pada Persamaan 2.39 memiliki variabel eksponensial pelunakan termal. Variabel tersebut dilambangkan dengan (γ) , dan didapatkan melalui persamaan berikut:

$$\sigma_r = \tau_0 e^{-\lambda \Delta T} \left(1 + \frac{\gamma}{\gamma_0}\right)^n \quad (\text{Persamaan 2.34})$$

Ataupun dalam persamaan yang lebih sederhana seperti berikut:

$$\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_r \left(\frac{\tau}{\sigma_r}\right)^{1/m} \quad (\text{Persamaan 2.35})$$

Material	Description				Constitutive Constants for $\sigma = [\sigma_0 + B\dot{\epsilon}^n][1 + C \ln \dot{\epsilon}^*][1 - T^{*m}]$				
	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	1906	377	0.12	0.016	1.00
Depleted uranium-0.75% Ti	C-45	18600	117	1473	1079	1120	0.25	0.007	1.00

Tabel 2.1 Konstanta Konstitutif untuk Berbagai Material pada Laju Regangan 1/s

Perlu dipahami bahwa persamaan konstitutif yang ada adalah berdasarkan penyesuaian kurva yang dihasilkan, dan setiap kelompok peneliti mengembangkan persamaannya sesuai dengan formulasi masing-masing. Selain itu, hal penting lainnya adalah bagaimana mendapatkan parameter yang ada pada persamaan melalui eksperimen. Persamaan Johnson-Cook tetap menjadi formulasi yang paling banyak digunakan, dan parameter yang ada pada persamaannya dikenal untuk sebagian besar material. Andrade et al. [12] telah memodifikasi persamaan Johnson-Cook untuk menggabungkan rekristalisasi dinamis pada suhu yang lebih tinggi.

$$\sigma = (\sigma_0 + B\dot{\epsilon}^n) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right) [1 - (T^*)^m][H(T)] \quad (\text{Persamaan 2.36})$$

$$H(T) = \frac{1}{1 - \left[1 - \frac{(\sigma_f)_{rec}}{(\sigma_f)_{def}}\right] u(T)} \quad (\text{Persamaan 2.37})$$

Pada persamaan tersebut $u(T)$ adalah fungsi tahanan dari suhu yang didefinisikan sebagai:

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

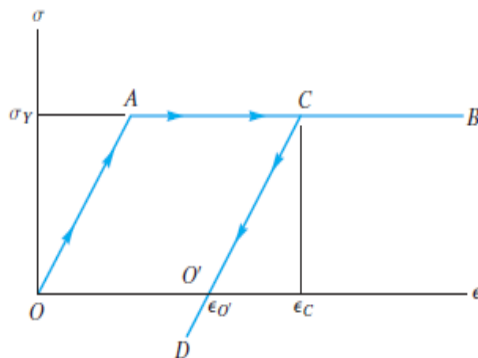
2.8 Tegangan Residual

2.8.1 Konsep Tegangan Residual

Gaya aksial yang terjadi pada sebuah batang dapat membentuk suatu sistem statis tak tentu yang dapat diwujudkan dengan beban tarik atau beban tekan. Gaya eksternal yang besar dapat menyebabkan terbentuknya *residual stress* pada batang tersebut saat setelah gaya yang diberikan sebelumnya dihilangkan. Penyebab terbentuknya *residual stress* ini memiliki keterkaitan dengan pemulihan elastisitas dari sebuah material yang terjadi saat beban yang diberikan sudah dihilangkan. Pemahaman terkait dengan terjadinya *residual stress* ini dapat dicermati melalui Gambar 2.22 yang menjelaskan tentang kurva tegangan-regangan suatu batang yang terbuat dari material *elastoplastic*. Sebuah gaya aksial menyebabkan terbentuknya tegangan σ_y dan regangan plastis ϵ_C pada material tersebut, dan selanjutnya gaya aksial yang diberikan tadi dihilangkan. Setelah gaya aksial tersebut dihilangkan, material akan merespon secara elastis dengan mengikuti garis CD untuk memulihkan beberapa regangan plastis yang terjadi. Pemulihan untuk menjadi tegangan nol di titik O' mungkin untuk terjadi apabila pengamatan pada batang tersebut merupakan pengamatan statis karena reaksi dari tumpuan harus menjadi nol pada saat gaya pembebanan dihilangkan. Akan tetapi, pada kenyataannya batang tersebut akan terdeformasi secara permanen yang akan menyebabkan regangan pada batang menjadi $\epsilon_{O'}$.

Apabila batang diamati bukan dengan cara statis, maka gaya eksternal yang dihilangkan tadi akan menyebabkan gaya pada tumpuan untuk merespon pemulihan elastis CD. Gaya pada tumpuan ini akan membatasi batang untuk mengalami pemulihan

secara penuh, dan akan menyebabkan terbentuknya *residual stress* pada batang. Untuk mengamati siklus pemulihan ini secara mudah, maka dapat diamati melalui Gambar 2.22. Pada gambar tersebut dapat diamati siklus pembebanan dan penghilangan beban pada batang dengan menggunakan superposisi dari pembebanan positif (*loading*) dan pembebanan negative (*unloading*). Pembebanan dari titik O ke C menghasilkan distribusi tegangan plastis. Sementara itu, ketika pembebanan dihilangkan sepanjang garis CD menghasilkan distribusi tegangan plastis. Dari superposisi tersebut dapat diketahui bahwa pembebanan yang diberikan tadi sudah dihilangkan. Namun, distribusi tegangan akan tetap ada. Oleh karena itu, distribusi tegangan yang masih ada pada saat pembebanan telah hilang disebut dengan *residual stress*. (Hibbeler, 2011)



Gambar 2.22 Kurva Tegangan-Regangan

2.8.2 Tegangan Residual pada Roda Kereta

Tegangan residual pada roda kereta, yang dihasilkan dari proses pembuatan roda kereta tersebut, sering kali diabaikan dalam pengamatan kekuatan roda kereta pada saat operasional. Padahal, tegangan residual yang ada pada roda kereta akibat dari proses pembuatan tersebut memiliki pengaruh yang cukup signifikan dalam analisa kekuatan. Terdapat dua tipe tegangan residual yang dimaksud, yaitu tegangan residual kompresi, dan juga tegangan

residual tarik. *Residual circumferential/hoop compressive stress* pada roda kereta bagian rim, akan membantu mencegah terjadinya *fatigue cracks*, dan akan menghambat laju pertumbuhan *crack* pada saat *crack* tersebut telah terjadi pada roda kereta. Pada umumnya, *circumferential/hoop compressive stress* ini akan dihasilkan melalui proses perlakuan panas pada roda kereta yang telah dibentuk. (Gordon & Perlman, 1998)

Dengan melibatkan *residual stress* pada analisa kekuatan roda kereta, maka akan dihasilkan peningkatan *fatigue life* sebesar 43,2% apabila dibandingkan dengan analisa kekuatan roda kereta tanpa melibatkan *residual stress* yang dihasilkan dari proses pembuatan roda kereta, utamanya melalui proses perlakuan panas. (Lima et al., 2019)

Kereta cepat di beberapa negara, utamanya Eropa, banyak mangacu pada Standarisasi Kereta Eropa EN 13262. Pada Standar EN 13262 ini juga memberikan standar mengenai tegangan residual yang harus ada pada roda kereta. Nilai tegangan residual pada roda kereta sesuai dengan Standarisasi EN 13262 ini harus memiliki nilai minimum *circumferential compressive stress* sebesar 80MPa pada permukaan bagian *tread* roda kereta, setelah melalui tahap *final machining*. Apabila *circumferential residual compressive stress* ini melebihi 200 MPa, maka harus dianalisa lebih lanjut apakah tegangan residual dalam arah radial pada bagian *web* roda tersebut dapat diterima dengan mempertimbangkan pola kelakukan *fatigue*. *Circumferential stress* ini harus dalam keadaan *compression* hingga kedalaman 35mm dari permukaan *tread*. (Standard, 2018)

2.9 Metode Elemen Hingga

Pendekatan dasar metode elemen hingga (FE) adalah salah satu diskritisasi. Model FE dibangun dengan cara berikut [Kobayashi et al., 1989]:

- Sejumlah titik hingga diidentifikasi dalam domain fungsi dan nilai-nilai fungsi dan turunannya, ketika sesuai, ditentukan pada titik-titik ini.

- Domain fungsi diwakili kira-kira oleh koleksi subdomain terbatas yang disebut elemen hingga.
- Domain tersebut kemudian merupakan kumpulan elemen-elemen yang terhubung bersama secara tepat pada batas-batas mereka.
- Fungsi ini diperkirakan secara lokal dalam setiap elemen dengan fungsi kontinu yang secara unik dijelaskan dalam hal nilai titik nodal yang terkait dengan elemen tertentu.

Jalan menuju solusi masalah elemen hingga terdiri dari lima langkah spesifik, diantaranya adalah:

- (1) identifikasi masalah,
- (2) definisi elemen,
- (3) pembentukan persamaan elemen,
- (4) kumpulan persamaan elemen, dan
- (5) solusi numerik dari persamaan global.

Pembentukan persamaan elemen dilakukan dengan menggunakan salah satu metode berikut ini:

- (a) pendekatan langsung,
- (b) metode variasional,
- (c) metode residu tertimbang, dan
- (d) pendekatan keseimbangan energi.

Keuntungan utama dari metode FE adalah:

- Kemampuan memperoleh solusi terperinci dari mekanika dalam benda yang mengalami deformasi, yaitu, kecepatan, bentuk, regangan, tegangan, suhu, atau distribusi tekanan kontak.
- Fakta bahwa kode komputer, setelah ditulis, dapat digunakan untuk berbagai macam masalah hanya dengan mengubah data input. (Altan & Ngaile, 2005)

2.10 Implementasi Komputer untuk Metode Elemen Hingga

Implementasi komputer dari langkah-langkah dasar dalam analisis elemen hingga standar terdiri dari tiga unit yang berbeda, yaitu. preprocessor, prosesor, dan postprocessor.

Preprocessor. Operasi ini mendahului operasi analisis. Dibutuhkan informasi minimal dari pengguna (*input*) untuk menghasilkan semua parameter masalah yang diperlukan (*output*) untuk analisis elemen hingga. *Input* ke preprosesor mencakup informasi tentang model solid, persyaratan diskritisasi, identifikasi material dan parameter, dan kondisi batas. Sedangkan *output* mencakup koordinat untuk *node*, konektivitas elemen dan informasi elemen, nilai parameter material untuk setiap elemen, dan kondisi pemuatan batas pada setiap *node*.

Pada tahap *preprocessing*, sebuah kontinum dibagi menjadi sejumlah *subregional* (atau elemen) terbatas dari geometri sederhana (segitiga, persegi panjang, tetrahedral, dll.). Poin-poin penting kemudian dipilih pada elemen-elemen untuk dijadikan sebagai simpul di mana persamaan masalah seperti kesetimbangan dan kompatibilitas terpenuhi.

Secara umum, *preprocessing* melibatkan langkah-langkah berikut ini untuk menjalankan simulasi menggunakan perangkat analisa elemen hingga:

1. Pilih geometri / bagian yang sesuai untuk simulasi berdasarkan simetri komponen yang akan dianalisis.
2. Menetapkan sifat material benda kerja dalam bentuk kurva tegangan aliran. Ini mungkin ditentukan atau dipilih pengguna dari database yang disediakan dalam paket FE
3. Sambungkan benda kerja menggunakan win-dens dengan kepadatan mesh, jika perlu, untuk menyaring mesh di area kritis.
4. Tetapkan kondisi batas (kecepatan, tekanan, gaya, dll.). Tentukan gerakan dan arah untuk mati. Tentukan batas antarmuka dan kondisi gesekan. Ini mencegah penetrasi cetakan ke benda kerja dan juga mempengaruhi aliran logam tergantung pada gesekan yang ditentukan. Dalam proses pembentukan masif seperti penempaan, ekstrusi, dll., Faktor gesekan geser “m” ditentukan.

Catatan: Jika diperlukan analisis tegangan mati atau analisis termal, Anda harus menyatukan cetakan dan menentukan sifat

material untuk cetakan tersebut. Juga mati dan suhu benda kerja dan koefisien perpindahan panas antarmuka perlu ditentukan. Data material pada suhu tinggi akan diperlukan untuk alat dan benda kerja.

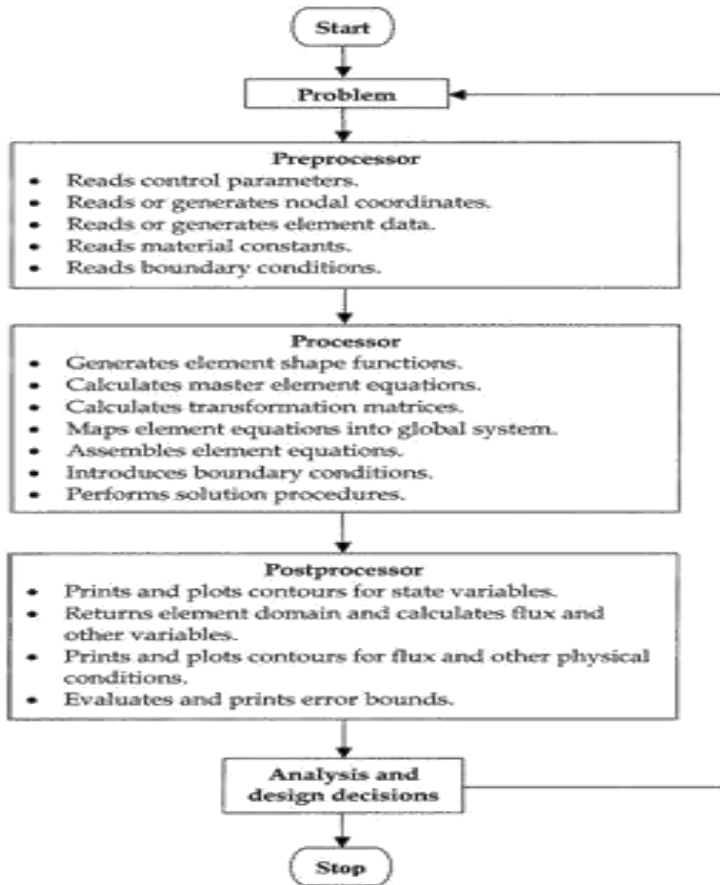
Prosesor Ini adalah operasi utama dalam analisis. Output dari preprocessor (termasuk koordinat nodal, konektivitas elemen, parameter material, dan kondisi batas / pemuatan) berfungsi sebagai input ke modul ini. Ini menetapkan satu set persamaan aljabar yang harus diselesaikan, dari persamaan yang mengatur masalah nilai batas. Persamaan yang mengatur meliputi prinsip konservasi, hubungan ki-ematik, dan hubungan konstitutif. Perangkat elemen hingga kemudian memecahkan himpunan persamaan aljabar *linear* ataupun *nonlinear* untuk mendapatkan variabel status pada node. Ini juga mengevaluasi jumlah fluks di dalam setiap elemen.

Langkah-langkah berikut ditempuh dalam operasi ini:

1. Fungsi interpolasi yang sesuai diasumsikan untuk masing-masing variabel dependen dalam hal nilai nodal.
2. Hubungan kinematik dan konstitutif terpenuhi dalam setiap elemen.
3. Dengan menggunakan prinsip kerja atau energi, matriks kekakuan dan beban nodal setara dibuat.
4. Persamaan dipecahkan untuk nilai nodal dari variabel dependen.

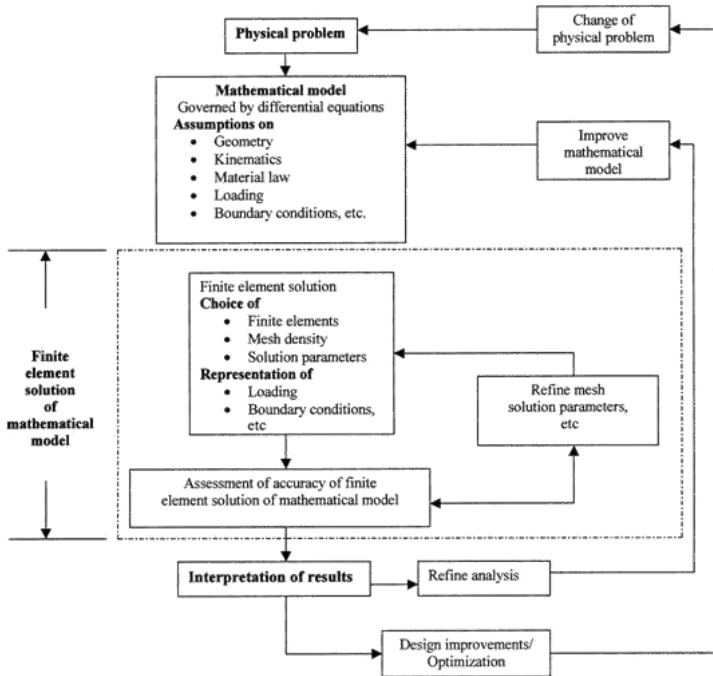
Postprocessor. Operasi ini mencetak dan memplot nilai variabel keadaan dan fluks dalam domain bertautan. Reaksi dapat dievaluasi. Keluaran bisa dalam bentuk tabel data atau sebagai plot kontur. (Altan & Ngaile, 2005)

Gambar 2.23 menunjukkan diagram alur, yang menunjukkan urutan implementasi elemen hingga dalam analisis proses pembentukan logam. (Altan & Ngaile, 2005)



Gambar 2.23 Diagram Alur Metode Elemen Hingga

Dalam menafsirkan hasil FE, perhatian yang cermat diperlukan karena idealisasi masalah fisik menjadi masalah matematika melibatkan asumsi tertentu yang mengarah pada persamaan diferensial yang mengatur model matematika. Seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.24, penyempurnaan ukuran *mesh*, perubahan kondisi batas, dll., Mungkin diperlukan untuk meningkatkan akurasi solusi.



Gambar 2.24 Diagram alur perbaikan dalam menggunakan metode elemen hingga (Altan & Ngaile, 2005)

2.11 Ansys *Explicit Dynamics*

2.11.1 Analisa *Nonlinear*

Sebagian besar fenomena fisik dunia nyata menunjukkan perilaku *nonlinear*. Ada banyak situasi di mana mengasumsikan perilaku linier untuk sistem fisik mungkin memberikan hasil yang memuaskan. Di sisi lain, ada keadaan atau fenomena yang mungkin memerlukan solusi *nonlinear*. Perilaku struktural *nonlinear* dapat timbul karena *nonlinear* dari geometri dan material, serta perubahan kondisi batas dan integritas struktural.

2.11.1.1 Geometri *Nonlinear*

a. Defleksi Besar dan Rotasi

Ketika struktur mengalami perpindahan yang besar apabila dibandingkan dengan dimensi terkecil, dan mengalami rotasi sedemikian rupa, yang mengakibatkan dimensi dan posisi semula, serta arah pemuatan berubah secara signifikan. Oleh karena itu, analisis defleksi dan rotasi yang besar menjadi sangat perlu. Sebagai contoh adalah joran dengan kekakuan lateral yang rendah di bawah beban lateral mengalami defleksi dan rotasi yang besar.

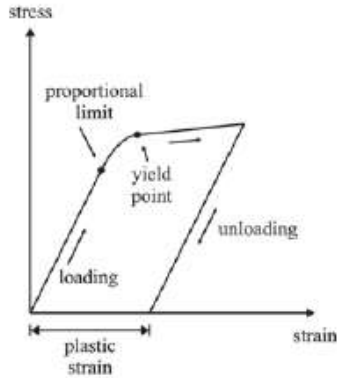
b. Pengerasan Tegangan

Ketika tegangan dalam satu arah mempengaruhi kekakuan pada arah lain, maka pengerasan akibat tegangan akan terjadi. Pada umumnya, struktur yang memiliki sedikit, atau tidak memiliki kekakuan dalam kompresi, namun memiliki kekakuan yang cukup besar dalam ketegangan akan menunjukkan perilaku seperti ini. Sebagai contohnya adalah kabel, membran, atau struktur pemintalan akan menunjukkan kekakuan akibat tegangan.

2.11.1.2 Material *Nonlinear*

Tipe kurva tegangan-regangan *nonlinear* diberikan pada Gambar 2.25. Respon material *linear* adalah perkiraan yang baik apabila material tersebut menunjukkan perilaku kurva tegangan dan regangan yang mendekati bentuk *linear* hingga batas yang proporsional, dan pemuatannya dengan cara yang tidak membuat tegangan lebih tinggi daripada tegangan luluh. Perilaku material *nonlinear* dalam ANSYS ditandai sebagai berikut:

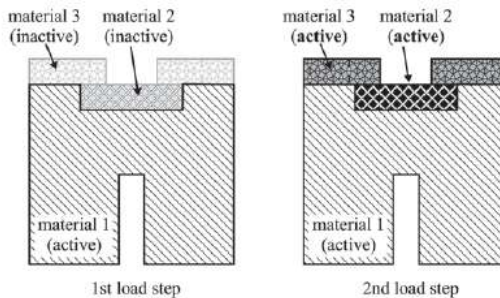
- Plasticity
- Creep
- Nonlinear Elastic Nonlinear
- Viscoelasticity
- Hyperelasticity



Gambar 2.25 Kurva Tegangan-Regangan *Nonlinear*
(Madency & Guven, 2015)

2.11.1.3 Perubahan Status *Nonlinear*

Fitur struktural pada umumnya menunjukkan perilaku *nonlinear* yang bergantung pada status. Ketika status sistem fisik berubah, maka kekakuannya juga akan berubah secara tiba-tiba. Program ANSYS memberikan solusi untuk fenomena tersebut melalui penggunaan elemen kontak *nonlinear*, juga memberikan opsi untuk mengaktifkan dan menonaktifkan. Jenis perilaku seperti ini umum digunakan dalam memodelkan proses manufaktur seperti penyusutan yang ditunjukkan pada Gambar 2.26.



Gambar 2.26 Pengaktifan Elemen Kontak
(Madency & Guven, 2015)

2.11.2 Pendefinisian Kontak *Frictional*

Tipe kontak *frictional* ini dideskripsikan dengan tiga variabel, diantaranya adalah:

- Koefisien gesekan
- Koefisien dinamis
- Konstanta peluruhan

Tipe kontak *frictional* ini akan mengaktifkan gesekan pada kontak yang terjadi antara setiap *node* pada sisi luar, dengan permukaan luar dari geometri yang dicakup. Terjadinya kontak secara individual akan terdeteksi dan dilacak selama simulasi. Kontak yang terjadi bersifat simetris antara geometri, yang berarti setiap *node* akan saling mempengaruhi dan dipengaruhi oleh *node* lain yang ada di sekitarnya. Ketika koefisien gesekan diberikan nilai bukan nol, maka hal tersebut akan mengaktifkan gesekan tipe *Coulomb* antar geometri ($F = \mu R$).

Kecepatan relatif (v) antar permukaan geser dapat memengaruhi gaya gesek. Formulasi gesekan dinamis pada analisa ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\mu = \mu_d + (\mu_s - \mu_d)e^{-\beta v}$$

Dimana:

- μ_d = Koefisien gesek statis
- μ_s = Koefisien gesek dinamis
- β = Eksponensial konstanta peluruhan
- v = Kecepatan relatif pergeseran pada kontak (Canonsburg, 2016)

Dalam beberapa kondisi pembentukan, nilai dari faktor geser (μ) memiliki variasi sebagai berikut:

$\mu = 0,05-0,15$ digunakan pada *cold forming* baja, aluminium *alloys*, dan tembaga yang menggunakan pelumasan phosphate-shoap atau minyak.

$\mu = 0,2-0,4$ digunakan pada *hot forming* baja, tembaga, dan aluminium *alloys* dengan pelumasan *graphite-water* atau *graphite-oil*.

$\mu = 0,1-0,3$ digunakan pada *hot forming* titanium dengan suhu tinggi, dan lubrikasi *glass*.

$\mu = 0,7-1.0$ digunakan pada saat tidak ada lubrikasi yang digunakan pada proses seperti *hot rolling*. (Altan & Ngaile, 2005)

2.11.3 Penggunaan *Mesh* pada *Explicit Dynamics*

Semua metode *mesh* yang tersedia dalam aplikasi *mesh Workbench* dapat digunakan dalam sistem *Explicit Dynamics*, diantaranya adalah:

- *Swept Volume Meshing*
- *Patch Dependant Volume Meshing*
- *Hex Dominant Meshing*
- *Patch Independent Tetrahedral Meshing*
- *Multizone Volume Meshing*
- *Patch dependant shell meshing*
- *Patch independent shell meshing*

Mesh yang seragam dan halus perlu digunakan pada bagian yang akan dilakukan analisis. Pada bagian lain, pengkasaran atau perbesaran ukuran *mesh* dapat membantu mengurangi ukuran keseluruhan masalah yang harus dipecahkan. Perlu untuk menggunakan preferensi meshing *explicit* yang telah diatur secara *default* untuk menetapkan kontrol otomatis *mesh default* yang akan memberikan *mesh* yang sesuai untuk analisis *explicit dynamics*. Akan tetapi, preferensi lainnya dapat digunakan apabila memiliki konsistensi yang lebih baik, dan diinginkan dalam analisis antara model implisit dan eksplisit.

Pertimbangan harus diberikan pada jumlah elemen dalam model, dan kualitas *mesh* untuk memberikan langkah waktu yang lebih besar sehingga simulasi lebih efisien. *Mesh* yang kasar sering digunakan untuk mendapatkan pengamatan tentang dinamika dasar suatu sistem. Sementara itu, *mesh* yang lebih halus diperlukan untuk menyelidiki efek dan kegagalan material *nonlinear*.

Metode *swept* atau *multizone mesh* lebih banyak digunakan dalam analisis *explicit dynamics*. Oleh karena itu, akan terjadi pembagian pemotongan pada geometri yang akan dikombinasikan

dengan opsi bagian *multibody* pada *design modeler*. Hal tersebut akan memberikan ruang untuk terbentuknya heksahedral *meshing*. Sebagai alternatif, dapat juga untuk menggunakan metode penambalan tetrahedral *mesh* untuk mendapatkan ukuran elemen yang lebih seragam, dan memanfaatkan *defeaturing* otomatis.

Elemen berbentuk piramida tidak didukung pada analisa *explicit dynamics*. Elemen piramida ini akan dikonversi menjadi dua elemen tetrahedral, dan akan terdapat peringatan pada sistem terkait hal ini. (Canonsburg, 2016)

2.11.4 Pemodelan Johnson-Cook

Pemodelan Johnson-Cook ini merepresentasikan bagaimana perilaku kekuatan material yang dipengaruhi karena regangan yang besar, laju regangan yang tinggi, dan suhu yang tinggi. Pemodelan ini pada umumnya digunakan untuk material logam. Dengan pemodelan ini, tegangan luluh akan berubah sesuai dengan fungsi regangan, laju regangan, dan suhu. Berikut adalah pemodelan yang digunakan untuk mendefinisikan tegangan luluh (Y):

$$Y = [A + B\varepsilon_p^n][1 + C \ln \varepsilon_p^*][1 - T_H^m]$$

Dimana:

ε_p = *effective plastic strain*

ε_p^* = *normalized effective plastic strain*

T_H = *homologous temperature* = $(T - T_{\text{room}}) / (T_{\text{melt}} - T_{\text{room}})$

Pada segmen pertama persamaan tersebut mendefinisikan tegangan yang merupakan fungsi dari regangan pada saat $\varepsilon_p^* = 1.0/\text{detik}$, dan $T_H = 0$. Konstanta A adalah tegangan luluh dasar pada regangan rendah, konstanta B dan n merepresentasikan pengaruh dari *strain hardening*. Pada segmen kedua persamaan tersebut merepresentasikan pengaruh dari laju regangan terhadap tegangan luluh dari material. Pada segmen ini digunakan laju regangan referensi yang pada umumnya bernilai 1/detik. Sementara itu, pada segmen ketiga persamaan tersebut merepresentasikan bagaimana pengaruh suhu terhadap pelunakan material, yang akan mengakibatkan tegangan luluh akan berubah

menjadi 0 pada saat suhu kerja mancapai suhu leleh. Pemodelan Johnson-Cook ini dapat digunakan pada semua jenis elemen, dan dapat dikombinasikan dengan semua *equations of state* dan juga properti kegagalan. (Canonsburg, 2016)

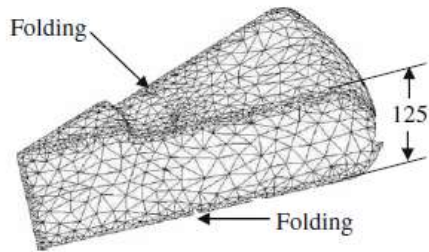
2.12 Penelitian Terdahulu

Terdapat beberapa penelitian terdahulu yang masih terkait dengan penelitian ini dan bisa dijadikan referensi bagi penulis. Penulis mengambil referensi dari penelitian yang dilakukan oleh Tapas Gangopadhyay, dkk. pada tahun 2010, Yanju Wang pada tahun 2010, M.J. Ward, dkk. pada tahun 1998, M.J. Ward, dkk. pada tahun 2001, Whei Chen, dkk. pada tahun 2015, Lin Jing, dkk. pada tahun 2017.

Penelitian pertama dilakukan oleh Tapas Gangopadhyay, dkk. dari India dengan judul *Three-Dimensional Finite Element Analysis of Multi-Stage Hot Forming of Railway Wheels*. Penelitian ini menganalisa proses produksi roda kereta dengan proses *forging* menggunakan *software* DEFORM 3D. Penelitian ini menggunakan metode analisa tiga dimensi, berbeda dengan kebanyakan penelitian lainnya yang menggunakan metode *axsymmetric* dalam menganalisa proses *forging* melalui *Finite Element Analysis*. Pada penelitian ini ditunjukkan bagaimana desain, optimasi, dan analisis proses *forming* roda kereta yang dapat diselesaikan dengan analisa metode elemen hingga tiga dimensi. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk memperbaiki proses produksi roda kereta dan mengurangi hasil produk roda kereta yang gagal. Terdapat beberapa tahapan yang dilakukan dan dianalisa dalam proses *forming* roda kereta pada penelitian ini, diantaranya adalah tahapan *upsetting*, *forging*, dan *punching*.

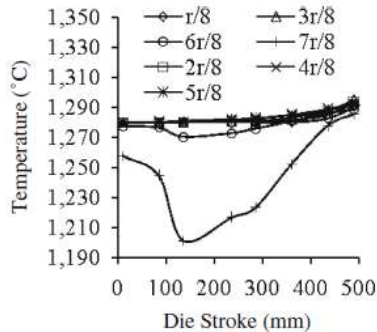
Penelitian ini menggunakan *billet* awal berbentuk silinder dengan berat 485 kf, diameter 358,4 mm, dan tinggi 615 mm. Material yang digunakan untuk roda adalah baja AISI 1045. Data aliran tegangan pada suhu 899°C, 999°C, 1099°C, 1199°C dan pada laju regangan 0,1/s, 100/s telah tersedia pada *database software* DEFORM 3D. Pada penelitian ini menggunakan konstanta fraksi dari poses mekanikal yang berubah menjadi energi panas sebesar

0,95. Untuk menghemat waktu dalam proses simulasi, maka simulasi dalam penelitian ini menggunakan model 1/12 bagian dari *billet* dan cetakan. Pada awal simulasi menggunakan jumlah elemen sebanyak 18.428 elemen berbentuk 3D *tetrahedral*. Selain itu, simulasi ini juga menggunakan metode penambahan *Lagrangian* dengan strategi perbaikan *meshing* global. Nilai suhu yang bergantung pada konduktivitas termal dan nilai panas pada suhu 100°C-1.485°C juga menggunakan *database* pada *software* DEFORM 3D untuk menunjang simulasi ini. Pada tahap *upsetting*, *upper die* bergerak sejauh 490 mm dengan kecepatan 43,36 mm/s untuk mereduksi tinggi *billet* menjadi 125 mm seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.27.



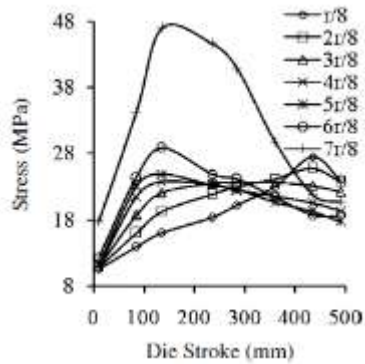
Gambar 2.27 *Meshing* pada *billet* 485 kg setelah tahap *upsetting*

Deformasi *meshing* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.27 pada tahap terakhir *upsetting* seperti itu sudah sesuai dengan bentuk *preform* dan pada gambar tersebut tampak terdapat cacat lipatan pada permukaan atas dan permukaan bawah. Perubahan suhu pada *billet* diamati dengan memberikan 7 titik rasio pada radius (RR) mulai dari $r/8$ hingga $7r/8$, dimana r adalah radius maksimum *billet* yang digunakan pada simulasi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.28.

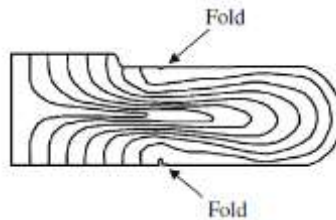


Gambar 2.28 Suhu pada radius yang rasio radius yang berbeda yang ada pada billet dengan ketebalan 125 mm

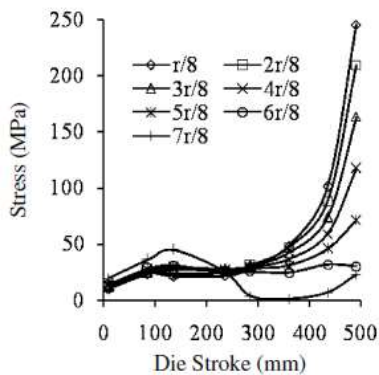
Hasil dari simulasi elemen hingga menunjukkan beberapa perubahan nilai tegangan efektif seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.29 hingga rasio radius 6r/8, akan tetapi nilai yang ada masih berkisar 28 MPa. Untuk pergerakan *upper die* dari 100 mm – 300 mm pada rasio radius 7r/8 menunjukkan peningkatan nilai tegangan efektif hingga 48 Mpa. *Grid line* pada 7 titik rasio radius mengindikasikan aliran logam yang baik dalam arah radial selama proses *upsetting* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.30. Selain itu, dari simulasi ini juga dapat menunjukkan distribusi tegangan tekan aksial pada variasi rasio radius seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.31. Pada gambar tersebut ditunjukkan bahwa distribusi tersebut berkurang seiring dengan bertambahnya rasio radius. Namun, tegangan aksial akan meningkat seiring dengan bertambahnya langkah dari *upper die* dan menyebabkan beban penekanan juga ikut meningkat seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.32.



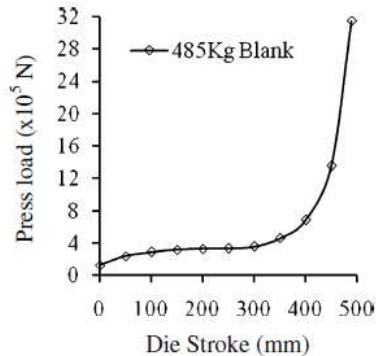
Gambar 2.29 Nilai tegangan efektif pada rasio radius yang berbeda pada *billet* selama proses *upsetting* menjadi 125 mm



Gambar 2.30 Aliran material yang ditunjukkan dengan tujuh *grid line* pada radius $r/8$ hingga $7r/8$ selama proses *upsetting*

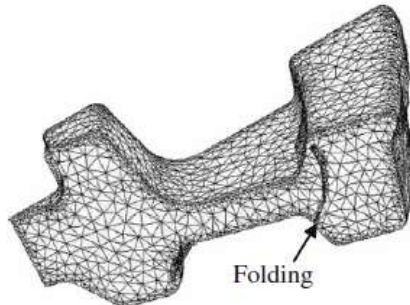


Gambar 2.31 Tegangan tekan aksial pada radius yang berbeda

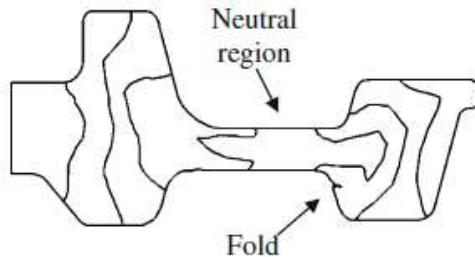


Gambar 2.32 Hasil prediksi dari metode elemen hingga terhadap gaya tekan yang dibutuhkan selama proses *upsetting*

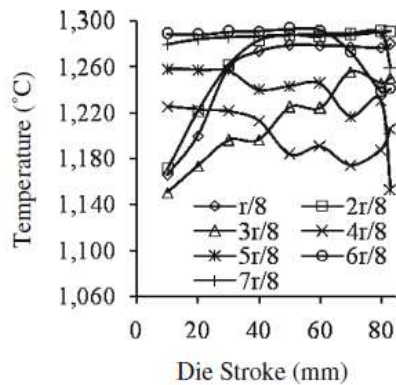
Setelah tahap *upsetting* selesai, maka tahap berikutnya dalam simulasi ini adalah tahap penempaan atau *forging*. Pada tahap penempaan ini akan mendeformasi *billet* dengan ketebalan 125 mm hasil dari proses *upsetting* menjadi 42 mm pada ketebalan bagian *web* roda kereta. Kecepatan dari *upper die* adalah 14,31 mm/s. Kenaikan waktu yang digunakan pada simulasi diatur menjadi 0,5 detik, dan nilai koefisien perpindahan panas pada *interface billet* dan cetakan diatur menjadi 11 N/s/mm/^oC. *Meshing* yang digunakan sebanyak 43.645 pada *upper die*, dan 48.015 pada *lower die*. *Meshing* yang dihasilkan pada tahap terakhir penempaan ini ditunjukkan pada Gambar 2.33. Berbagai macam hasil simulasi yang dianalisa dari tahapan *forging* ini dapat dilihat melalui Gambar 2.34, Gambar 2.35, Gambar 2.36, Gambar 2.37, dan Gambar 2.38, Gambar 2.39.



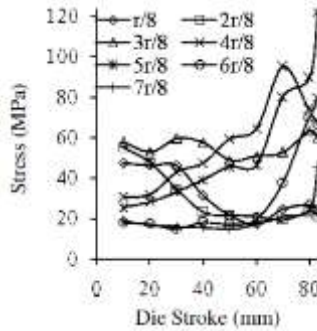
Gambar 2.33 Meshing pada tahap akhir proses *forging*



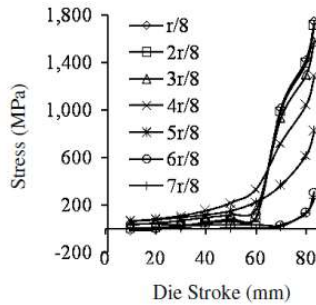
Gambar 2.34 Aliran material yang terjadi selama proses *forging* dengan tujuh tingkat garis radius pada *billet*



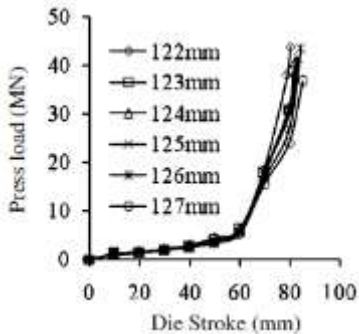
Gambar 2.35 Perbedaan suhu pada tujuh tingkat radius pada *billet*



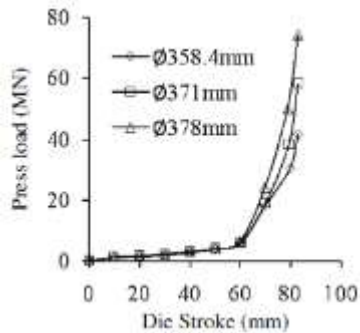
Gambar 2.36 Nilai tegangan efektif pada rasio radius yang berbeda pada *billet* selama proses *forging* dari ketebalan 125 mm



Gambar 2.37 Tegangan tekan aksial pada radius yang berbeda pada tahap *forging*



Gambar 2.38 Gaya yang dibutuhkan untuk proses *forging* dari ketebalan *billet* awal yang berbeda dan diameter sama



Gambar 2.39 Gaya yang dibutuhkan untuk proses *forging* dari diameter *billet* awal yang berbeda dan ketebalan sama (Gangopadhyay & Ohdar, 2011)

Penelitian kedua dilakukan oleh Yanju Wang dengan judul *Research on Hot Forging Process of C-grade Steel Train Wheel by FEM*. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisa bagaimana aliran logam yang terjadi selama proses pembentukan roda kereta. Penelitian ini membandingkan hasil dari percobaan langsung dengan simulasi menggunakan metode elemen hingga. Simulasi elemen hingga yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan metode *axisymmetric modelling* saat proses *forming* beberapa tahap. Penelitian ini menggunakan dua tahap dalam proses *forging*, tahap pertama adalah *pre-forming*, dan tahap berikutnya adalah *final forging*. Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah *C-Grade Steel*, dan mempunyai komposisi kimia seperti yang ditunjukkan pada tabel di bawah ini:

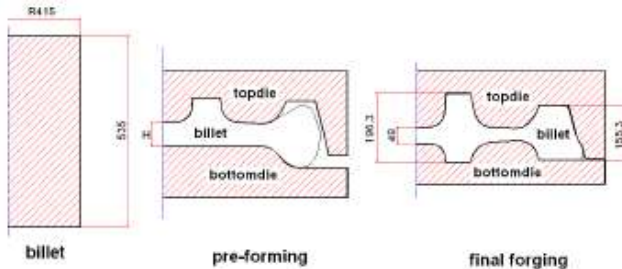
C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Mo	Ni	V	Al	[H]ppm
0.67~	0.15~	0.6~	≤0.03	0.005~	≤0.25	≤0.035	≤0.1	≤0.25	≤0.04	≤0.06	≤2
0.77	1	0.9		0.04							

Tabel 2.2 Komposisi kimia dari *C-Grade Steel* [%]

Untuk mengetahui aliran tegangan pada *C-grade steel*, maka dilakukan uji tekan. *Sample* yang digunakan adalah silinder dengan tinggi 12mm, dan diameter 8mm. Suhu penempaan baja adalah 1050°C-1250°C, dan kecepatan rata-rata penempaan adalah

40mm/s-60mm/s. Selain itu, pada uji tekan ini menggunakan laju regangan sebesar 0,01/s, 0,1/s, 1/s, dan 10/s.

Dimensi *billet* yang digunakan pada penelitian ini memiliki ketinggian sebesar 535mm, dan memiliki diameter sebesar 415mm. Pada tahap *preforming*, perubahan tinggi pada bagian tengah *billet* dapat diketahui. Sementara itu, pada tahap *final forging*, bagian tengah *billet* memiliki tinggi 48mm seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.40. Ketinggian *billet* ini menjadi salah satu parameter yang dipertimbangkan dalam penelitian ini. Penelitian ini menganalisa bagaimana pengaruh beda ketinggian *billet* terhadap geometri dari hasil proses penempaan.

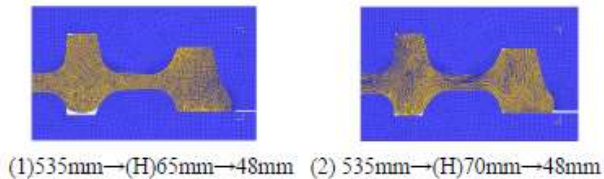


Gambar 2.40 Proses penempaan panas roda kereta

Tahap *preforming* ini menggunakan jumlah elemen sebanyak 4000 untuk mendeskripsikan *billet*. Sementara itu, *upper die* dan *bottom die* dideskripsikan dengan elemen sebanyak 500. Metode *Mesh adapting* dan perbaikan *mesh* digunakan dalam penelitian ini untuk menganalisa deformasi plastis. Suhu awal yang digunakan dalam simulasi ini adalah 1200°C pada *billet*, 300°C pada cetakan, dan 40°C untuk suhu lingkungan sekitar penempaan. Sementara itu, koefisien perpindahan panas yang digunakan adalah 5.

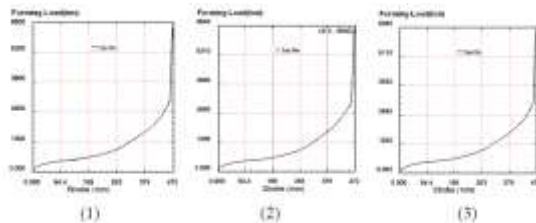
Tahap selanjutnya setelah *preforming* adalah *final forging*. Pada tahap *final forging* ini akan dianalisa bagaimana pengaruh beda ketinggian *billet* terhadap geometri yang dihasilkan. Perbedaan ketinggian yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan oleh Gambar 2.41. Dari simulasi tersebut didapatkan bahwa hasil dari proses *preforming* dengan ketinggian *billet* 70mm akan

menghasilkan geometri yang bagus saat melalui tahap *final forging*. Sementara itu, dengan ketinggian *billet* 65mm menghasilkan cacat saat melalui tahap *final forging*.



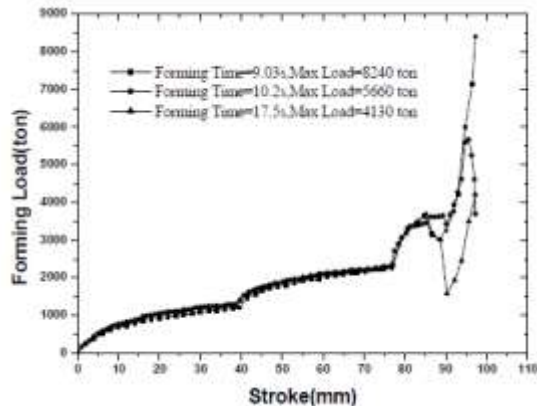
Gambar 2.41 Perbandingan karakteristik proses *forging* dengan parameter tinggi *billet* yang berbeda

Pada penelitian ini juga dianalisa bagaimana pengaruh parameter panas yang ada terhadap gaya yang dibutuhkan untuk proses *forming*. Gambar 2.42 menunjukkan pengaruh suhu lingkungan, koefisien perpindahan panas, dan koefisien konveksi yang berbeda terhadap gaya yang dibutuhkan pada saat proses *forming*. Gambar 2.42 (1) dengan menggunakan nilai koefisien perpindahan panas sebesar 5, suhu lingkungan 50°C, dan koefisien konveksi sebesar 0,02, Gambar 2.42 (2) menggunakan nilai pada parameter yang sama dengan nilai 11, 50°C, 0,02, dan pada Gambar 2.42 (3) menggunakan nilai pada parameter yang sama dengan nilai 5, 30°C, 0,02. Pada Gambar 2.42 dapat diketahui bahwa dengan nilai koefisien perpindahan panas dan suhu lingkungan yang lebih rendah akan menghasilkan nilai *forming load* yang lebih rendah pula untuk proses *forming* roda kereta.



Gambar 2.42 Perbandingan nilai *forming load* yang dihasilkan dengan parameter panas yang berbeda

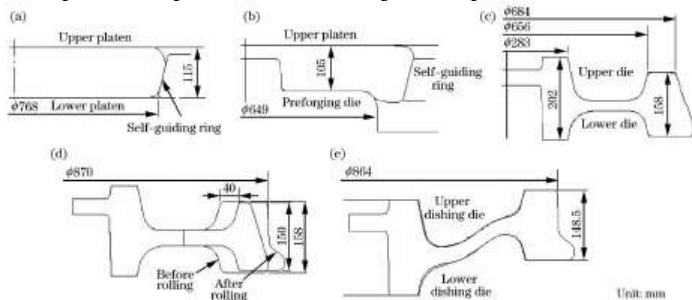
Forming load yang ada tidak hanya dipengaruhi oleh parameter panas saja, namun juga dipengaruhi oleh parameter kecepatan proses penempaan. Parameter kecepatan *upper die* merupakan pengaruh yang sangat signifikan pada nilai *forming load* yang dihasilkan. Apabila waktu yang digunakan selama proses *forming* berbeda, maka gaya maksimum yang dibutuhkan juga berbeda. Pada Gambar 2.43 ditunjukkan bahwa dengan kecepatan *upper die* yang lebih tinggi maka dibutuhkan *forming load* yang lebih tinggi pula. Lebih detail lagi bahwa *forming load* pada tahap terakhir proses *forging* akan naik secara signifikan. Oleh karena itu, dengan mengurangi kecepatan *upper die* saat memasuki tahap terakhir dari proses *forging* diharapkan dapat mengurangi *forming load* yang dibutuhkan secara signifikan. Hal tersebut dapat menunjang peralatan yang digunakan dan berpengaruh terhadap faktor ekonomi.



Gambar 2.43 Forming load dengan kecepatan forming yang berbeda
(Wang & Fang, 2011)

Penelitian ketiga dilakukan oleh Wei Chen, dkk. dengan judul *Experiment and Simulation of Metal Flow in Multi-Stage Forming Process of Railway Wheel*. Penelitian ini membandingkan

bagaimana hasil dari proses eksperimen dan simulasi *forging* roda kereta. Eksperimen yang dilakukan bertujuan untuk menganalisa bagaimana aliran material pada saat proses *forging* untuk mengisi ruang pada cetakan. Eksperimen ini menggunakan mengacu pada proses pembuatan roda kereta HESA 840mm yang merupakan roda kereta pengangkut barang. Profil dan dimensi dari benda kerja dan cetakan pada tahapan berbeda ditunjukkan pada Gambar 2.44.



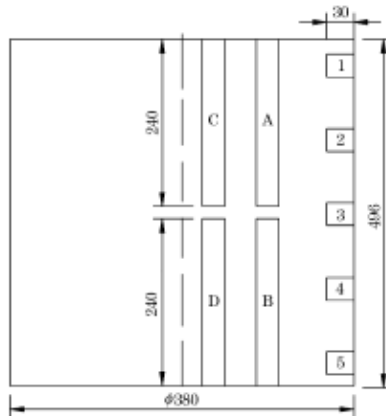
Gambar 2.44 Profil dan dimensi dari tahapan proses *forging* (a) *Upsetting*, (b) *Pre-forging*, (c) *Final forging*, (d) *Rolling*, (e) *Dishing*

Sementara itu, simulasi pada penelitian ini menggunakan *software* MSC. SuperForm dengan menggunakan metode *axisymmetric*, dan skema *forging* seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.44. Parameter yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 2. 3.

Parameters	Values
Upper die speed/(mm \cdot s $^{-1}$)	50
Initial temperature of the billet/ $^{\circ}$ C	1230
Temperature of the dies/ $^{\circ}$ C	700
Ambient temperature/ $^{\circ}$ C	20
Contact heat transfer coefficient/(W \cdot m $^{-2}$ \cdot K $^{-1}$)	12000
Convection heat transfer coefficient/(W \cdot m $^{-2}$ \cdot K $^{-1}$)	20
Emissivity of the workpiece	0,7
Heat conversion factor	0,9
Shear friction coefficient	0,5

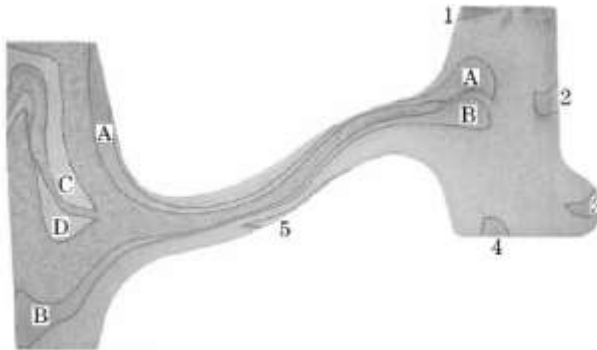
Tabel 2.3 Parameter simulasi

Untuk membandingkan aliran logam yang ada pada simulasi dan eksperimen, maka peneliti membuat garis grid yang diatur pada pemodelan eksperimen dengan memberikan 9 pin baja yang terbuat dari baja Q235 dengan diameter 25mm pada *billet* sebelum proses pemanasan. Panjang dan lokasi dari pin ditunjukkan pada Gambar 2.45. Pin tersebut ditanamkan pada radius yang berbeda pada *billet*. Dari pin tersebut akan diketahui bagaimana pola aliran logam yang terjadi pada saat proses *forging*.



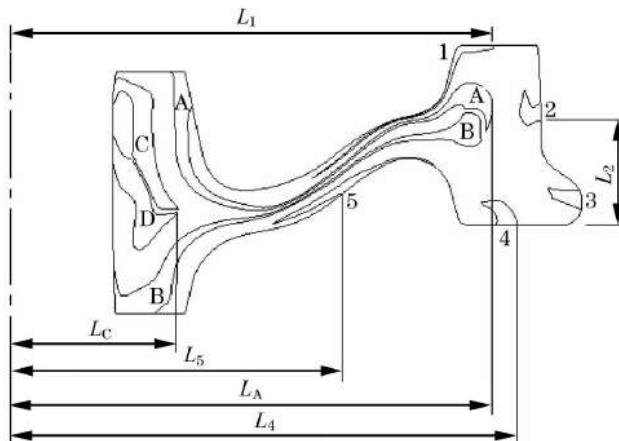
Gambar 2.45 Posisi dan ukuran pin yang tertanam pada *billet* roda kereta

Hasil dari penelitian ini menunjukkan bagaimana pola dan distribusi dari pin yang terdeformasi setelah proses *forging* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.46. Logam pada pin A dan pin B mengalir melalui daerah *web* dan bergerak sepanjang bagian *hub*, *web*, dan beberapa bagian dari rim. Oleh karena itu, dapat diketahui bahwa logam yang berada pada bagian *web* roda kereta itu berasal dari logam yang berada pada area sekitar 0,5R *billet* awal. Dimana R adalah jari-jari *billet*.



Gambar 2.46 Deformasi pin pada roda kereta

Penelitian ini menggunakan validasi dari garis grid yang digunakan pada eksperimen dan simulasi. Garis grid pada simulasi ditunjukkan oleh Gambar 2.47. Dari gambar tersebut dapat diketahui bagaimana garis aliran pin pada roda kereta dari proses simulasi. Hasil perbandingan dari posisi pin yang dilihat dari proses simulasi dan eksperimen ditunjukkan melalui Tabel 2.4.

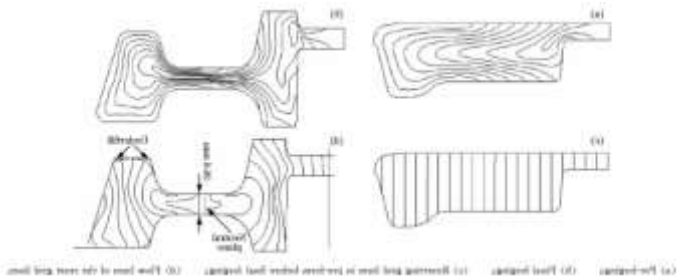


Gambar 2.47 Garis aliran dari pin yang diperoleh dari simulasi

	L_A	L_C	L_1	L_2	L_4	L_5
Simulated value	395	135	395	87	415	272
Experimental value	393	138	394	83	405	251

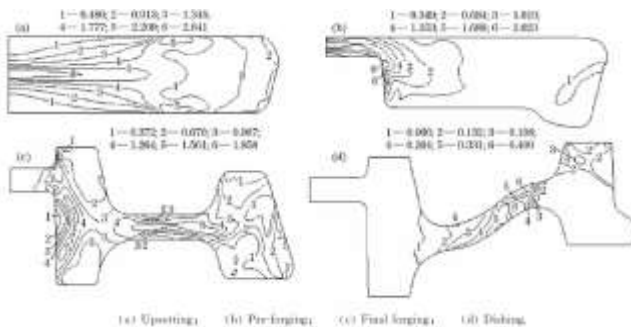
Tabel 2.4 Hasil perbandingan posisi pin dari proses simulasi dan eksperimen

Dari perbandingan tersebut dapat diketahui bahwa hasil dari proses eksperimen dan simulasi memiliki sedikit perbedaan. Aliran logam yang terjadi dari proses pembentukan roda kereta ini ditunjukkan oleh Gambar 2.48 (a) dan (b) dengan menggunakan perpindahan dari garis grid aksial. Sementara itu, pada Gambar 2.48 (c) dan (d) ditunjukkan bagaimana “*neutral plane*” pada bagian *web* desain awal saat proses *forging*. Untuk mengurangi gaya yang dibutuhkan pada saat proses *forging*, maka bidang netral harus tetap berada di bagian tengah pada *web* roda kereta selama proses *forging* agar memastikan bagian *hub* dan *rim* pada roda terisi secara serentak. Gambar 2. 48 (d) menunjukkan bagaimana bagian *hub* terisi dengan sempurna dengan ketebalan bagian *web* sebesar 36,6mm, dan bagian *rim* tidak terisi. Namun sebaliknya, saat bagian *web* lebih ditekan dari target ketebalan yang seharusnya menjadi 35,8mm, bagian *rim* akan terisi dengan sempurna. Oleh karena itu, model awal *billet* pada simulasi harusnya didesain agar volume material yang bergerak ke bagian *hub* sedikit lebih besar dibandingkan kondisi penempaan sebenarnya dengan tujuan untuk mencegah bidang netral berpindah ke bagian *rim* selama proses penempaan.



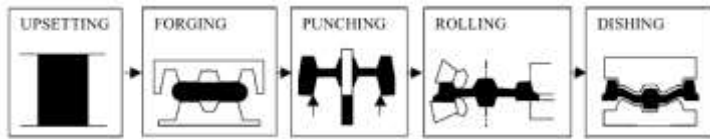
Gambar 2.48 Garis grid pada beberapa tahapan *forging*

Regangan logam selama proses penempaan memiliki pengaruh yang signifikan terhadap perubahan mikrostruktur yang terjadi. Distribusi regangan plastik efektif pada tahapan penempaan yang berbeda ditunjukkan dengan Gambar 2.49. Regangan terbesar terjadi pada tahap *upsetting*, dan regangan terdistribusi lebih merata dibandingkan dengan tahapan lainnya. Pada tahap *pre-forging*, logam mengalami distorsi local pada bagian tengah. Sementara itu, pada bagian *web* dan *rim* mengalami regangan yang kecil. Pada tahap *final forging*, logam mengalami deformasi yang sangat besar, dan regangan terbesar terdapat pada bagian tengah *web*.



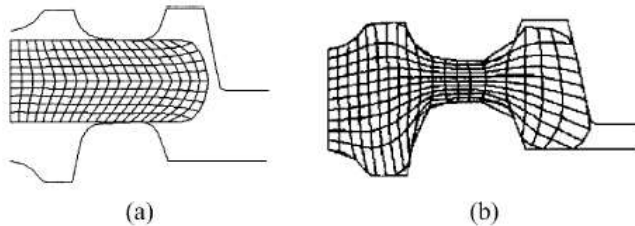
Gambar 2.49 Distribusi ekuivalen regangan plastik pada beberapa tahapan *forging* (Shen et al., 2015)

Penelitian yang keempat dilakukan oleh K. Davey, dkk. dengan judul *Efficient Strategies for The Simulation of Railway Wheel Forming*. Penelitian ini menggunakan metode penelitian axsymmetric dengan *software* DEFORM 2D. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui bagaimana strategi *meshing* yang efektif untuk menjalankan simulasi *forging* roda kereta. Operasi *forging* yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 2.50.



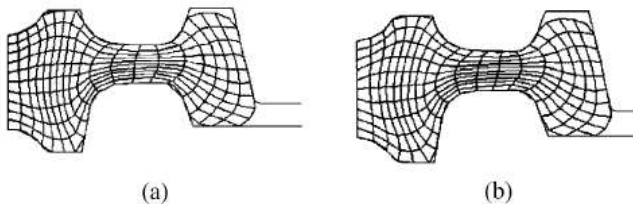
Gambar 2.50 Operasi pembentukan roda kereta

Meshing yang terstruktur akan menghasilkan matriks dengan struktur yang dapat dieksploitasi untuk mendapatkan penyelesaian yang efektif. Penelitian ini hanya membahas tentang metode perbaikan *meshing* untuk menghasilkan *meshing* yang terstruktur. Selain itu, penelitian ini juga hanya membahas proses pembuatan roda kereta pada tahap *forging* saja, 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 2.51 (a). Pada tahap pertama ini, simulasi dibagi menjadi 100 kali peningkatan deformasi dan tidak ada perbaikan *mesh* ataupun perbaikan posisi *boundary node*. Selanjutnya adalah dilakukan *meshing* ulang dengan menggunakan beberapa metode yang diantaranya adalah *elliptical functions*, *modified function*, *algebraic functions*, dan Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) *formulation*.



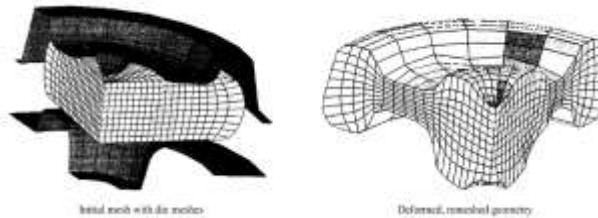
Gambar 2.51 Kondisi awal dan akhir proses *forging* (a) tahap awal (b) tahap akhir

Tanpa perbaikan *mesh*, simulasi mengalami kegagalan pada proses kenaikan *forging* ke 43. 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 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.51 (b). Selain itu perbaikan posisi *boundary node* juga dapat dilakukan dengan menggunakan metode *least square positioning* dan *univariate interpolation positioning*. Hasil dari perbaikan posisi *boundary node* ditunjukkan pada Gambar 2.52. Pada Gambar 2.52 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.



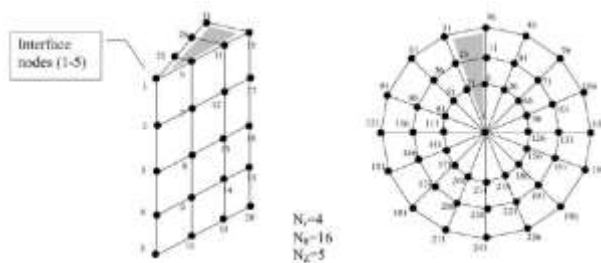
Gambar 2.52 Perbandingan antara penggunaan metode (a) *least square positioning*, (b) *univariate interpolation positioning*

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 hanya melakukan 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 2.53.



Gambar 2.53 Penggunaan metode perbaikan *mesh* pada model 3D

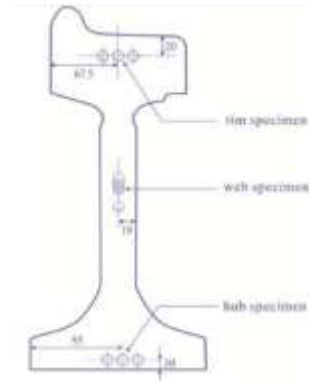
Pendekatan seperti itu dapat digunakan pada beberapa analisa yang menganggap eksentrisitas yang terjadi sangatlah kecil dan dapat diabaikan. Akan tetapi, akan sangat susah untuk menggunakan metode pendekatan dengan bidang radial secara praktis. Landasan penelitian ini untuk melakukan pendekatan seperti itu adalah 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 2.54.



Gambar 2.54 Contoh penerapan *mesh* pada model 3D 360° dengan titik tengah sebagai kumpulan antarmuka

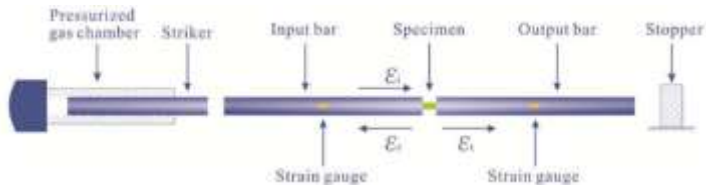
Penggunaan *mesh* seperti pada Gambar 2.54 mungkin tidak dapat digunakan untuk berbagai model geometri 3D. Akan tetapi, pemodelan seperti itu dapat digunakan untuk merepresentasikan geometri benda kerja dalam simulasi pembuatan roda kereta. (Davey et al., 2001)

Penelitian kelima dilakukan oleh Lin Jing, dkk. yang berjudul “*The dynamic compressive behavior and constitutive modeling of D1 railway wheel steel over a wide range of strain rates and temperatures*”. Pada penelitian ini dilakukan uji *quasi-static* dan *dynamic test* pada material roda kereta cepat di China yang biasa disebut dengan *China Railway Highspeed* (CHR). Material yang digunakan pada kereta cepat China yang beroperasi dengan kecepatan 200km/jam – 250km/jam ini terbuat dari D1 *medium carbon steel*. Pengujian ini menggunakan tiga macam specimen yang diambil dari beberapa bagian roda kereta yang berbeda. Spesimen tersebut diambil dari bagian *rim*, *hub*, dan *web* pada roda kereta seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.55.



Gambar 2.55 Bagian spesimen yang digunakan

Dynamic test pada penelitian ini hanya dilakukan untuk spesimen yang berasal dari bagian rim roda kereta saja. Sementara spesimen yang berasal dari bagian web, dan hub roda kereta dilakukan pengujian dengan *quasi-static*. Pengujian *dynamic* pada penelitian ini menggunakan metode pengujian kompresi dengan skema *Hopkinson Bar* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.56.



Gambar 2.56 Skema pengujian kompresi hopkinson bar

Material D1 yang digunakan dalam pengujian ini memiliki komposisi kimia seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.5.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	V	Mo	Fe
0.500	0.300	0.700	0.005	0.007	0.170	0.170	0.025	<0.005	bal

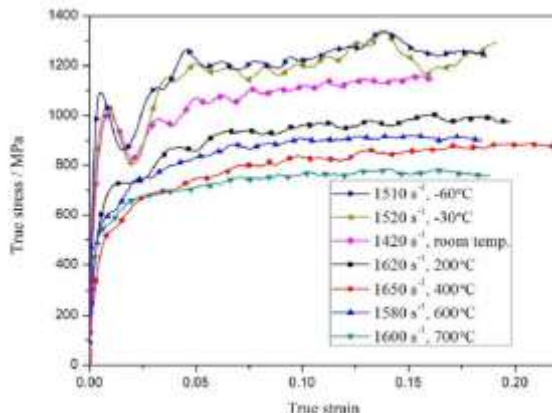
Tabel 2.5 Komposisi kimia material D1 *medium carbon steel*

Hasil dari pengujian *dynamic* ini lalu dimodelkan dengan menggunakan persamaan Johnson-Cook yang dapat merepresentasikan pengaruh dari adanya regangan, laju regangan,

dan suhu terhadap aliran tegangan yang dihasilkan. Konstanta yang diperlukan pada perumusan Johnson-Cook tersebut diantaranya adalah sebagai berikut:

$$\sigma_{dyn} = (A_0 + B_0 \varepsilon^n) \left(1 + C_0 \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right]$$

dimana ε adalah regangan plastis ekuivalen, $\varepsilon/\varepsilon_0$ adalah laju regangan, dan biasanya ε_0 memiliki nilai 1/s, T_r adalah suhu acuan, dan T_m adalah suhu leleh dari material yang diuji. Sementara itu, A_0 , B_0 , n , C_0 , dan m adalah konstanta pada material yang akan didapatkan pada penelitian ini untuk digunakan dalam perumusan Johnson-Cook. Suhu acuan yang digunakan dalam persamaan ini adalah 213 K, dan suhu leleh material adalah 1773 K. Hasil kurva tegangan-regangan dari pengujian *dynamic* ini ditunjukkan pada Gambar 2.57.



Gambar 2.57 Hasil pengujian material dengan suhu dan laju regangan yang berbeda

Setelah mendapatkan kurva dari hasil pengujian tersebut, maka selanjutnya dapat ditentukan nilai dari konstanta-konstanta yang ada pada persamaan Johnson-Cook. Nilai dari konstanta tersebut terdapat pada Tabel 2.6

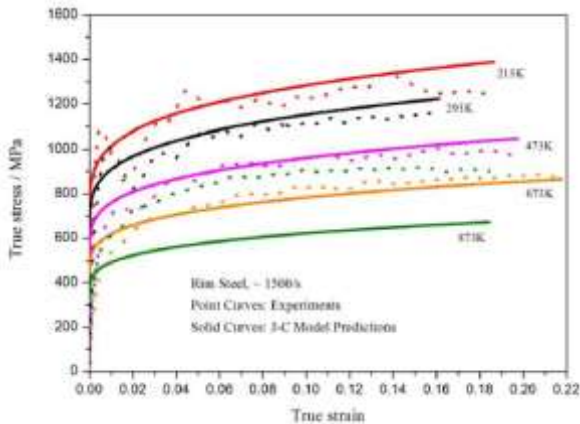
	A_0	B_0	n	C_0	m
Rim	583	926	0.26	0.024	0.77

Tabel 2.6 Nilai dari parameter material untuk pemodelan Johnson-Cook

Oleh karena itu, pemodelan Johnson-Cook untuk material di yang digunakan pada kereta cepat China ini menjadi:

$$\sigma_{dyn} = (583 + 926\varepsilon^{0.26})(1 + 0.024 \ln \dot{\varepsilon}^*) (1 - T^{*0.77})$$

Setelah pemodelan Johnson-Cook dapat dirumuskan, maka selanjutnya penelitian ini membandingkan nilai yang didapat dari hasil pengujian dengan nilai yang dihasilkan dengan persamaan Johnson-Cook seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.58.



Gambar 2.58 Perbandingan hasil eksperimen dengan pemodelan Johnson-Cook pada laju regangan 1500/s dan dengan suhu yang berbeda

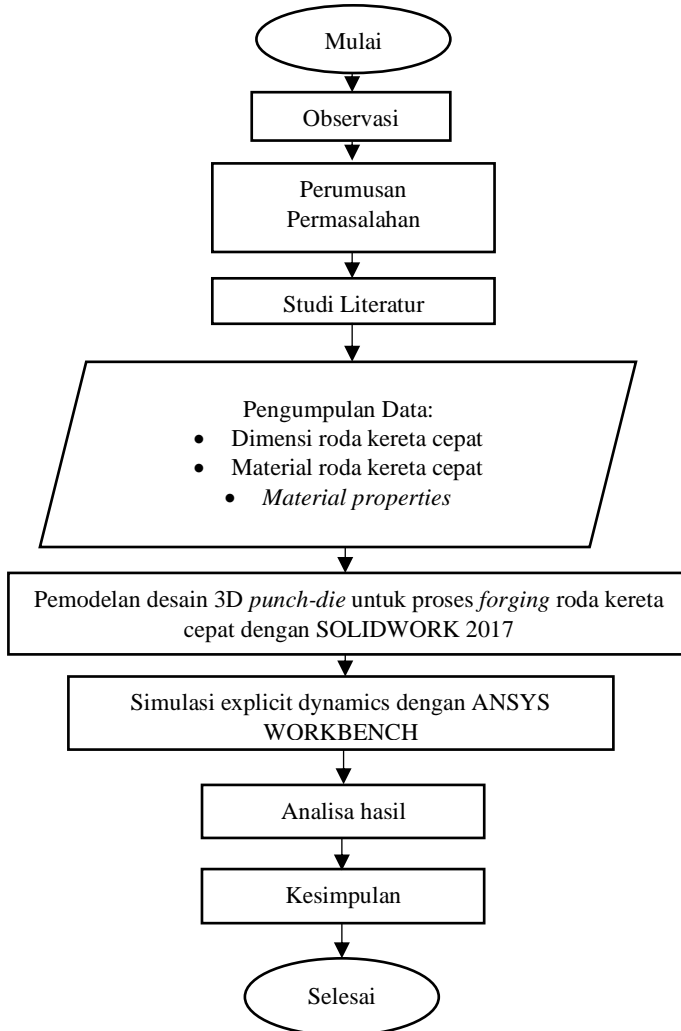
Pada Gambar 2.58 dapat dilihat bahwa perbandingan pemodelan Johnson-Cook dengan hasil pengujian dilakukan untuk laju regangan 1500/s dan dengan suhu yang berbeda-beda. Dari hasil komparasi tersebut dapat diketahui bahwa pemodelan dengan Johnson-Cook memiliki kesetaraan yang baik dengan hasil

pengujian untuk pemodelan dengan suhu di bawah 673 K. Sementara itu, untuk suhu 873 K memiliki perbedaan yang sangat signifikan dari hasil pemodelan Johnson-Cook dengan hasil dari pengujian, dan akurasi dari pemodelan dengan suhu ini perlu diteliti lebih lanjut. (Jing et al., 2017)

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

Metode penelitian adalah sebuah rancangan strategi yang disusun untuk menjawab permasalahan yang ada. Dalam menyusun metode penelitian perlu dibentuk diagram alir agar dapat melaksanakan penelitian yang telah direncanakan secara runtut dan sistematis. Pada Gambar 3.1 telah ditunjukkan diagram alir yang telah peneliti rancang untuk melaksanakan penelitian ini.

3.2 Observasi

Observasi merupakan langkah pertama yang dilakukan oleh penulis dalam melaksanakan penelitian ini. Tujuan dari observasi ini adalah untuk menentukan ruang lingkup permasalahan yang akan dijadikan penelitian. Dalam penelitian ini, penulis melakukan observasi pada lingkup produksi roda kereta cepat dengan menggunakan proses produksi *forging* atau penempaan.

3.3 Perumusan Permasalahan

Langkah berikutnya pada penelitian ini adalah peninjauan permasalahan. Permasalahan yang diangkat pada penelitian ini adalah bagaimana menentukan karakteristik dari mesin *forging* yang dibutuhkan untuk memproduksi roda kereta cepat. Permasalahan yang diangkat pada penelitian ini sesuai dengan keadaan yang ada di Negara Indonesia yang sedang melakukan pembangunan proyek kereta cepat Jakarta-Bandung. Selain itu, dalam waktu dekat Negara Indonesia akan mengembangkan sektor industri dengan mencanangkan rencana pembangunan pabrik produksi roda kereta. Melalui pabrik roda kereta ini diharapkan Negara Indonesia dapat memproduksi roda kereta secara baik melalui proses *forging* atau penempaan, dan roda kereta tersebut bisa dimanfaatkan sendiri ataupun juga diekspor ke negara tetangga.

3.4 Studi Literatur

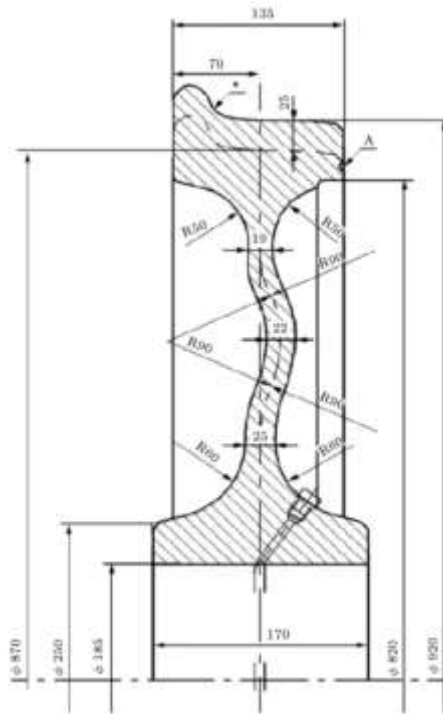
Studi literatur merupakan tahapan berikutnya setelah peneliti merumuskan permasalahan pada penelitian ini. Studi literature bertujuan untuk mengetahui dan mempelajari dasar teori yang

digunakan dalam penelitian ini. Peneliti melakukan studi literatur dengan mencari buku yang menjelaskan tentang proses pembentukan logam terutama dengan proses *forging*, dan buku yang menjelaskan tentang karakteristik material saat melalui proses *forming*. Selain itu, peneliti juga melakukan studi literatur melalui jurnal-jurnal penelitian sebelumnya yang membahas tentang pemodelan dan analisa proses *forging* roda kereta, dan optimasi proses *forging* roda kereta dengan menggunakan metode elemen hingga.

3.5 Pengumpulan Data

3.5.1 Dimensi dan Material

Tahap berikutnya yang dilakukan oleh penulis adalah mengumpulkan data. Data awal yang dibutuhkan dalam penelitian ini adalah dimensi roda kereta cepat, material roda kereta cepat, besar tegangan pada roda kereta cepat, dan *material properties* yang ada pada material yang digunakan. Data-data tersebut didapatkan oleh penulis melalui jurnal-jurnal penelitian yang ada sebelumnya. Pada Gambar 3.2 menunjukkan dimensi roda kereta cepat yang ada di beberapa negara. Pada Tabel 3.1 juga telah ditunjukkan data material roda kereta cepat yang ada di beberapa negara.



Gambar 3.2 Dimensi Roda Kereta yang digunakan

Parameter type	Value
Tread type	S1002CN
Rail type	CHN60
Nominal rolling radius [mm]	460
Back-to-back distance of wheelset [mm]	1353
Track gauge [mm]	1435
Rail cant	1/40
Flange thickness S_d [mm]	33.5
Flange height Sh [mm]	28.2
Wheelset yaw angle [°]	0
Wheelset lateral displacement range [mm]	$-/+ 12$

Tabel 3.1 Karakteristik Roda Kereta Cepat dengan tipe S1002CN

Countries	Wheel	H _w (HB)	Rail	H _r (HB)	H _w /H _r
Europe	ER8	≥ 245	UIC900A	260-300	≥ 0.96
Japan	SSW-Q3R	311-363	JIS E1101	≥ 235	≥ 1.20
China	ER8	≥ 245	U71MnG	260-300	≥ 0.96
	ER8C	≥ 245			≥ 1.03
	ER9	≥ 255			≥ 1.03
	SSW-Q3R	311-363			≥ 1.20
	ER8	≥ 245	U75VG	280-320	≥ 0.90
	ER8C	≥ 245			≥ 0.97
	ER9	≥ 245			≥ 0.97
	SSW-Q3R	311-363			≥ 1.07
	D1 <i>medium carbon steel</i>	≥ 245			≥ 0.97

Tabel 3.2 Data Material Roda Kereta Cepat yang Terdapat di Beberapa Negara

3.5.2 Penentuan Ketebalan *Billet*, dan Besar Gaya *Forging*

Penelitian ini menggunakan beberapa variasi pada proses simulasi *forging*. Variasi tersebut terletak pada ketebalan *billet*, kecepatan *forging*, dan banyaknya tahapan *forging*. Variasi yang diambil ini berdasarkan pada jurnal yang menjadi referensi pada penelitian ini. Pada jurnal tersebut telah disebutkan bahwa variasi dari ketebalan *billet* dan kecepatan *forging* memiliki pengaruh yang signifikan terhadap hasil dari proses *forging* tersebut. Perbedaan yang sangat terlihat adalah pada kemampuan *billet* untuk mengisi ruang pada cetakan dengan baik, dan *force load* yang dibutuhkan untuk proses *forging*. Berdasarkan jurnal

referensi tersebut, maka penelitian ini menggunakan beberapa variasi yang terdapat pada tabel berikut ini.

No.	Ketebalan <i>Billet</i> (mm)
1	70
2	72
3	74
4	76
5	78

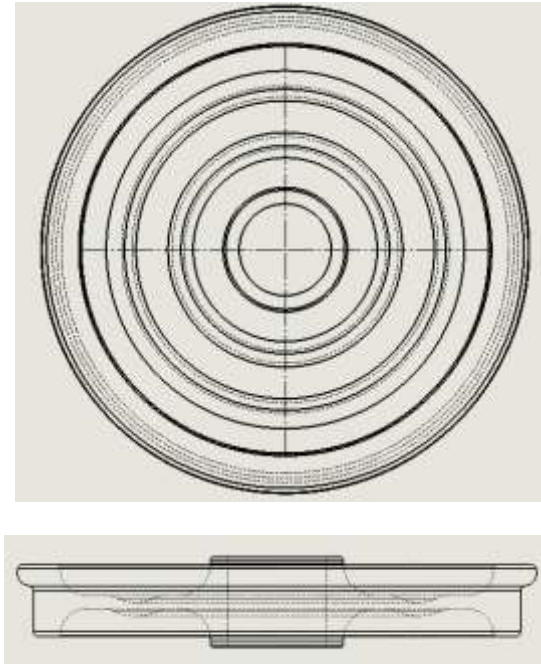
Tabel 3.3 Variasi ketebalan *billet* yang digunakan

No.	Gaya <i>Forging</i> (MN)
1	200
2	230
3	260
4	290
5	320

Tabel 3.4 Variasi gaya *forging* yang digunakan

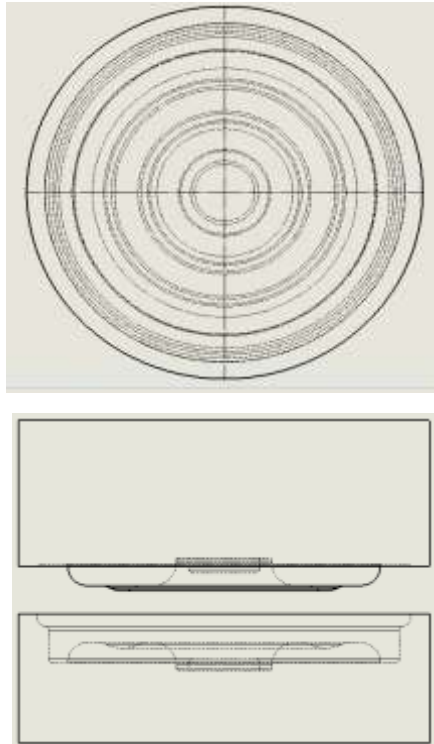
3.6 Pemodelan

Pada tahapan berikutnya, penulis membuat gambar desain tiga dimensi roda kereta cepat yang telah diketahui dimensinya dari studi literatur yang telah dilakukan. Pada penelitian ini, penulis menggunakan dimensi roda kereta cepat yang ada di Negara Jepang. Proses pembuatan desain tiga dimensi ini menggunakan *software* SOLIDWORKS 2017. Hasil dari desain tiga dimensi roda kereta cepat yang telah penulis buat sesuai dengan data yang ada pada referensi ditunjukkan pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Geometri Roda Kereta Cepat

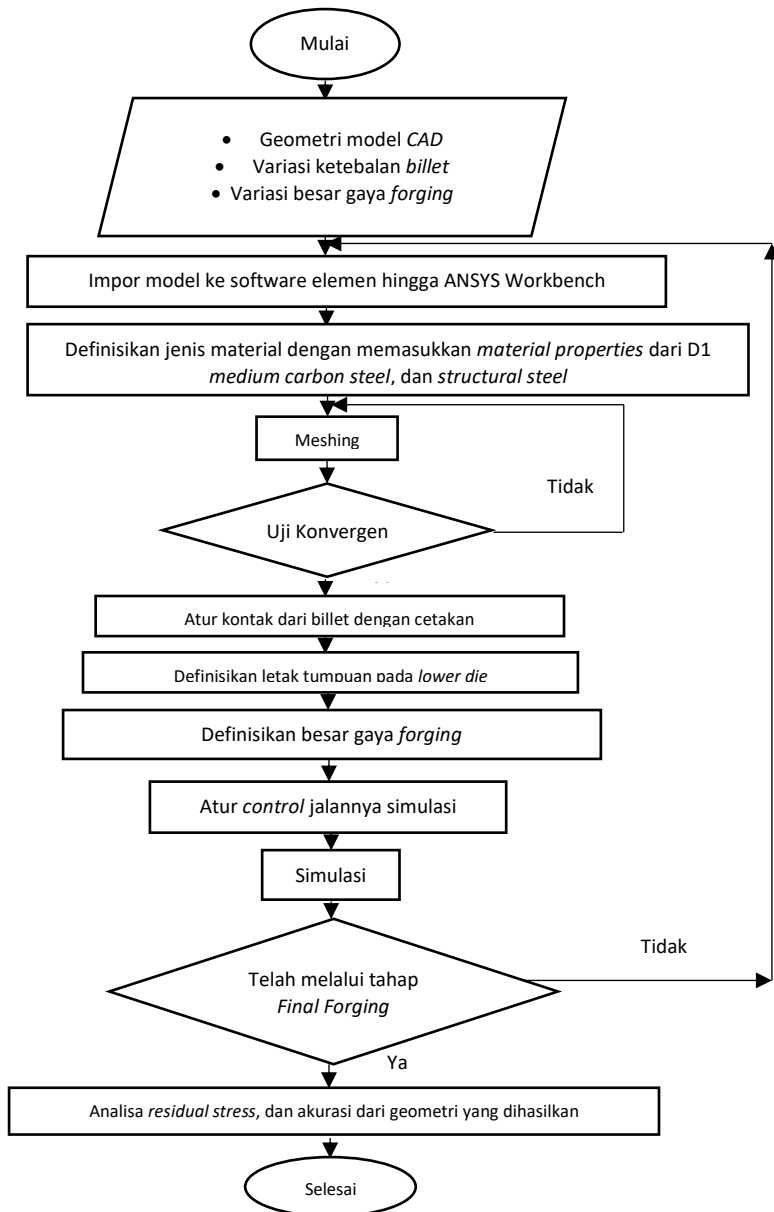
Setelah membuat gambar tiga dimensi roda kereta cepat, penulis membuat desain tiga dimensi cetakan atau *punch-die* yang digunakan untuk memproduksi roda kereta cepat melalui proses *forging*. Desain tiga dimensi dari *punch-die* telah ditunjukkan pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Geometri cetakan roda kereta

3.7 Simulasi

Tahap berikutnya setelah membuat desain tiga dimensi dari cetakan atau *punch-die* untuk memproduksi roda kereta cepat melalui proses *forging* adalah tahap simulasi. Pada tahap ini bertujuan untuk membuat simulasi pemodelan proses *forging* pada produksi roda kereta cepat dengan menggunakan *software* ANSYS. Proses *forging* dalam simulasi ini adalah dengan memberikan pembebanan pada *upper die* atau *punch* hingga akhirnya menumbuk material awal atau *billet* dan terjadi proses *forming*. Proses simulasi ini memiliki beberapa tahapan yang dijabarkan melalui Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Diagram alir proses simulasi

3.7.1 Pendefinisian Model

Langkah pertama pada simulasi ini adalah pendefinisian model dengan mengimpor model desain dari *software* CAD (SOLIDWORKS 2017) ke dalam *software* elemen hingga (ANSYS). Langkah selanjutnya adalah mendefinisikan jenis material pada model. Pada simulasi *forging* roda kereta cepat ini, material yang digunakan didefinisikan sebagai berikut:

Material	Young's Modulus (Gpa)	Yield Strenth (Mpa)	Ultimate Strength (Mpa)	Elongation (%)	Density (kg/m ³)
D1 (medium carbon steel)	213	583	987	18,9	7896
Structural Steel	190	317	580	40,8	7850

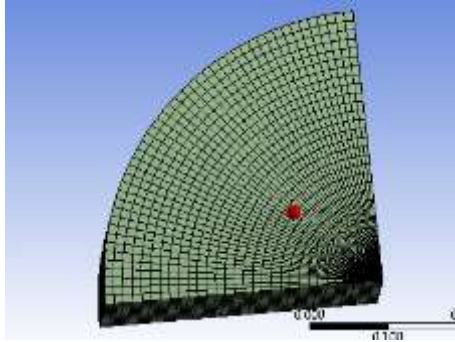
Tabel 3.5 Data properties material standar

	A_0	B_0	n	C_0	m
Rim	583	926	0.26	0.024	0.77

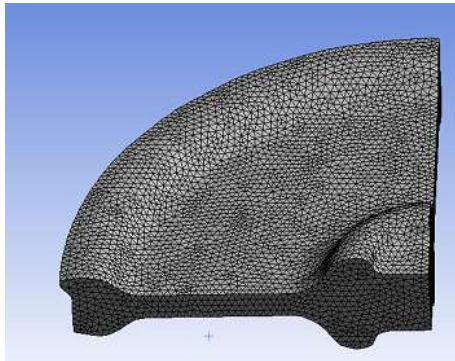
Tabel 3.6 Nilai dari parameter material untuk pemodelan Johnson-Cook

Pada Tabel 3.5 ditunjukkan data *material properties* yang digunakan dalam simulasi ini, dan pada Tabel 3.6 merupakan parameter Johnson-Cook dari material D1 *medium carbon steel* yang digunakan sebagai material dari roda kereta cepat. Material D1 *medium carbon steel* ini memiliki karakteristik yang tidak jauh berbeda dengan material SSW-Q3R yang lebih dikenal di Negara Indonesia. Sementara itu, *structural steel* digunakan sebagai material dari cetakan. Untuk dimensi dari cetakan dan *billet* ditunjukkan pada Gambar 3.6 dan Gambar 3.7.

angle center. Pada penelitian ini digunakan metode *mesh multizone* untuk mendapatkan *mesh* ke arah radial sesuai dengan dasar teori yang ada. Hasil *meshing* ditunjukkan pada Gambar 3.8, dan Gambar 3.9.



Gambar 3.8 *Mesh* pada *billet* pada tahap *pre forming*



Gambar 3.9 *Mesh* pada *billet* pada tahap *final forging*

3.7.3 Proses *Setup*

Tahap selanjutnya setelah model didefinisikan dengan elemen-elemen hingga melalui proses *meshing* adalah proses *setup* untuk mengatur pendefinisian apa saja yang harus ada pada simulasi *forging* ini. Dalam proses *setup* ini penulis mengatur beberapa hal sebelum menjalankan simulasi, agar hasil dari simulasi ini sesuai

dengan apa yang diharapkan untuk menjawab permasalahan yang ada. Beberapa hal tersebut diantaranya adalah:

- a) Mendefinisikan *upper die* dan *lower die* sebagai benda rigid, dan *billet* sebagai benda fleksibel.

Pendefinisian ini bertujuan agar geometri yang mengalami deformasi hanya terfokus pada *billet* saja sebagai benda kerja yang akan diamati.

- b) Mendefinisikan kontak yang terjadi antara *billet* dengan cetakan menjadi *frictional*.

Kontak yang terjadi antara *interface billet* dan cetakan diatur menjadi *frictional* dengan nilai koefisien gesek statis sebesar 0,15. Nilai dari koefisien gesek ini dipertimbangkan untuk merepresentasikan kondisi gesekan antara baja dengan baja pada proses *cold forming*, dan untuk menjalankan simulasi dengan batas kondisi yang mendekati dengan keadaan sebenarnya.

- c) Mendefinisikan permukaan bawah dari *lower die* sebagai tumpuan.

Permukaan bageian bawah dari *lower die* didefinisikan sebagai tumpuan dalam simulasi *forging* ini. Hal tersebut sesuai dengan keadaan proses *forging* sebenarnya, dimana yang bergerak melakukan tumbukan adalah *upper die*, sementara *lower die* menjadi tumpuan proses tumbukan tersebut.

- d) Mendefinisikan besar pembebanan pada *upper die*.

Pemberian besar gaya atau pembebanan pada *upper die* bisa dilakukan dengan cara *input load* pada *software* elemen hingga. Besar gaya yang digunakan sesuai dengan yang terdapat pada Tabel 3.4.

- e) Mengatur pengamatan yang dilakukan.

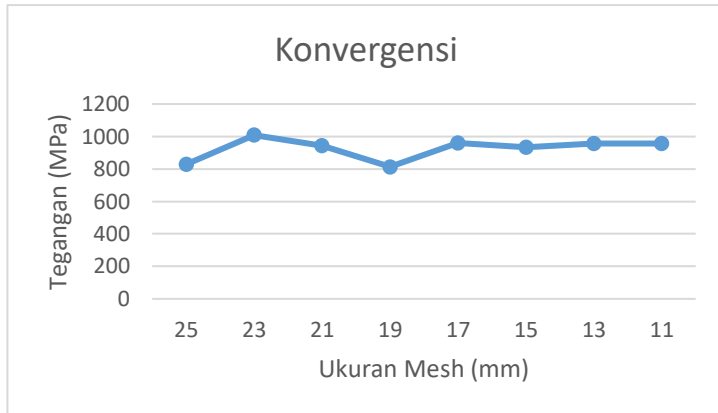
Dalam simulasi proses *forging* ini penulis menggunakan *explicit dynamics* pada *software* ANSYS. Saat menggunakan *explicit dynamics* perlu untuk mengatur jalannya pengamatan yang akan dilakukan pada saat proses simulasi. Hal yang perlu diatur tersebut berupa waktu pengamatan, dan *step* yang ada pada pengamatan.

3.7.4 Uji Konvergensi

Tahapan berikutnya setelah melalui proses *setup* adalah tahapan untuk melakukan uji konvergensi. Setelah melalui proses *setup*, proses simulasi dapat dijalankan. Melalui simulasi *forging* tersebut dapat diketahui bagaimana proses deformasi yang terjadi pada *billet*, apakah sudah memenuhi dimensi geometri roda kereta yang diharapkan sesuai desain. Selain itu, dari simulasi didapatkan juga nilai distribusi tegangan normal dan tegangan *von-misses* pada model. Akan tetapi, dari hasil yang didapatkan tersebut kita belum dapat mengetahui apakah hasil ini valid atau tidak. Hal tersebut berkaitan dengan *mesh* yang digunakan dalam simulasi apakah sudah benar-benar merepresentasikan domain fisis dari model atau belum. Oleh karena itu, perlu untuk dilakukan uji konvergensi terhadap beberapa variasi bentuk *mesh*. Penulis memilih *adaptive mesh*, *Relevance center (Medium)*, *Span Angle Center (Medium)*, dengan metode *multizone* dan memvariasi bentuk *mesh* dengan memvariasikan nilai *element size*.

No.	Ukuran Mesh (mm)	Maximum Principal Stress (Mpa)	Error (%)
1	25	829	
2	23	1008.1	21.6
3	21	944.16	6.3
4	19	813.72	13.8
5	17	959.51	17.9
6	15	935.2	2.5
7	13	958.34	2.5
8	11	956.62	0.2

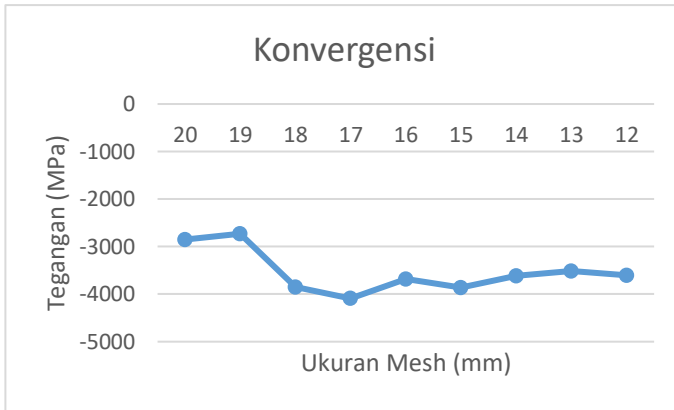
Tabel 3.7 Hasil uji konvergensi Tahap *Pre Forming*



Gambar 3.10 Grafik uji konvergensi Tahap *Pre Forming*

No.	Ukuran Mesh (mm)	Normal Stress Y (Mpa)	Error (%)
1	20	-2854.1	
2	19	-2729.4	4.369153148
3	18	-3849.1	41.02366821
4	17	-4091.1	6.287184017
5	16	-3679.1	10.07064115
6	15	-3864.2	5.031121742
7	14	-3612.9	6.503286579
8	13	-3516.61	2.665172022
9	12	-3604.8	2.507812922
10	11	-3620	0.421660009
11	10	-3736	3.20441989

Tabel 3.8 Hasil Uji Konvergensi Tahap *Final Forging*



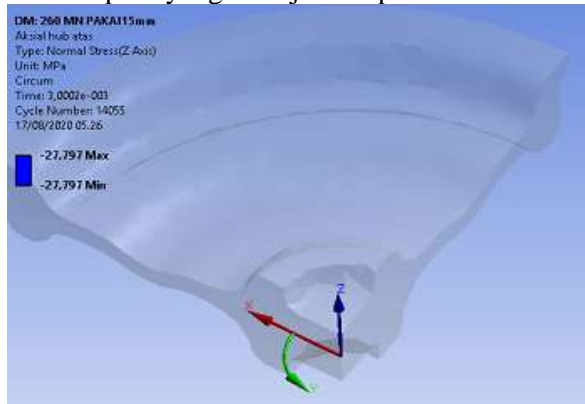
Gambar 3.11 Grafik uji konvergensi Tahap *Final Forging*

3.8 Analisis Simulasi

Melalui uji konvergensi yang dilakukan, akan diketahui apakah hasil yang didapatkan dengan variasi *meshing* yang ada tersebut telah menuju kepada hasil yang konvergen atau belum. Setelah mendapatkan hasil yang konvergen, maka simulasi dapat dilakukan dengan menggunakan metode *meshing* yang telah diketahui konvergensinya. Setelah dilakukan simulasi, maka akan diketahui apakah dari perancangan proses *forging* tersebut telah memenuhi dimensi sesuai desain yang diharapkan atau belum, dan dapat diketahui pula *residual stress* yang terdapat pada roda kereta hasil dari proses *forging* tersebut. Dari *residual stress* yang dihasilkan tersebut akan dilakukan analisa apakah residual stress yang terdapat pada roda kereta cepat hasil *forging* ini berada dalam arah yang bisa dimanfaatkan atau justru berada dalam arah yang merugikan. Apabila arah *residual stress* yang ada pada roda kereta ini berlawanan dengan arah pembebanan roda kereta pada saat operasional, maka residual stress tersebut dapat dimanfaatkan untuk menambah kekuatan pada roda kereta. Akan tetapi, apabila arah dari *residual stress* ini searah dengan pembebanan pada saat operasional, maka *residual stress* tersebut merugikan karena akan membuat tegangan roda pada saat operasional semakin tinggi, dan perlu dilakukan *heat treatment* untuk mengurangi atau

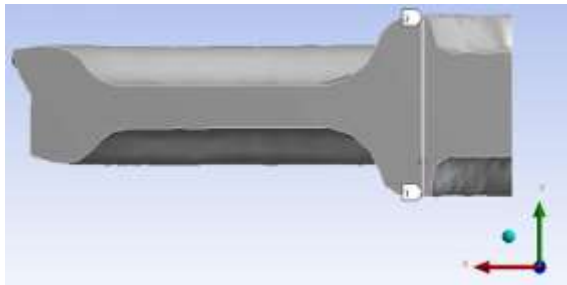
menghilangkan *residual stress* pada roda kereta. Oleh karena itu, *residual stress* dapat menjadi acuan dalam keberhasilan proses *forging* karena *residual stress* ini dapat mempengaruhi bagaimana karakteristik kekuatan dan sifat mekanis lainnya pada roda kereta yang dihasilkan.

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 *circumferential* atau tangensial, dan tegangan pada arah sumbu Z merupakan tegangan pada arah aksial dari roda seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.12.

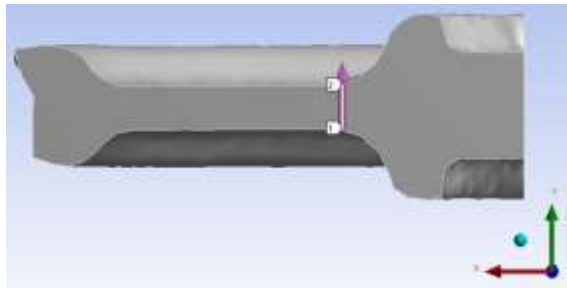


Gambar 3.12 Pengamatan *residual stress* pada arah aksial, radial, dan *circumferential* roda kereta

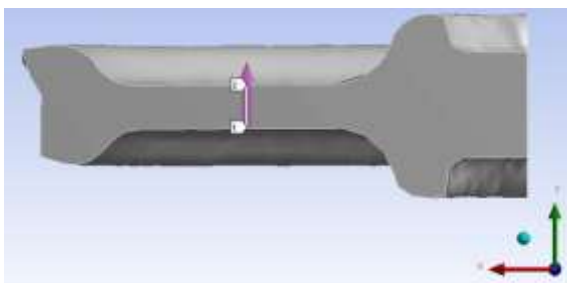
Dalam mengamati besar *residual stress* pada arah radial digunakan 5 titik yang berada pada *billet*. Letak titik pengamatan tersebut berada pada R/5, 2R/5, 3R/5, 4R/5, dan R pada *billet*, dimana R adalah jari-jari *billet*. Salah satu letak titik pengamatan *residual stress* pada arah radial dan aksial ditunjukkan pada Gambar 3.13.



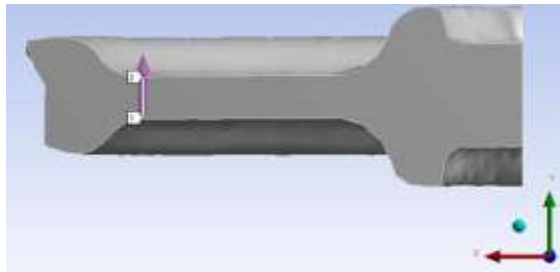
(a)



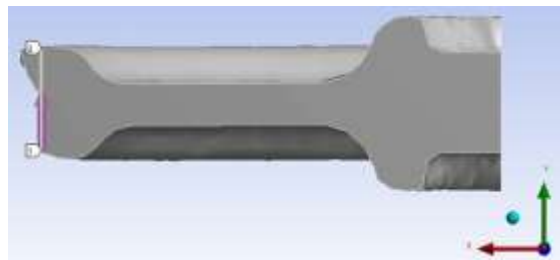
(b)



(c)



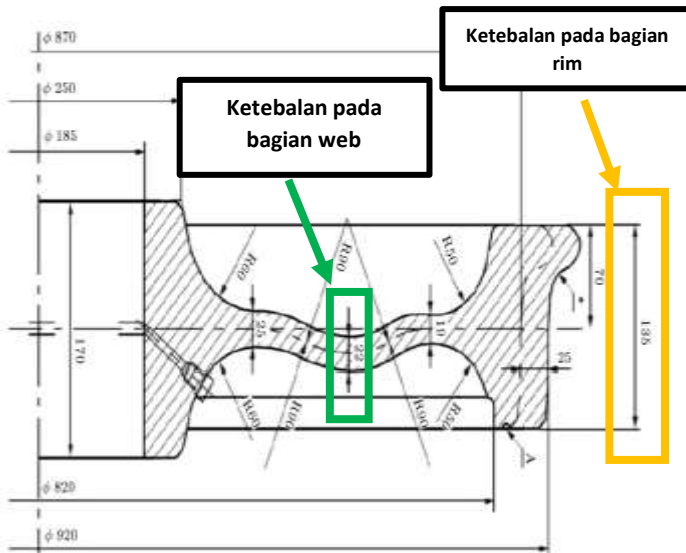
(d)



(e)

Gambar 3.13 (a) R/5 ; (b) 2R/5 ; (c) 3R/5 ; (d) 4R/5 ; (e) R

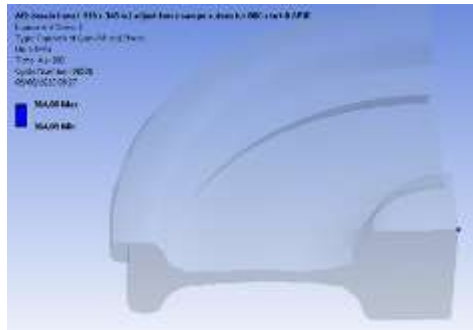
Selain mengamati *residual stress* yang ada pada roda kereta cepat hasil *forging*, pada penelitian ini juga akan diamati bagaimana akurasi dari geometri roda kereta cepat yang dihasilkan. Hal tersebut perlu dilakukan untuk menganalisa deformasi yang terjadi pada *billet* tersebut sudah sepenuhnya plastis atau masih terdapat deformasi elastis yang mengakibatkan terjadinya *spring back*, sehingga dimensi yang dihasilkan dari roda kereta tidak sesuai dengan yang direncanakan. Pengamatan terhadap geometri roda kereta yang dihasilkan ini dilakukan pada bagian *web*, dan bagian rim roda kereta. Letak titik pengamatan untuk menganalisa geometri roda kereta yang dihasilkan ditunjukkan pada Gambar 3.14 yang ditandai dengan garis hijau dan kuning.



Gambar 3.14 Pengamatan geometri roda kereta yang dihasilkan

3.9 Verifikasi Pemodelan Johnson-Cook

Pada saat kondisi pembebanan *forging* dilakukan dengan simulasi *software* ANSYS Workbench 19.2, maka akan dapat diketahui besar tegangan yang terdapat pada *billet* selama proses *forging* dilakukan. Pada tahap ini akan dilakukan verifikasi pemodelan yang dilakukan dengan membandingkan besar tegangan dari hasil simulasi dengan perhitungan *hand calculation* dengan persamaan Johnson-Cook yang terdapat pada Bab 2 untuk menganalisa tegangan yang terjadi pada *billet* yang mengalami deformasi. Tegangan dan regangan pada proses verifikasi ini diambil sari 1 titik pada *billet* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.15. Hasil perubahan tegangan dan regangan yang terdapat pada *billet* dari hasil simulasi ditunjukkan pada Tabel 3.9.



Gambar 3.15 Pengamatan verifikasi pemodelan Johnson-Cook

Waktu (s)	Tegangan (MPa)	Regangan	Keterangan Verifikasi
0,00104	1110,6	0,04141	
0,00112	1187,2	0,085	Verifikasi 1
0,0012	1247,2	0,1024	Verifikasi 2

Tabel 3.9 Data perubahan tegangan dan regangan hasil simulasi

Setelah besar tegangan dan regangan diketahui dari hasil simulasi, maka selanjutnya dilakukan perhitungan manual dengan menggunakan pemodelan Johnson-Cook, dan dengan menggunakan parameter dari material D1 yang telah diketahui. Proses verifikasi dilakukan 2 kali, yaitu verifikasi 1, dan verifikasi 2. Hasil perhitungan untuk verifikasi adalah sebagai berikut:

Parameter Johnson-Cook material D1 medium carbon steel:

Initial yield stress (A) = 583 MPa

Hardening constant (B) = 926 MPa

Hardening exponent (n) = 0,26

Strain rate constant (C₀) = 0,024

Thermal coefficient (m) = 0,77

Melting temperature = 1573,9°C

Ref. strain rate = 1/s

Sehingga perumusan Johnson-Cook untuk material D1 *medium carbon steel* adalah sebagai berikut:

$$\sigma_{dyn} = (583 + 926\varepsilon^{0,26})(1 + 0,024 \ln \dot{\varepsilon}^*) (1 - T^{*0,77})$$

a) Verifikasi 1

Berdasarkan data pada Tabel 3.9, maka didapatkan:

$$strain\ rate = \frac{\Delta\varepsilon}{\Delta t} = \frac{(0,085 - 0,04141)}{0,00112 - 0,00104} = 540,23/s$$

$$\sigma_{dyn} = (583 + 926 \cdot \varepsilon^{0,26})(1 + 0,024 \cdot \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0})(1 - 0)$$

$$\sigma_{dyn} = (583 + 926 \cdot (0,085)^{0,26})(1 + 0,024 \cdot \ln(540,23))(1 - 0) = 1230,8\ MPa$$

Hasil dari simulasi didapatkan $\sigma_{dyn} = 1187,2\ MPa$

$$error = \frac{|1230,8 - 1187,2|}{1230,8} \times 100\% = 3,54\%$$

b) Verifikasi 2

Berdasarkan data pada Tabel 3.9, maka didapatkan:

$$strain\ rate = \frac{\Delta\varepsilon}{\Delta t} = \frac{(0,1024 - 0,085)}{0,0012 - 0,00112} = 225/s$$

$$\sigma_{dyn} = (583 + 926 \cdot \varepsilon^{0,26})(1 + 0,024 \cdot \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0})(1 - 0)$$

$$\sigma_{dyn} = (583 + 926 \cdot (0,1024)^{0,26})(1 + 0,024 \cdot \ln(225))(1 - 0) = 1237,34\ MPa$$

Hasil dari simulasi didapatkan $\sigma_{dyn} = 1247,2\ MPa$

$$error = \frac{|1237,34 - 1247,2|}{1237,34} \times 100\% = 0,8\%$$

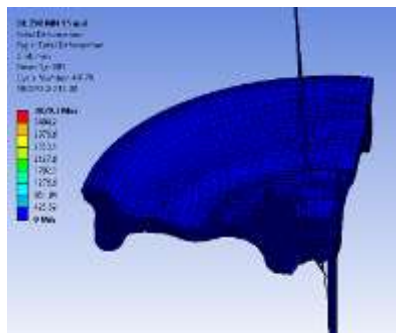
3.10 Perbandingan Hasil Mesh Hexahedral dengan Tetrahedral

Analisa struktural *explicit dynamics* pada *software* ANSYS menunjang penggunaan beberapa bentuk *mesh* yang dapat digunakan pada geometri, baik itu analisa *linear* maupun analisa *nonlinear*. Beberapa bentuk *mesh* yang dapat digunakan pada analisa *explicit dynamics* ini adalah bentuk *mesh hexahedral* maupun *tetrahedral* sebagai *solid mesh*, ataupun bentuk *mesh quadrilateral* maupun *triangular* sebagai *surface mesh*. Dalam melakukan analisa, perlu untuk mempertimbangkan pengaturan penggunaan preferensi *meshing explicit dynamics* secara *default* untuk mendapatkan *mesh* yang sesuai dalam analisa. Penggunaan *mesh* secara *default* ini akan mendiskritisasi geometri dengan optimum secara otomatis. Hal yang sangat penting adalah tentang konsistensi yang dihasilkan dalam analisa melalui bentuk elemen yang digunakan. Pada dasarnya, preferensi *mesh* secara *default* tersebut akan memberikan konsistensi yang cukup baik. Namun, tidak menutup kemungkinan bahwa preferensi *mesh* lainnya akan memiliki konsistensi yang lebih baik.

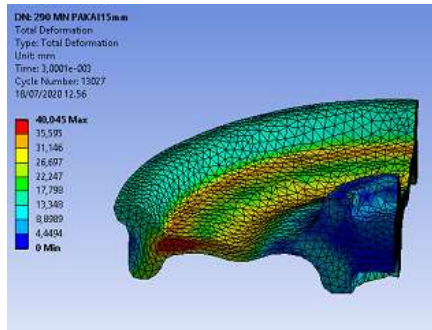
Dalam kasus penelitian ini, perlu dipertimbangkan bagaimana penggunaan elemen yang akan menghasilkan konsistensi yang lebih baik. Analisa pada tahap *preform* masih memiliki bentuk geometri *billet* yang sangat bagus, hanya berbentuk silinder. Secara *default*, *mesh* pada geometri *billet preform* tersebut akan menghasilkan *solid mesh*, berbentuk elemen *hexahedral*. Bentuk elemen *hexahedral* ini memiliki kemampuan untuk menghasilkan bentuk yang seragam ataupun simetris pada arah *circumferential billet* roda kereta. Hal tersebut akan menunjang jalannya analisa untuk menghasilkan kesimetrisan pada arah *circumferential* dari *billet* roda kereta, dimana dengan kesimetrisan tersebut akan mengarahkan analisa pada *billet* roda kereta ini menjadi analisa *axisymmetric*, yang juga banyak digunakan pada penelitian-penelitian terdahulu tentang roda kereta.

Akan tetapi, pada analisa *final forging*, penggunaan elemen *hexahedral* dengan tujuan untuk menghasilkan kesimetrisan pada

arah *circumferential* ini, tidak dapat berjalan dengan baik seperti pada analisa *preforming*. Hal tersebut dikarenakan geometri *billet* pada tahap *final forging* ini tidak bagus dan rapi seperti bentuk geometri *billet* pada tahap *preforming*, yang hanya berbentuk silinder. Geometri *billet* pada tahap *final forging* ini memiliki bentuk yang lebih tidak beraturan, karena merupakan geometri yang dihasilkan dari tahap *preforming*. Apabila analisa *final forging* ini tetap dipaksakan untuk membentuk elemen *hexahedral* pada *billet*, maka jalannya analisa akan memberikan hasil yang memiliki konsistensi yang sangat buruk. Hal tersebut dikarenakan bentuk geometri *billet* yang tidak beraturan tadi tetap dipaksakan untuk membentuk elemen *hexahedral*, sehingga ditorsi pada *mesh* tersebut akan sangat besar, dan akan memberikan hasil yang sangat buruk seperti pada Gambar 3.16. Elemen *hexahedral* yang digunakan pada analisa tersebut tidak dapat mempertahankan bentuknya, sehingga akan berubah menjadi bentuk piramida. Sementara itu, analisa *explicit dynamics* ini tidak menunjang penggunaan elemen dengan bentuk piramida. Sehingga, bentuk elemen piramida tadi akan diubah menjadi dua elemen tetrahedral secara otomatis, dan akan terdapat *warning* pada jalannya simulasi. Oleh karena itu, pada tahap *final forging* digunakan bentuk elemen tetrahedral seperti pada Gambar 3.17. Elemen tetrahedral ini akan memberikan hasil yang lebih konsisten dan lebih baik apabila dibandingkan dengan penggunaan elemen *hexahedral* untuk tahap *final forging*.



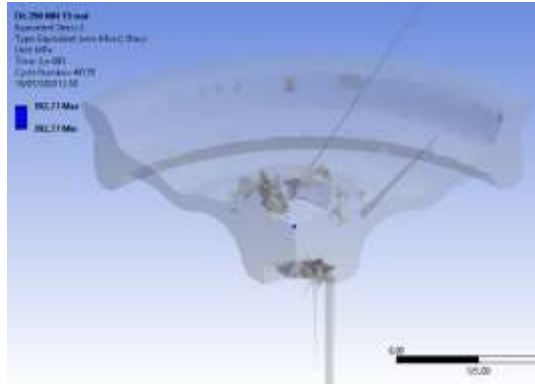
Gambar 3.16 Distorsi pada *Mesh Hexahedral*



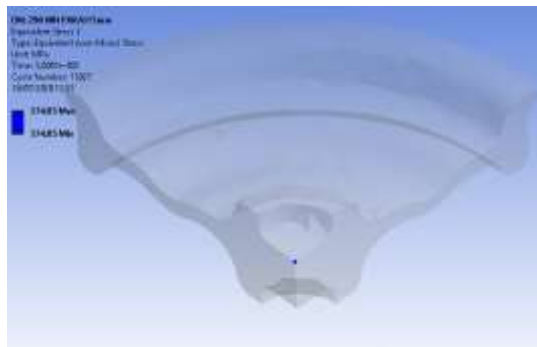
Gambar 3.17 Distorsi pada *Mesh Tetrahedral*

Penggunaan elemen tetrahedral ini juga memberikan hasil dengan kesimetrisan pada arah *circumferential* yang tidak kalah baiknya dengan penggunaan elemen berbentuk *hexahedral* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.17. Walaupun tetap ada beberapa bagian yang memberikan hasil tidak simetris pada arah *circumferential* dengan penggunaan elemen tetrahedral ini. Hasil dari penggunaan elemen tetrahedral ini juga perlu dibandingkan dengan hasil dari penggunaan elemen *hexahedral* sebagai proses verifikasi. Perbandingan tersebut terdapat pada Gambar 3.18, dan Gambar 3.19. Pada gambar tersebut dilakukan pengamatan terhadap titik yang sama, dengan bentuk geometri, dan *set up* yang sama pula, hanya proses pemodelan saja yang berbeda. Pada Gambar 3.18 dilakukan proses pemodelan *mesh* dengan bentuk elemen hexahedral, dan ukuran elemen 11mm. Sementara pada Gambar 3.19 dilakukan proses pemodelan *mesh* dengan bentuk elemen tetrahedral, dan ukuran elemen 11mm. Hasil tegangan ekuivalen dengan bentuk elemen *hexahedral* sebesar 392,77 MPa. Sementara itu, dengan bentuk elemen tetrahedral menghasilkan tegangan ekuivalen sebesar 374,85 MPa. Solusi yang didapatkan dengan menggunakan dua bentuk elemen yang berbeda tersebut, tidak menunjukkan perbedaan hasil yang terlalu signifikan pada pengamatan terhadap titik yang sama, dan dengan semua *set up* yang sama pula. Sehingga analisa pada tahap *final forging* ini akan lebih baik untuk digunakan bentuk elemen tetrahedral untuk

mendapatkan hasil yang lebih konsisten, dan distorsi *mesh* yang lebih kecil apabila dibandingkan dengan bentuk elemen *hexahedral*.



Gambar 3.18 *Equivalent Stress* dengan *Mesh Hexahedral*



Gambar 3.19 *Equivalent Stress* dengan *Mesh Tetrahedral*

BAB IV PEMBAHASAN

4.1 Pengaruh Besarnya Gaya Forging terhadap Terbentuknya Tegangan Sisa Kompresi

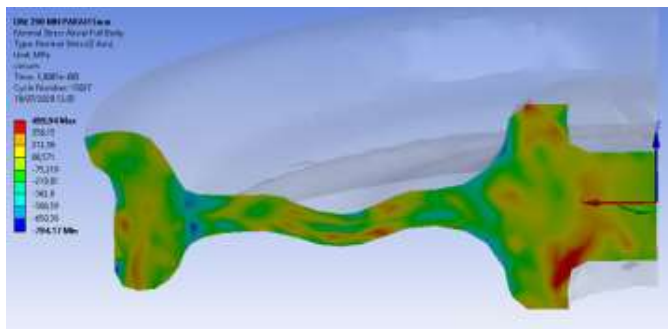
Pembuatan suatu geometri dengan menggunakan proses *forging*, membutuhkan besaran gaya tertentu untuk dapat menghasilkan dimensi geometri yang sesuai dengan dimensi yang telah direncanakan. Begitu pula dengan proses *forging* roda kereta cepat ini. Selain dapat mempengaruhi dimensi, besarnya gaya *forging* yang dikenakan terhadap *billet*, juga akan mempengaruhi besarnya tekanan yang akan terjadi pada *billet* selama proses *forging*. Sesuai dengan prinsip *residual stress*, tegangan yang terbentuk pada *billet* karena proses *forging* dengan memberikan suatu gaya dengan besaran tertentu, akan tetap ada atau tetap tinggal pada *billet* tersebut pada saat pembebanan yang diberikan untuk proses *forging* tadi telah dihilangkan. Tegangan pada *billet* yang terbentuk karena pembebanan *forging* tersebut, tidak dapat hilang dengan sempurna, dan akan tetap tinggal pada *billet* tersebut sebagai tegangan sisa.

Sementara itu, tegangan sisa yang terdapat pada roda kereta akibat dari proses pembuatan ini, memiliki pengaruh yang cukup signifikan pada saat roda tersebut digunakan dalam operasional. Tegangan sisa ini berpengaruh terhadap performa kekuatan roda kereta, terutama ketahanan roda kereta terhadap pembebanan *fatigue* pada saat operasional. Sesuai dengan penelitian yang ada sebelumnya, tegangan sisa pada roda kereta ini dapat membantu meningkatkan *fatigue life* roda kereta tersebut. Meningkatnya *fatigue life* ini akan dapat terjadi karena tegangan sisa yang bersifat kompresi. Tegangan kompresi tersebut dapat membantu mencegah terjadinya inisiasi *crack* pada saat operasional. Oleh karena itu, roda kereta hasil dari proses produksi ini perlu untuk memiliki tegangan sisa yang bersifat kompresi. Untuk mendapatkan tegangan sisa yang bersifat kompresi ini perlu dilakukan proses perlakuan panas, karena roda kereta yang dihasilkan dari tahapan-

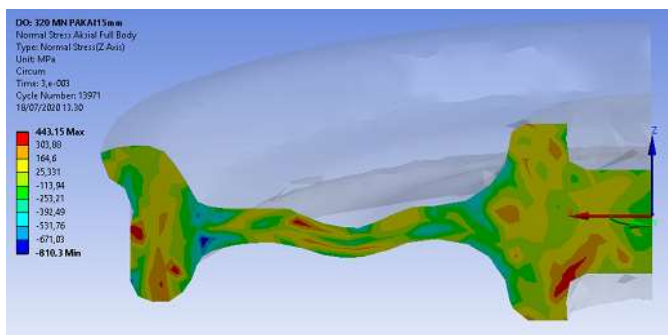
tahapan pembuatan ini tetap akan menghasilkan tegangan sisa yang bersifat tarik, yang akan membantu untuk terjadinya inisiasi *crack*, dan kegagalan *fatigue*. Berdasarkan hal tersebut, perlu untuk menganalisa bagian-bagian mana saja pada roda kereta yang merupakan bagian kritis, karena didominasi oleh tegangan sisa yang bersifat tarik, yang terbentuk melalui proses *forging*. Selain itu, perlu juga untuk mengetahui bagaimana pengaruh besarnya gaya *forging* yang digunakan, terhadap terbentuknya tegangan sisa yang bersifat kompresi ini.

4.2.1 Pengaruh Gaya Terhadap Tegangan Residual pada Arah Aksial

Salah satu tegangan sisa yang terdapat pada roda kereta hasil dari proses *forging* ini adalah tegangan sisa yang ada pada arah aksial dari roda kereta. Adanya tegangan sisa pada arah aksial ini, akan berpengaruh terhadap kekuatan roda kereta pada saat mengalami pembebanan pada arah aksial, yaitu pada saat berbelok. Hasil dari simulasi *forging* roda kereta cepat ini menunjukkan bahwa pada roda kereta yang dihasilkan masih terdapat banyak bagian yang terdapat tegangan sisa yang bersifat tarik pada arah aksial, baik itu pada bagian rim, web, dan hub roda kereta seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.1, dan Gambar 4.2. Bagian roda kereta yang didominasi oleh tegangan sisa tarik pada arah aksial ini adalah bagian hub, dan bagian rim apabila dibandingkan dengan bagian lainnya. Oleh karena itu, perlu dilakukan proses perlakuan panas terhadap roda kereta hasil proses *forging* ini, dengan tujuan untuk menghilangkan tegangan sisa yang bersifat tarik pada arah aksial. Berdasarkan hasil simulasi ini, bagian hub, dan bagian rim roda kereta merupakan bagian kritis untuk dilakukan pengamatan setelah proses perlakuan panas, terkait dengan tegangan sisa tarik pada arah aksial yang mendominasi bagian hub, dan bagian rim tersebut.



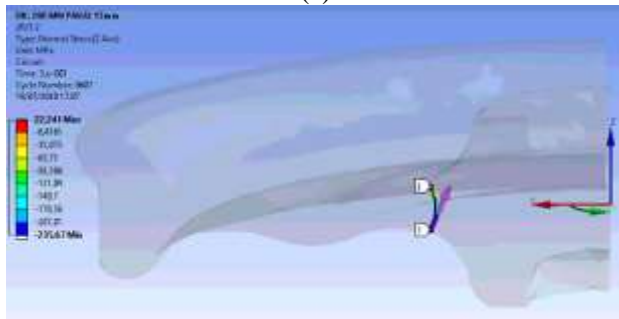
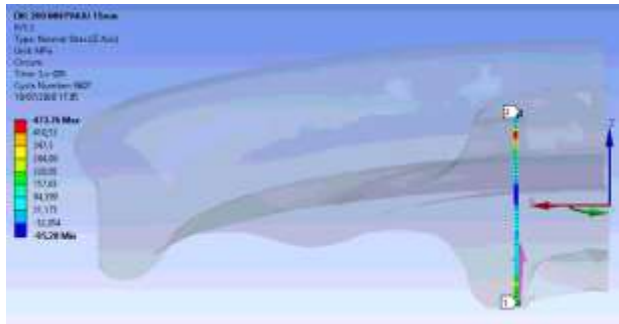
Gambar 4.1 Tegangan Sisa Arah Aksial dengan Gaya *Forging* 290MN



Gambar 4 2 Tegangan Sisa Arah Aksial dengan Gaya *Forging* 320MN

Namun, pada roda kereta hasil proses *forging* tersebut juga terdapat bagian-bagian yang didominasi oleh tegangan sisa kompresi pada arah aksial. Diantaranya adalah bagian web, dan juga bagian yang menghubungkan antara web dengan rim, serta bagian yang menghubungkan antara web dengan hub. Tegangan sisa kompresi inilah yang akan dapat membantu mencegah terjadinya inisiasi *crack* dan meningkatkan ketahanan terhadap *fatigue* pada saat operasional roda kereta tersebut. Oleh karena itu, perlu juga untuk mengamati bagaimana pengaruh besar gaya *forging* yang diberikan terhadap terbentuknya tegangan sisa kompresi pada arah aksial roda kereta tersebut. Pengamatan

terhadap terbentuknya tegangan sisa kompresi akibat pengaruh dari besar gaya *forging* yang diberikan ini dilakukan pada 5 lokasi pengamatan. Lokasi pengamatan tersebut di antaranya adalah R/5, 2R/5, 3R/5, 4R/5, dan R. Dimana R adalah jari-jari *billet* roda kereta. Lokasi pengamatan terbentuknya tegangan sisa kompresi tersebut ditunjukkan pada Gambar 4.3.

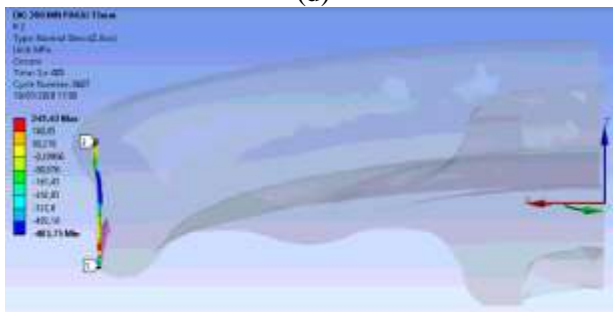




(c)



(d)



(e)

Gambar 4.3 (a) R/5; (b) 2R/5; (c) 3R/5; (d) 4R/5; (e) R

Lokasi pengamatan R/5 merupakan representasi dari bagian hub, lokasi pengamatan 2R/5 merupakan representasi dari bagian yang menghubungkan antara web dan hub, lokasi pengamatan 3R/5

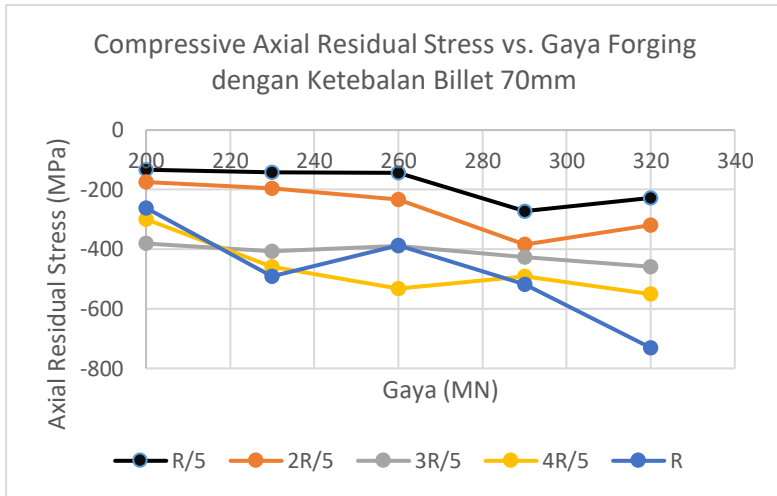
merupakan representasi dari bagian tengah web, lokasi pengamatan 4R/5 merupakan representasi dari bagian yang menghubungkan antara web dengan rim, dan lokasi pengamatan R merupakan representasi dari bagian rim. Gambar 4.3 merupakan hasil dari proses *final forging* dengan ketebalan *billet* awal sebesar 78mm, dan gaya *forging* yang diberikan sebesar 200MN. Pengamatan terhadap pembentukan tegangan sisa kompresi pada arah aksial ini dilakukan dengan cara mengamati berapa nilai maksimum dari tegangan sisa kompresi yang terbentuk pada setiap lokasi pengamatan. Dengan menggunakan koordinat polar lokal yang terdapat pada Gambar 4.3, maka tegangan sisa kompresi yang terbentuk tersebut diamati pada arah sumbu Z, dan nilai tegangan sisa kompresi terbesar adalah nilai yang paling negatif dari hasil pengamatan tersebut. Pada Gambar 4.3 didapatkan hasil nilai tegangan sisa kompresi maksimum pada lokasi pengamatan R/5 sebesar -95,28MPa, pada lokasi pengamatan 2R/5 sebesar -235,67 MPa, pada lokasi pengamatan 3R/5 sebesar -249,53 MPa, pada lokasi pengamatan 4R/5 sebesar -345,22, dan pada lokasi pengamatan R sebesar -483,75 MPa. Hasil analisa nilai maksimum tegangan sisa kompresi pada arah aksial dari setiap variasi yang digunakan pada penelitian ini telah dituliskan pada Tabel 4.1.

Ketebalan Billet (mm)	Gaya (MN)	Normal Stress Z (<i>Compressive Residual Axial Stress</i>) (Mpa)				
		R/5	2R/5	3R/5	4R/5	R
70	200	-133.26	-174.45	-380.8	-299.25	-261.5
	230	-141.53	-196.36	-407.5	-458.03	-491.5
	260	-144	-233.2	-388.3	-532.4	-387.9
	290	-272	-384.1	-427.22	-490.5	-517.1
	320	-227.8	-318.2	-458.7	-550.7	-730.7
72	200	-309.1	-246	-248.8	-314.8	-286.8
	230	-327.7	-294	-212.6	-418.1	-325.4
	260	-393.3	-288.8	-298.6	-468.8	-393.7
	290	-303.9	-314.2	-291	-416	-487.6
	320	-451.8	-321.4	-396.8	-435.1	-475.4

74	200	-246.34	-283.2	-382	-322.1	-231.5
	230	-305.41	-377.5	-408.3	-369.2	-329.1
	260	-413.8	-365.1	-375.5	-428.04	-355
	290	-322.2	-310.4	-418.8	-451	-384.6
	320	-621.2	-530	-422.1	-560.7	-363.8
76	200	-241.5	-388.7	-348	-472.5	-511.4
	230	-214	-390	-412.7	-571.4	-535.5
	260	-241.8	-390	-337	-583.6	-564
	290	-366.3	-397.4	-401.3	-573	-642.7
	320	-771.4	-563.7	-506.1	-693	-634.2
78	200	-95.3	-236	-250	-345.2	-483.7
	230	-115	-241.2	-231.5	-423.6	-619.6
	260	-137.5	-253.3	-266.3	-457.7	-650
	290	-185	-301.2	-279	-578	-607.2
	320	-189	-379	-340	-640.2	-619

Tabel 4.1 Nilai Maksimum Tegangan Sisa Kompresi pada Arah Aksial

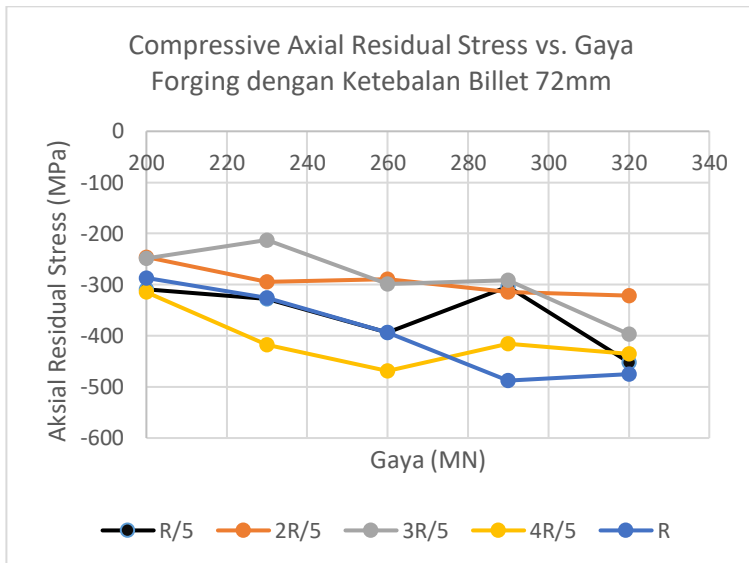
Setelah mendapatkan nilai maksimum tegangan sisa kompresi pada arah aksial dari setiap variasi yang digunakan, maka selanjutnya perlu untuk membuat grafik antara nilai maksimum tegangan sisa kompresi pada arah aksial tersebut dengan gaya *forging* yang diberikan. Dari grafik tersebut akan dapat diketahui bagaimana pengaruh besar gaya *forging* yang diberikan terhadap tegangan sisa kompresi pada arah aksial yang terbentuk pada roda kereta. Pada sub bab ini digunakan grafik pengaruh besar gaya *forging* yang digunakan pada setiap ketebalan *billet* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.4 hingga 4.8.



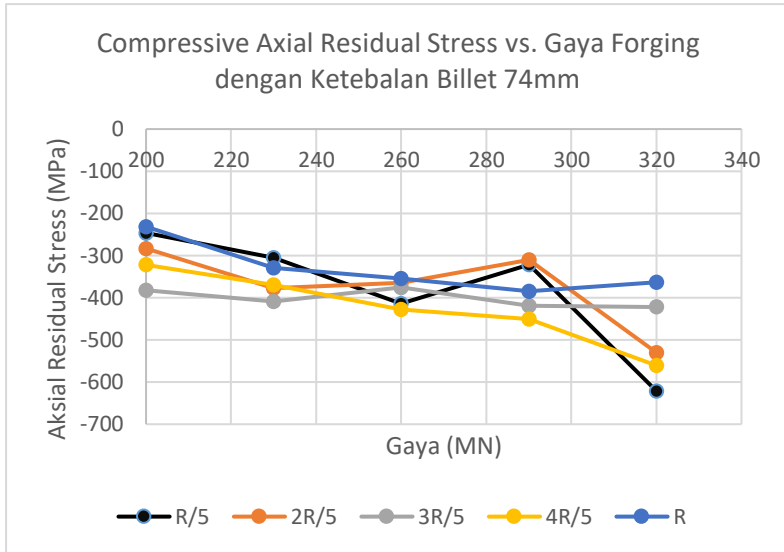
Gambar 4.4 Gaya *Forging* vs. Nilai Maksimum Tegangan Sisa Kompresi pada Arah Aksial dengan Ketebalan *Billet* 70mm

Pada Gambar 4.4 diketahui bahwa terdapat sedikit fluktuasi dari *trend* gaya *forging* yang diberikan terhadap hasil tegangan sisa kompresi pada arah aksial. Namun, apabila *trend* pada grafik tersebut didekati dengan sebuah *trendline* linier, maka dapat terlihat bahwa pada grafik pengaruh gaya *forging* yang diberikan terhadap nilai maksimum tegangan sisa kompresi pada arah aksial tersebut memberikan *trendline* yang menurun seiring dengan bertambahnya gaya *forging* yang diberikan. *Trendline* menurun tersebut dapat diamati pada semua lokasi pengamatan dari R/5 hingga R, dan dapat diamati pada semua variabel ketebalan *billet* yang digunakan. Fluktuasi, dan ketidak konsistenan terbesar terjadi pada lokasi pengamatan R/5. Hal tersebut dikarenakan banyaknya distorsi terhadap *mesh* atau elemen pada bagian hub. *Trendline* yang menurun pada grafik tersebut menunjukkan adanya peningkatan nilai maksimum tegangan sisa kompresi arah aksial pada setiap lokasi pengamatan, seiring dengan penambahan besar gaya *forging* yang diberikan. Rata-rata peningkatan nilai maksimum tegangan sisa pada arah aksial ini berkisar antara

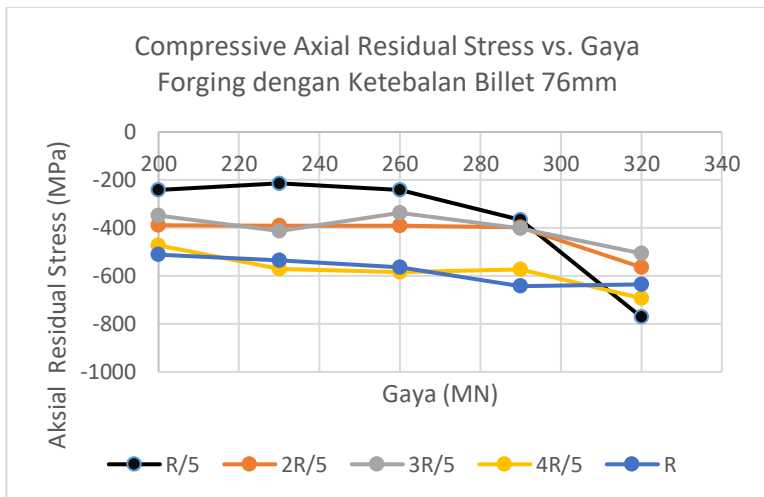
64,67MPa hingga 86,16MPa. Adanya peningkatan nilai tegangan sisa pada arah aksial ini sesuai dengan prinsip bahwa besar tegangan akan berbanding lurus dengan besar gaya yang diberikan, terlebih pengamatan tegangan sisa aksial pada *billet* ini memiliki arah yang sama dengan arah pembebanan pada proses *forging*. Dapat diamati pula bahwa hasil yang ditunjukkan oleh Gambar 4.5 hingga Gambar 4.8 memiliki kecenderungan yang sama seperti yang ada pada hasil yang ditunjukkan oleh Gambar 4.4.



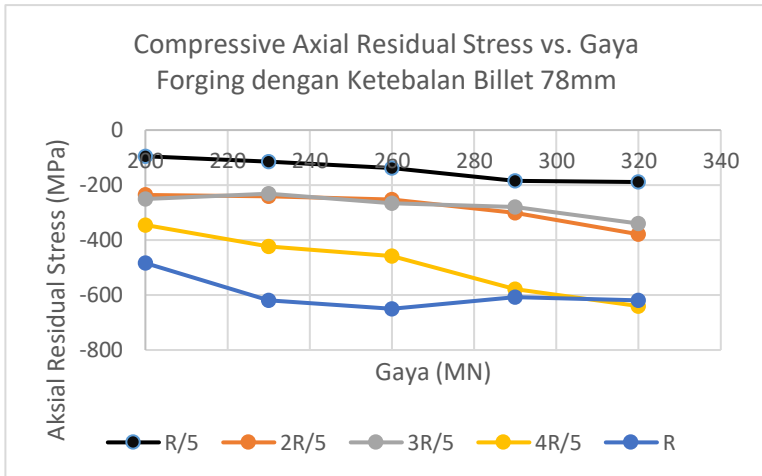
Gambar 4.5 Gaya *Forging* vs. Nilai Maksimum Tegangan Sisa Kompresi pada Arah Aksial dengan Ketebalan *Billet* 72mm



Gambar 4.6 Gaya *Forging* vs. Nilai Maksimum Tegangan Sisa Kompresi pada Arah Aksial dengan Ketebalan *Billet* 74mm



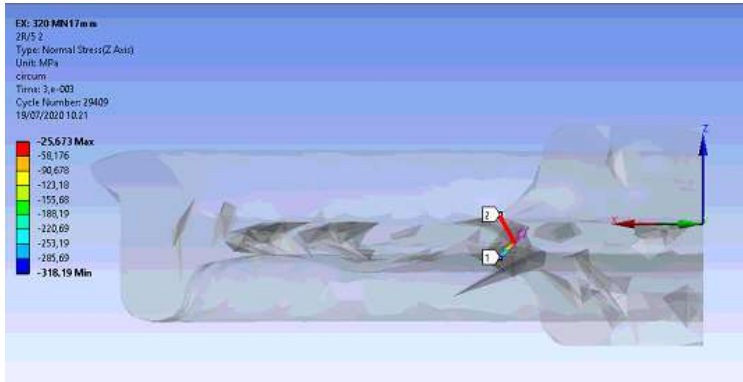
Gambar 4.7 Gaya *Forging* vs. Nilai Maksimum Tegangan Sisa Kompresi pada Arah Aksial dengan Ketebalan *Billet* 76mm



Gambar 4.8 Gaya *Forging* vs. Nilai Maksimum Tegangan Sisa Kompresi pada Arah Aksial dengan Ketebalan *Billet* 78mm

Pada Gambar 4.4 hingga Gambar 4.8 dapat diketahui bahwa pada setiap lokasi pengamatan dari R/5 hingga R akan memiliki *trend* yang berfluktuasi antara besar gaya *forging* yang digunakan, terhadap nilai maksimum tegangan sisa kompresi pada arah aksial yang dihasilkan. Ketidak konsistenan *trend* dari gaya *forging* yang digunakan terhadap nilai maksimum tegangan sisa kompresi arah aksial yang dihasilkan dari simulasi ini disebabkan oleh beberapa faktor yang telah penulis amati. Faktor yang pertama adalah adanya distorsi pada *mesh* atau elemen yang digunakan pada *billet* dalam analisa ini. Distorsi pada *mesh* atau elemen tersebut menyebabkan terganggunya pula perhitungan analisa yang ada pada setiap node, termasuk juga nilai tegangan yang dihasilkan. Walaupun penggunaan elemen tetrahedral ini dimaksudkan untuk menekan distorsi pada *mesh* atau elemen yang terjadi, bukan berarti distorsi pada *mesh* tersebut sudah tidak ada sama sekali. Distorsi pada *mesh* tetrahedral tetap akan terjadi walaupun lebih kecil apabila dibandingkan dengan penggunaan elemen *hexahedral*. Distorsi pada *mesh* atau elemen tersebut akan mempengaruhi bagaimana jalannya perhitungan pada setiap *node*, dan akan mempengaruhi

hasil yang diberikan pada akhirnya. Distorsi yang terjadi pada *mesh* tersebut ditunjukkan pada Gambar 4.9.



Gambar 4.9 Distorsi pada *Mesh*

Distorsi yang terjadi tersebut akan semakin besar apabila gaya *forging* yang diberikan semakin besar pula, sehingga saat pemberian gaya *forging* pada proses *set up* semakin besar, maka hasil yang akan didapatkan nantinya akan cenderung menyimpang karena juga akan mempengaruhi perhitungan pada beberapa lokasi pengamatan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.9. Pada Gambar 4.9 tersebut memberikan hasil pada lokasi pengamatan 2R/5 yang menggunakan *path* garis lurus, berubah bentuk menjadi seperti dua garis yang membentuk sudut tertentu. Kondisi ideal yang seharusnya didapatkan adalah *path* yang semula merupakan garis lurus tersebut seharusnya berubah bentuk menjadi garis setengah lingkaran untuk mengikuti pola deformasi seperti pada Gambar 4.3 (b). Namun, kondisi distorsi yang terjadi pada *mesh* atau elemen seperti ini perlu dianalisa lebih lanjut, apakah distorsi tersebut memiliki makna bahwa elemen yang ada telah melewati batas *erosion control* yang ada pada pengaturan jalannya analisis, ataukah distorsi pada *mesh* tersebut memang murni terjadi karena penggunaan bentuk elemen yang kurang sesuai dengan geometri yang ada. Pada jalannya penelitian ini, simulasi *explicit dynamics*

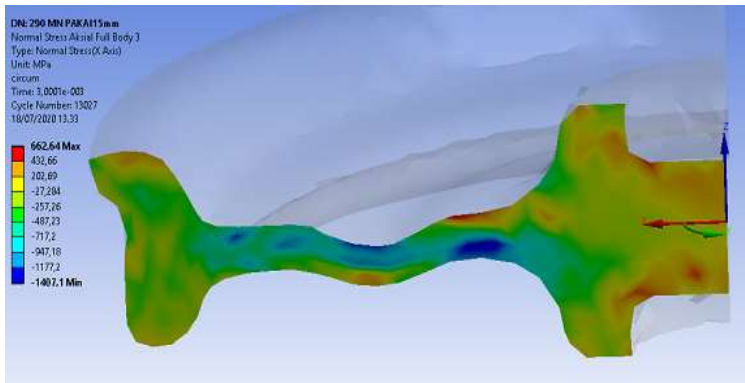
yang dijalankan masih menggunakan pengaturan *erosion control* secara *default*.

Faktor berikutnya yang mempengaruhi hasil yang tidak konsisten ini adalah penggunaan *path* pada setiap lokasi pengamatan, yang hanya merupakan sebuah garis saja. Sebenarnya, penggunaan *path* sebagai lokasi pengamatan ini dimaksudkan untuk mengamati secara detail terhadap lokasi-lokasi pengamatan yang telah ditentukan. Namun, kelemahan dari penggunaan *path* ini adalah memiliki cakupan analisa yang sangat terbatas. Analisa menggunakan *path* ini hanya benar-benar dilakukan pada satu garis saja seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.3. Cakupan yang sangat terbatas itulah yang juga dapat menunjang terjadinya ketidak konsistenan dalam melakukan pengamatan, karena garis pada *path* tersebut akan memberikan hasil yang terbatas sesuai dengan elemen dan *node* terdekat yang dilalui. Sementara itu, apabila pengamatan dilakukan dengan menggunakan analisa seperti pada Gambar 4.1, dan Gambar 4.2, sebenarnya *contour* yang dihasilkan tidak jauh berbeda. Namun, pengamatan secara *general* seperti itu tidak dapat memberikan hasil yang spesifik terhadap lokasi-lokasi pengamatan tertentu yang telah ditetapkan. Sehingga pada penelitian ini dilakukan analisa dengan kedua cara tersebut, dengan tujuan untuk menganalisa secara kualitatif melalui keseluruhan *contour* yang dihasilkan seperti pada Gambar 4.1, dan Gambar 4.2. Sementara itu, analisa kualitatif dilakukan dengan menggunakan *path* seperti pada Gambar 4.3.

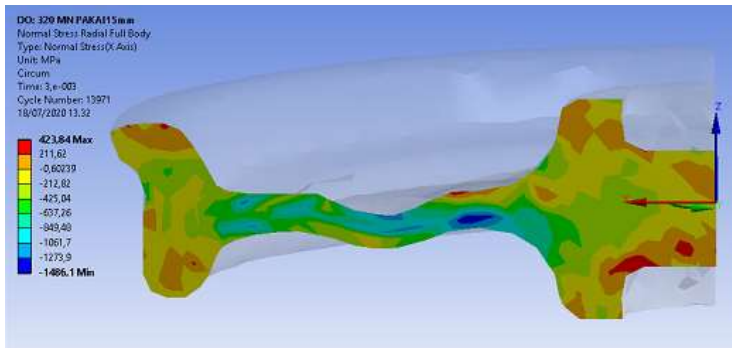
4.2.2 Pengaruh Gaya Terhadap Tegangan Residual pada Arah Radial

Tegangan sisa berikutnya yang terdapat pada roda kereta hasil dari proses *forging* ini adalah tegangan sisa yang ada pada arah radial dari roda kereta. Adanya tegangan sisa pada arah radial ini, akan berpengaruh terhadap kekuatan roda kereta pada saat mengalami pembebanan pada arah radial, yaitu pada saat roda kereta menerima pembebanan statis untuk menopang berat kereta, dan juga pada saat roda kereta mengalami pembebanan dinamis

pada kondisi *rolling* pada saat operasional. Hasil dari simulasi *forging* roda kereta ini menunjukkan bahwa pada roda kereta yang dihasilkan terdapat beberapa bagian yang memiliki tegangan sisa yang bersifat tarik pada arah radial, baik itu pada bagian rim, web, dan hub roda kereta seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.10, dan Gambar 4.11. Bagian roda kereta yang didominasi oleh tegangan sisa tarik pada arah aksial ini adalah bagian hub, apabila dibandingkan dengan bagian lainnya. Oleh karena itu, perlu dilakukan proses perlakuan panas terhadap roda kereta hasil proses *forging* ini, dengan tujuan untuk menghilangkan tegangan sisa yang bersifat tarik pada arah radial. Berdasarkan hasil simulasi ini, bagian hub roda kereta merupakan bagian kritis untuk dilakukan pengamatan setelah proses perlakuan panas, terkait dengan tegangan sisa tarik pada arah radial yang mendominasi bagian hub tersebut.

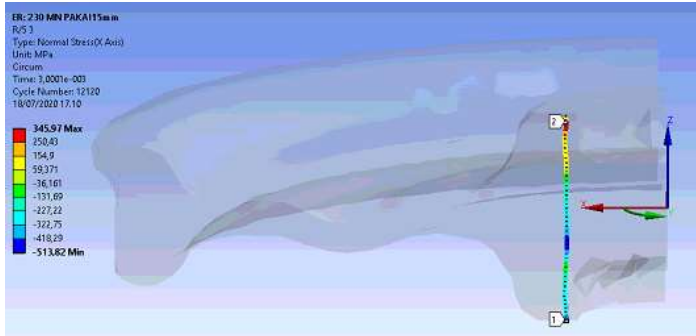


Gambar 4.10 Tegangan Sisa Arah Radial dengan Gaya *Forging* 290MN

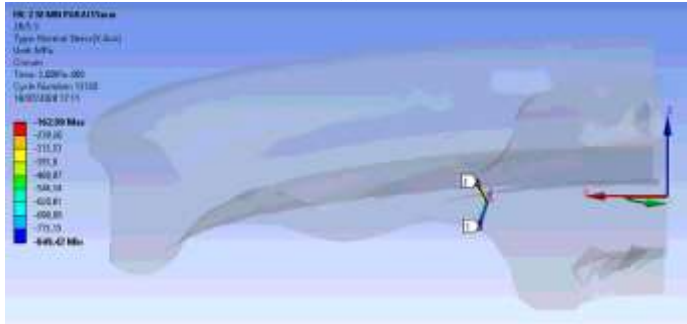


Gambar 4.11 Tegangan Sisa Arah Radial dengan Gaya *Forging* 320MN

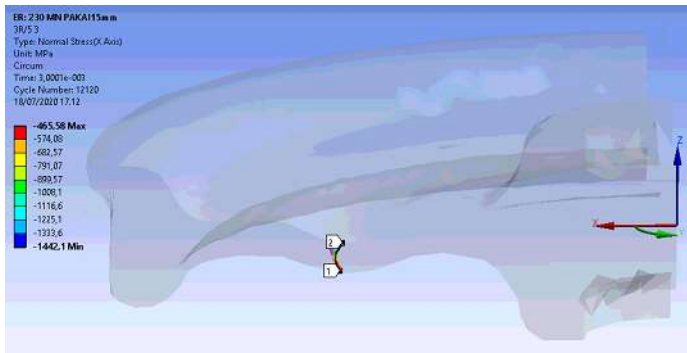
Namun, sama halnya dengan pengamatan tegangan sisa pada arah aksial sebelumnya, pada roda kereta hasil proses *forging* tersebut juga terdapat bagian-bagian yang didominasi oleh tegangan sisa kompresi pada arah radial. Diantaranya adalah bagian web, dan juga bagian rim. Tegangan sisa kompresi inilah yang akan dapat membantu mencegah terjadinya inisiasi *crack* dan meningkatkan ketahanan terhadap *fatigue* pada saat operasional roda kereta tersebut. Oleh karena itu, perlu juga untuk mengamati bagaimana pengaruh besar gaya *forging* yang diberikan terhadap terbentuknya tegangan sisa kompresi pada arah radial roda kereta tersebut. Pengamatan terhadap terbentuknya tegangan sisa kompresi akibat pengaruh dari besar gaya *forging* yang diberikan ini dilakukan pada 5 lokasi pengamatan. Lokasi pengamatan tersebut sama dengan lokasi pengamatan pada tegangan sisa aksial, yaitu di antaranya adalah R/5, 2R/5, 3R/5, 4R/5, dan R. Dimana R adalah jari-jari *billet* roda kereta. Lokasi pengamatan terbentuknya tegangan sisa kompresi, dan hasil dari simulasi tersebut ditunjukkan pada Gambar 4.12.



(a)



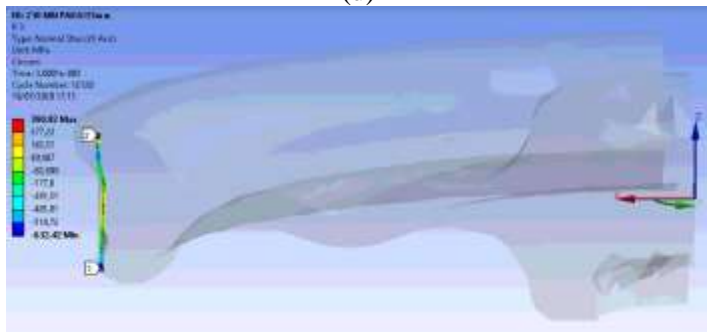
(b)



(c)



(d)



(e)

Gambar 4.12 (a) R/5; (b) 2R/5; (c) 3R/5; (d) 4R/5; (e) R

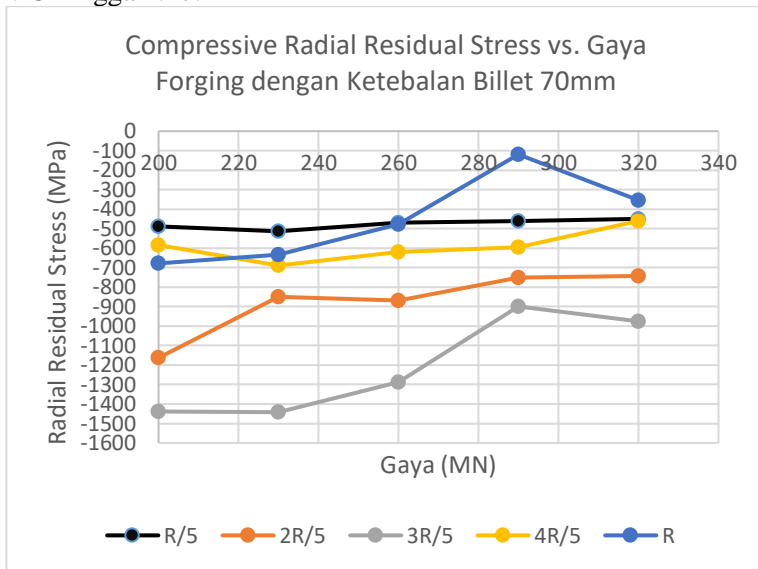
Lokasi pengamatan R/5 merupakan representasi dari bagian hub, lokasi pengamatan 2R/5 merupakan representasi dari bagian yang menghubungkan antara web dan hub, lokasi pengamatan 3R/5 merupakan representasi dari bagian tengah web, lokasi pengamatan 4R/5 merupakan representasi dari bagian yang menghubungkan antara web dengan rim, dan lokasi pengamatan R merupakan representasi dari bagian rim. Gambar 4.12 merupakan hasil dari proses *final forging* dengan ketebalan *billet* awal sebesar 70mm, dan gaya *forging* yang diberikan sebesar 230MN. Pengamatan terhadap pembentukan tegangan sisa kompresi pada arah radial ini dilakukan dengan cara mengamati berapa nilai maksimum dari tegangan sisa kompresi yang terbentuk pada setiap

lokasi pengamatan. Dengan menggunakan koordinat polar lokal yang terdapat pada Gambar 4.12, maka tegangan sisa kompresi yang terbentuk tersebut diamati pada arah sumbu X, dan nilai tegangan sisa kompresi terbesar adalah nilai yang paling negatif dari hasil pengamatan tersebut. Pada Gambar 4.12 didapatkan hasil nilai tegangan sisa kompresi maksimum pada lokasi pengamatan R/5 sebesar -513,82MPa, pada lokasi pengamatan 2R/5 sebesar -849,42 MPa, pada lokasi pengamatan 3R/5 sebesar -1442,31 MPa, pada lokasi pengamatan 4R/5 sebesar -689,2, dan pada lokasi pengamatan R sebesar -632,42 MPa. Hasil analisa nilai maksimum tegangan sisa kompresi pada arah radial dari setiap variasi yang digunakan pada penelitian ini telah dituliskan pada Tabel 4.2.

Ketebalan Billet (mm)	Gaya (kN)	Normal Stress X (Compressive Residual Radial Stress) (Mpa)				
		R/5	2R/5	3R/5	4R/5	R
70	200	-487.33	-1163	-1437.6	-584.25	-678.5
	230	-513.82	-849.4	-1442.1	-689.2	-632.4
	260	-469.2	-870	-1288.4	-619.1	-479
	290	-460.3	-751	-899.4	-596.4	-119.5
	320	-450	-743	-975.3	-460.8	-354.8
72	200	-430.2	-1111	-1227.5	-791	-656.5
	230	-410.6	-1211	-1141	-789	-745.8
	260	-428.8	-1043.7	-1159	-809.4	-647.5
	290	-464.7	-947.3	-1109.6	-734.5	-630.4
	320	-443.6	-521.8	-648.3	-261.7	-176.3
74	200	-410.3	-1071.5	-1458.6	-789.4	-632.3
	230	-421.8	-1190.7	-1441.8	-798	-419.2
	260	-482.4	-1090.4	-1118.4	-627.7	-453.6
	290	-454.8	-1034.4	-1053.4	-597.04	-395.25
	320	-466	-888.2	-976	-477.4	-271.3
76	200	-448	-1019	-1364.4	-1090.5	-645.5
	230	-403	-1081.3	-1214	-1184	-451.5
	260	-331.8	-1064.3	-1234.4	-1034.6	-320
	290	-352.5	-1025.4	-1223.1	-814	-316.2
	320	-360.3	-901	-835.1	-556	-222.1
78	200	-421.7	-1153	-1280.6	-688.5	-507.3
	230	-401.2	-1077.6	-1314.6	-782	-430.4
	260	-329	-1204	-1316.5	-716.5	-319.1
	290	-314.8	-948	-1223	-631	-312
	320	-356	-912.6	-1035.6	-555	-251

Tabel 4.2 Nilai Maksimum Tegangan Sisa Kompresi pada Arah Radial

Setelah mendapatkan nilai maksimum tegangan sisa kompresi pada arah radial dari setiap variasi yang digunakan, maka selanjutnya perlu untuk membuat grafik antara nilai maksimum tegangan sisa kompresi pada arah radial tersebut dengan gaya *forging* yang diberikan seperti pada pembahasan sebelumnya. Dari grafik tersebut akan dapat diketahui bagaimana pengaruh besar gaya *forging* yang diberikan terhadap tegangan sisa kompresi pada arah radial yang terbentuk pada roda kereta. Pada sub bab ini digunakan grafik pengaruh besar gaya *forging* yang digunakan pada setiap ketebalan *billet* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.13 hingga 4.17.

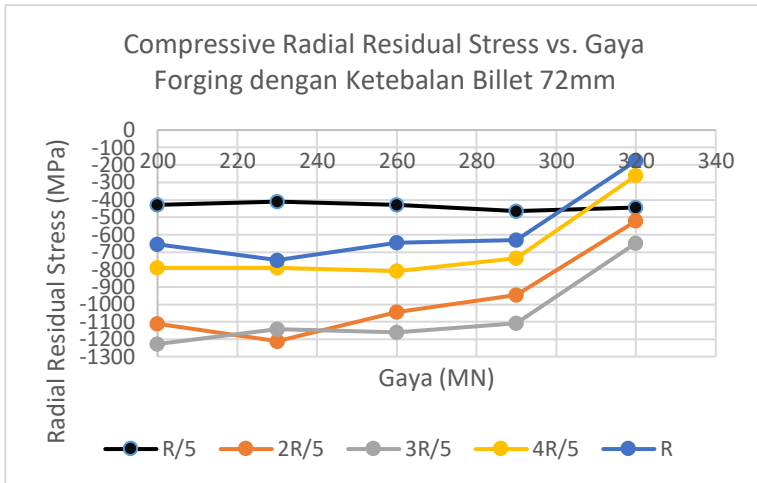


Gambar 4.13 Gaya *Forging* vs. Nilai Maksimum Tegangan Sisa Kompresi pada Arah Radial dengan Ketebalan *Billet* 70mm

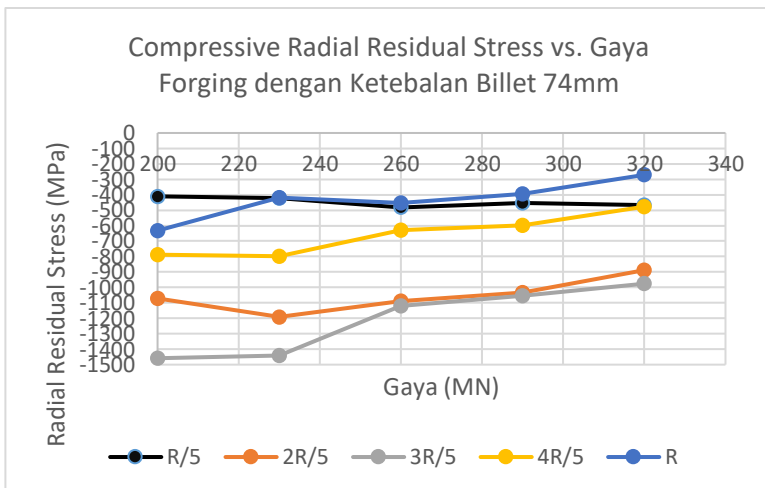
Pada hasil pengamatan nilai maksimum tegangan sisa kompresi arah radial ini memiliki perbedaan dengan pengamatan tegangan sisa kompresi pada arah aksial. Apabila *trend* grafik pada Gambar 4.13 tersebut didekati dengan sebuah *trendline* linier, maka dapat terlihat bahwa pada grafik pengaruh gaya *forging* yang diberikan

terhadap nilai maksimum tegangan sisa kompresi pada arah radial tersebut memberikan *trendline* yang menaik seiring dengan bertambahnya gaya *forging* yang diberikan. *Trendline* yang lebih condong naik tersebut dapat diamati pada lokasi pengamatan dari 2R/5 hingga R, dan dapat diamati pada semua variabel ketebalan *billet* yang digunakan. *Trendline* yang menaik pada grafik tersebut menunjukkan bahwa adanya penurunan nilai maksimum tegangan sisa kompresi arah radial pada lokasi pengamatan 2R/5 hingga R, seiring dengan penambahan besar gaya *forging* yang diberikan. Rata-rata penurunan nilai maksimum tegangan sisa pada arah radial ini berkisar antara 140,4MPa hingga 164,4MPa.

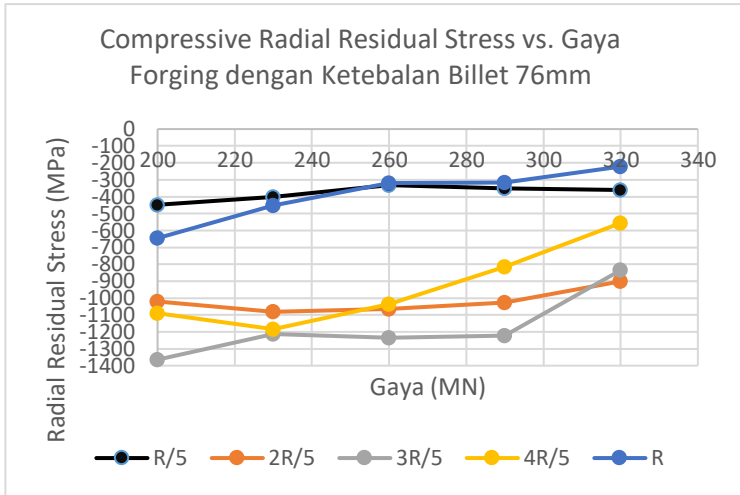
Berdasarkan hasil tersebut dapat diketahui bahwa, pemberian pembebanan terhadap *billet* pada proses *forging* roda kereta, akan cenderung menimbulkan tegangan ke arah radial yang bersifat tarik pada *billet*. Semakin besar gaya *forging* yang diberikan, maka akan semakin besar pula kemungkinan terbentuknya tegangan ke arah radial yang bersifat tarik pada *billet*. Hal tersebut dapat diamati melalui hasil yang didapatkan bahwa, nilai maksimum tegangan sisa kompresi ke arah radial pada *billet* cenderung menurun seiring dengan penambahan beban gaya *forging* yang diberikan. Apabila mengamati mekanisme deformasi *billet* saat proses *forging*, maka akan terlihat bahwa material *billet* akan mengalami penipisan, dan material tersebut cenderung bergerak melebar ke arah radial. Sehingga hal tersebut akan menyebabkan kecenderungan untuk menimbulkan tegangan tarik pada *billet* ke arah radial. Namun, pada lokasi pengamatan R/5 dapat diamati bahwa tegangan sisa kompresi pada arah radial memiliki nilai maksimum yang relatif sama seiring dengan penambahan beban gaya *forging* yang diberikan. Fluktuasi, dan ketidak konsistenan terbesar terjadi pada lokasi pengamatan 2R/5. Sama halnya dengan penjelasan sebelumnya, hal tersebut dikarenakan banyaknya distorsi terhadap *mesh* atau elemen pada bagian hub. Dapat diamati pula bahwa hasil yang ditunjukkan oleh Gambar 4.14 hingga Gambar 4.17 memiliki kecenderungan yang sama seperti yang ada pada hasil yang ditunjukkan oleh Gambar 4.13.



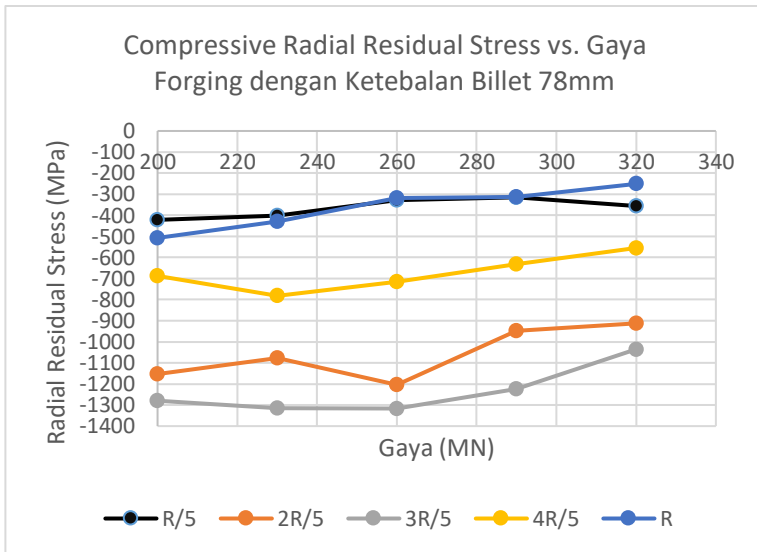
Gambar 4.14 Gaya *Forging* vs. Nilai Maksimum Tegangan Sisa Kompresi pada Arah Radial dengan Ketebalan *Billet* 72mm



Gambar 4.15 Gaya *Forging* vs. Nilai Maksimum Tegangan Sisa Kompresi pada Arah Radial dengan Ketebalan *Billet* 74mm



Gambar 4.16 Gaya *Forging* vs. Nilai Maksimum Tegangan Sisa Kompresi pada Arah Radial dengan Ketebalan *Billet* 76mm



Gambar 4.17 Gaya *Forging* vs. Nilai Maksimum Tegangan Sisa Kompresi pada Arah Radial dengan Ketebalan *Billet* 78mm

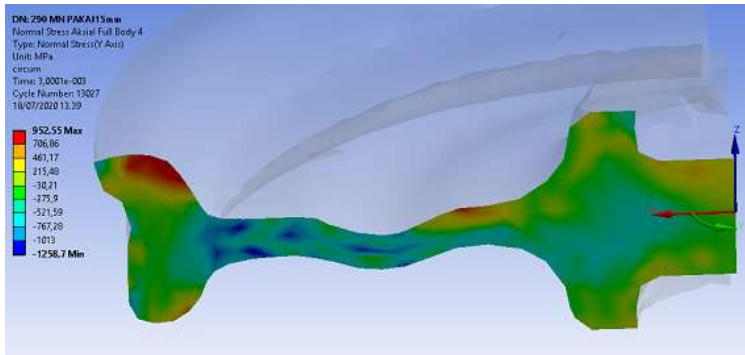
Pada Gambar 4.13 hingga Gambar 4.17 dapat diketahui bahwa pada setiap lokasi pengamatan dari R/5 hingga R akan memiliki *trend* yang berfluktuasi antara besar gaya *forging* yang digunakan, terhadap nilai maksimum tegangan sisa kompresi pada arah radial yang dihasilkan. Ketidak konsistenan *trend* dari gaya *forging* yang digunakan terhadap nilai maksimum tegangan sisa kompresi arah radial yang dihasilkan dari simulasi ini disebabkan oleh beberapa faktor yang sama dengan pembahasan sebelumnya, yaitu dikarenakan adanya distorsi pada *mesh* atau elemen, dan juga keterbatasan dari cakupan analisa menggunakan *path*. Distorsi tersebut dapat terlihat seperti pada Gambar 4.12 (b), dimana hasil dari pengamatan menggunakan *path* tersebut membentuk dua garis yang memiliki sudut seperti pada Gambar 4.9 yang telah dijelaskan sebelumnya.

4.2.3 Pengaruh Gaya Terhadap Tegangan Residual pada Arah *Circumferential*

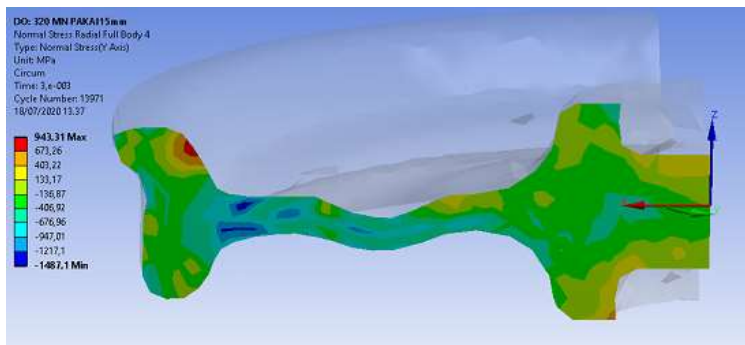
Tegangan sisa terakhir yang terdapat pada roda kereta hasil dari proses *forging* ini adalah tegangan sisa yang ada pada arah *circumferential* dari roda kereta. Adanya tegangan sisa pada arah *circumferential* ini, akan berpengaruh terhadap kekuatan roda kereta pada saat mengalami pembebanan operasional. Tegangan sisa pada arah *circumferential* atau biasa dikenal dengan *hoop stress* ini merupakan tegangan sisa yang menjadi pokok bahasan utama yang sangat berpengaruh terhadap kekuatan roda pada saat operasional, untuk menambah ketahanan terhadap kegagalan *fatigue*. *Circumferential* atau *hoop stress* ini akan mencegah terjadinya inisiasi *crack*, dan menghambat laju pertumbuhan *crack* pada roda kereta yang dapat terjadi dikarenakan *rolling contact fatigue*, dan juga pembebanan *thermal fatigue* karena proses pengereman. Residual *circumferential* atau *hoop stress* yang dapat membantu meningkatkan *fatigue life* ini adalah residual tegangan sisa pada arah *circumferential* yang bersifat kompresi, terutama pada bagian rim. Hal tersebut diatur dalam standarisasi kereta Eropa EN 13262 yang menyatakan bahwa bagian rim pada roda kereta hasil dari proses produksi harus memiliki tegangan sisa

yang bersifat kompresi pada arah *circumferential*. Tegangan sisa kompresi pada arah *circumferential* yang terdapat pada bagian rim ini harus memiliki nilai minimum -80MPa (bersifat kompresi) hingga -200 MPa, pada seluruh bagian rim hingga kedalaman 35mm dari permukaan terluar.

Hasil dari simulasi *forging* roda kereta ini menunjukkan bahwa pada roda kereta yang dihasilkan terdapat beberapa bagian yang memiliki tegangan sisa yang bersifat tarik pada arah *circumferential*, baik itu pada bagian rim, web, dan hub roda kereta seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.18, dan Gambar 4.19. Bagian roda kereta yang banyak mengandung tegangan sisa tarik pada arah *circumferential* ini adalah bagian rim, apabila dibandingkan dengan bagian lainnya. Padahal kondisi yang seharusnya ada pada bagian rim roda kereta ini harus memiliki tegangan sisa pada arah *circumferential* yang bersifat kompresi, yang sesuai dengan penelitian-penelitian terdahulu, dan juga standarisasi EN 13262. Apabila tegangan sisa *circumferential* pada bagian rim roda kereta ini bersifat tarik, maka hal tersebut akan mendukung roda kereta untuk mengalami kegagalan karena *rolling contact fatigue*, dan juga *thermal brake*, dengan mempercepat terjadinya inisiasi *crack*. Oleh karena itu, pada bagian rim roda kereta ini tidak dibolehkan untuk tersisa tegangan pada arah *circumferential* yang bersifat tarik. Untuk memenuhi hal tersebut, maka perlu dilakukan proses perlakuan panas terhadap roda kereta hasil proses *forging* ini, dengan tujuan untuk menghilangkan tegangan sisa yang bersifat tarik pada arah *circumferential*, utamanya pada bagian rim roda kereta. Berdasarkan hasil simulasi ini, bagian rim roda kereta merupakan bagian kritis untuk dilakukan pengamatan setelah proses perlakuan panas, terkait dengan tegangan sisa tarik pada arah *circumferential* yang terdapat pada bagian rim tersebut.



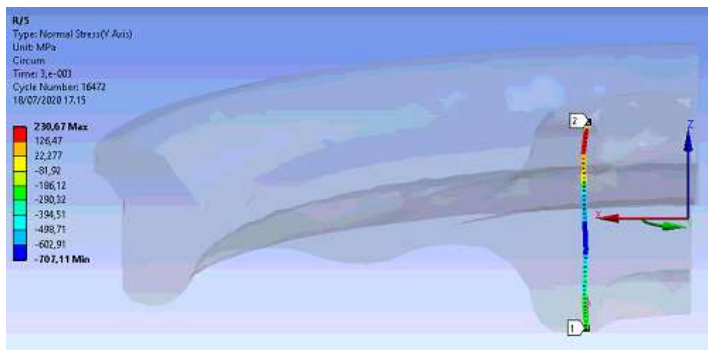
Gambar 4.18 Tegangan Sisa Arah *Circumferential* dengan Gaya Forging 290MN



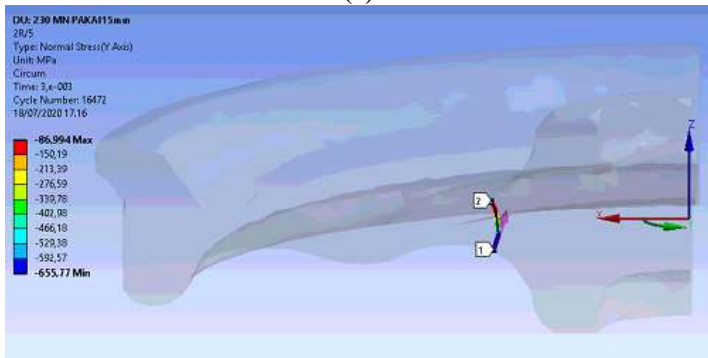
Gambar 4.19 Tegangan Sisa Arah *Circumferential* dengan Gaya Forging 320MN

Namun, sama halnya dengan pengamatan tegangan sisa sebelumnya, pada roda kereta hasil proses *forging* tersebut juga terdapat bagian-bagian yang didominasi oleh tegangan sisa kompresi pada arah *circumferential*. Sebenarnya apabila mengamati hasil pada Gambar 4.18, dan Gambar 4.19, seluruh bagian roda kereta sudah cukup terdominasi oleh tegangan sisa pada arah *circumferential* yang bersifat kompresi. Tegangan sisa kompresi inilah yang akan dapat membantu mencegah terjadinya inisiasi *crack* dan meningkatkan ketahanan terhadap *fatigue* pada

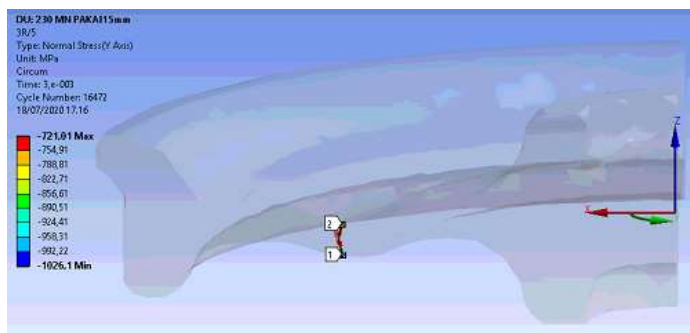
saat operasional roda kereta tersebut. Oleh karena itu, perlu juga untuk mengamati bagaimana pengaruh besar gaya *forging* yang diberikan terhadap terbentuknya tegangan sisa kompresi pada arah *circumferential* roda kereta tersebut. Pengamatan terhadap terbentuknya tegangan sisa kompresi akibat pengaruh dari besar gaya *forging* yang diberikan ini dilakukan pada 5 lokasi pengamatan yang sama dengan lokasi pengamatan sebelumnya. Lokasi pengamatan terbentuknya tegangan sisa kompresi, dan hasil dari simulasi tersebut ditunjukkan pada Gambar 4.20.



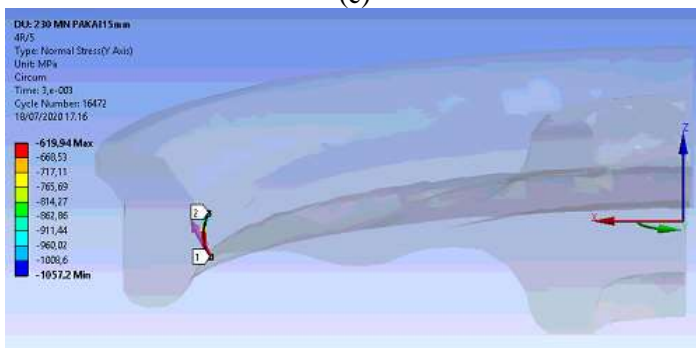
(a)



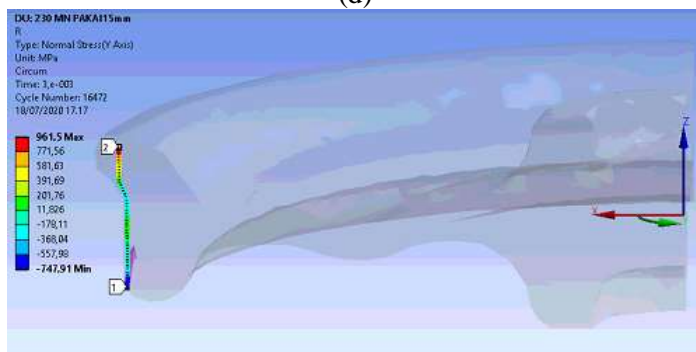
(b)



(c)



(d)



(e)

Gambar 4.20 (a) R/5; (b) 2R/5; (c) 3R/5; (d) 4R/5; (e) R

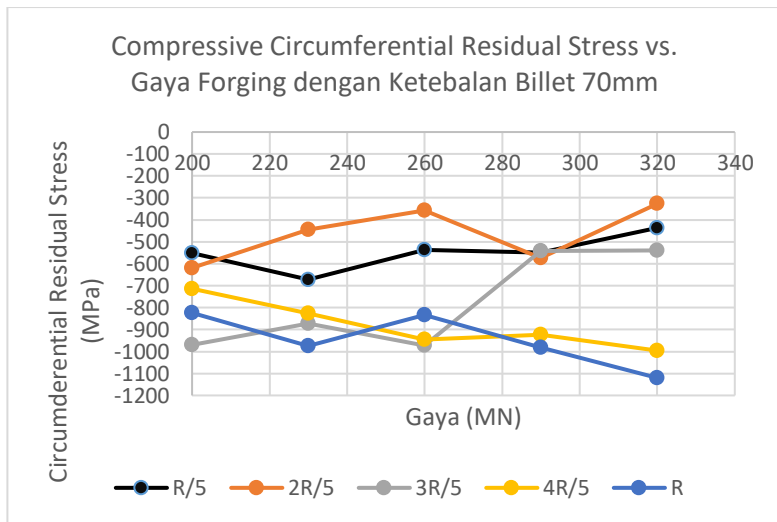
Lokasi pengamatan R/5 merupakan representasi dari bagian hub, lokasi pengamatan 2R/5 merupakan representasi dari bagian yang mengubungkan antara web dan hub, lokasi pengamatan 3R/5 merupakan representasi dari bagian tengah web, lokasi pengamatan 4R/5 merupakan representasi dari bagian yang menghubungkan antara web dengan rim, dan lokasi pengamatan R merupakan representasi dari bagian rim. Gambar 4.20 merupakan hasil dari proses *final forging* dengan ketebalan *billet* awal sebesar 76mm, dan gaya *forging* yang diberikan sebesar 230MN. Pengamatan terhadap pembentukan tegangan sisa kompresi pada arah radial ini dilakukan dengan cara mengamati berapa nilai maksimum dari tegangan sisa kompresi yang terbentuk pada setiap lokasi pengamatan. Dengan menggunakan koordinat polar lokal yang terdapat pada Gambar 4.20, maka tegangan sisa kompresi yang terbentuk tersebut diamati pada arah sumbu Y, dan nilai tegangan sisa kompresi terbesar adalah nilai yang paling negatif dari hasil pengamatan tersebut. Pada Gambar 4.20, didapatkan hasil nilai tegangan sisa kompresi maksimum pada lokasi pengamatan R/5 sebesar -707,1MPa, pada lokasi pengamatan 2R/5 sebesar -655,8MPa, pada lokasi pengamatan 3R/5 sebesar -1026,1MPa, pada lokasi pengamatan 4R/5 sebesar -1057,2MPa, dan pada lokasi pengamatan R sebesar -748 MPa. Hasil analisa nilai maksimum tegangan sisa kompresi pada arah *circumferential* dari setiap variasi yang digunakan pada penelitian ini telah dituliskan pada Tabel 4.3.

Ketebalan Billet (mm)	Gaya (MN)	Normal Stress Y (Compressive Residual Circumferential / Hoop Stress) (Mpa)				
		R/5	2R/5	3R/5	4R/5	R
70	200	-551.16	-618.8	-970.45	-713.9	-823.9
	230	-672	-443.87	-872.13	-826.5	-974.34
	260	-537	-357.2	-972.5	-946	-833.3
	290	-550	-574	-542	-923	-982
	320	-436.7	-326.8	-539.4	-995.7	-1120
72	200	-620	-683.6	-1050.8	-760	-408.2
	230	-650.1	-667.3	-874	-867.2	-488
	260	-585	-532.5	-832.1	-891.5	-458.4
	290	-545.3	-496.7	-825.3	-859.3	-646
	320	-515.8	-502	-621	-956	-707.8
74	200	-544	-730.7	-1071.7	-627.13	-438
	230	-311.2	-369.3	-312.1	-575.4	-333.7
	260	-476.35	-610	-855.4	-857.5	-890.6
	290	-445.1	-629.2	-788.3	-834.5	-937
	320	-378.4	-488.6	-751	-870	-1135
76	200	-709.8	-681.2	-1273.4	-850.5	-750
	230	-707.1	-655.7	-1026.1	-1057.2	-748
	260	-630	-585	-1051.1	-904.7	-862.4
	290	-537.4	-602	-951.7	-935.9	-881.2
	320	-457.7	-350.4	-663.5	-981.7	-911.6
78	200	-772	-651.6	-977.2	-635.8	-808.4
	230	-773	-728	-972.5	-756.1	-834.3
	260	-807.3	-628	-876.3	-901.4	-783
	290	-569.3	-510.1	-888.8	-890.2	-939
	320	-513.5	-484.3	-573	-992.5	-983

Tabel 4.3 Nilai Maksimum Tegangan Sisa Kompresi pada Arah Circumferential

Setelah mendapatkan nilai maksimum tegangan sisa kompresi pada arah *circumferential* dari setiap variasi yang digunakan, maka

selanjutnya perlu untuk membuat grafik antara nilai maksimum tegangan sisa kompresi pada arah *circumferential* tersebut dengan gaya *forging* yang diberikan seperti pada pembahasan sebelumnya. Dari grafik tersebut akan dapat diketahui bagaimana pengaruh besar gaya *forging* yang diberikan terhadap tegangan sisa kompresi pada arah *circumferential* yang terbentuk pada roda kereta. Pada sub bab ini digunakan grafik pengaruh besar gaya *forging* yang digunakan pada setiap ketebalan *billet* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.21 hingga 4.25.



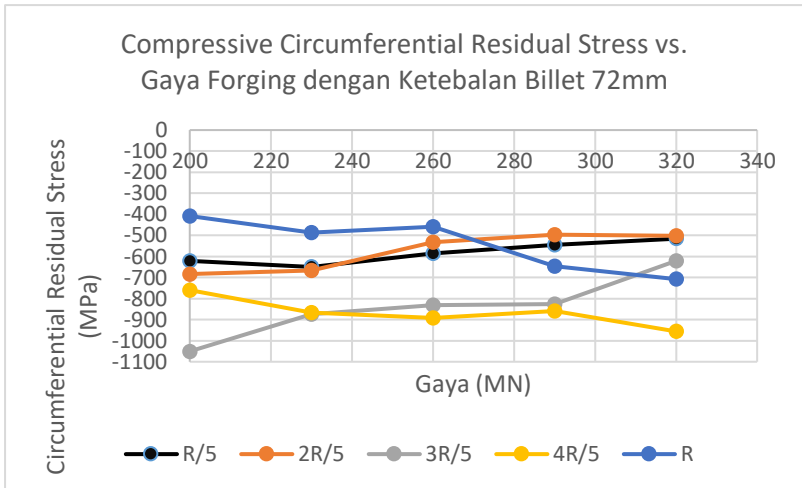
Gambar 4.21 Gaya *Forging* vs. Nilai Maksimum Tegangan Sisa Kompresi pada Arah *Circumferential* dengan Ketebalan *Billet* 70mm

Hasil pengamatan nilai maksimum tegangan sisa kompresi arah *circumferential* ini memiliki perbedaan dengan pengamatan sebelumnya. Grafik yang terdapat pada Gambar 4.21 memiliki fluktuasi yang cukup besar. Namun, apabila *trend* grafik pada Gambar 4.21 tersebut didekati dengan sebuah *trendline* linier, maka dapat terlihat bahwa pada grafik pengaruh gaya *forging* yang diberikan terhadap nilai maksimum tegangan sisa kompresi pada

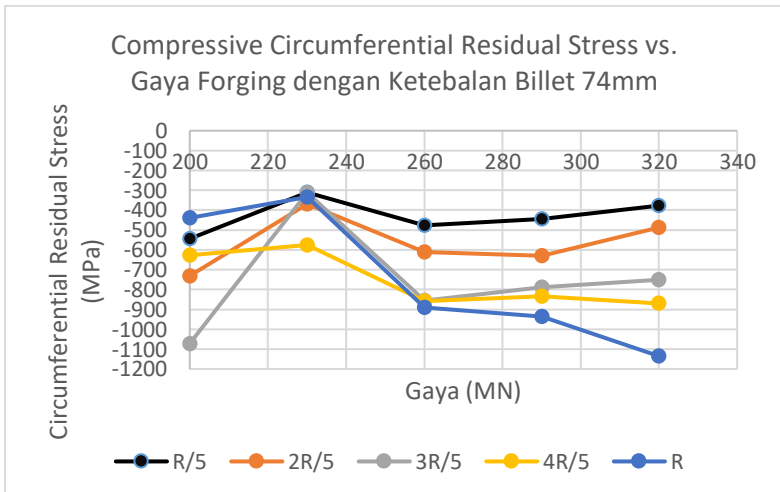
arah *circumferential* tersebut memberikan *trendline* yang menaik seiring dengan bertambahnya gaya *forging* yang diberikan. *Trendline* yang lebih condong naik tersebut dapat diamati pada lokasi pengamatan dari R/5 hingga 3R/5 dan dapat diamati pada Sebagian besar variabel ketebalan *billet* yang digunakan. *Trendline* yang menaik pada grafik tersebut menunjukkan bahwa adanya penurunan nilai maksimum tegangan sisa kompresi arah *circumferential* pada lokasi pengamatan R/5 hingga 3R/5, seiring dengan penambahan besar gaya *forging* yang diberikan. Berdasarkan hasil tersebut dapat diketahui bahwa, pemberian pembebanan terhadap *billet* pada proses *forging* roda kereta, akan cenderung menimbulkan tegangan ke arah *circumferential* yang bersifat tarik pada *billet*. Semakin besar gaya *forging* yang diberikan, maka akan semakin besar pula kemungkinan terbentuknya tegangan ke arah *circumferential* yang bersifat tarik pada *billet* dengan lokasi pengamatan R/5 hingga 3R/5. Hal tersebut dapat diamati melalui hasil yang didapatkan bahwa, nilai maksimum tegangan sisa kompresi ke arah radial pada *billet* cenderung menurun seiring dengan penambahan beban gaya *forging* yang diberikan. Rata-rata penurunan nilai maksimum tegangan sisa arah *circumferential* pada lokasi pengamatan R/5 hingga 3R/5 ini berkisar antara 71,5MPa hingga 156,8MPa.

Namun, pada lokasi pengamatan 4R/5, dan R, dapat diamati bahwa tegangan sisa kompresi pada arah *circumferential* apabila didekati dengan *trendline* linier akan cenderung memberikan *trend* yang menurun. Hal tersebut menandakan bahwa semakin besar gaya *forging* yang diberikan, maka akan semakin membuat nilai tegangan sisa kompresi pada arah *circumferential* ini semakin tinggi pada lokasi pengamatan 4R/5, dan lokasi pengamatan R. Rata-rata peningkatan nilai maksimum tegangan sisa arah *circumferential* pada lokasi pengamatan 4R/5 hingga R ini berkisar antara 92,8MPa hingga 123,7MPa. Lokasi pengamatan 4R/5, dan R ini merupakan representasi dari bagian roda kereta yang menghubungkan web dengan rim, dan bagian rim. Dalam pengamatan tegangan sisa pada arah *circumferential* memang lebih

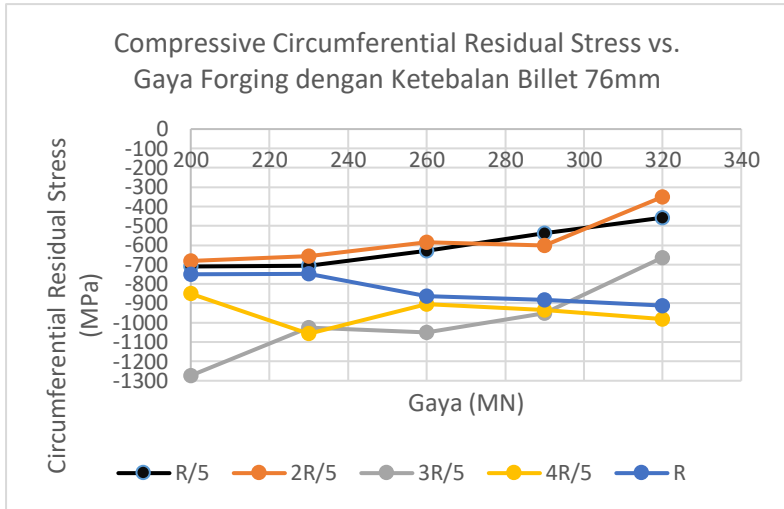
ditekankan pada daerah rim roda kereta. Dimana bagian rim tersebut merupakan bagian yang paling krusial, karena merupakan bagian yang akan mengalami kontak langsung dengan lintasan kereta pada saat operasional. Analisa pada penelitian-penelitian terdahulu lebih mengutamakan pengamatan terhadap kekuatan bagian rim roda kereta saat operasional. Hasil pengamatan tersebut menyatakan bahwa tegangan sisa pada arah *circumferential* yang bersifat kompresi, yang ada pada bagian rim roda kereta ini dapat membantu meningkatkan fatigue life roda kereta. Hal tersebut sesuai dengan hasil yang didapatkan bahwa semakin besar gaya *forging* yang digunakan, maka akan lebih cenderung meningkatkan nilai tegangan sisa kompresi arah *circumferential* pada bagian rim roda kereta. Walaupun begitu, bagian rim roda kereta hasil dari proses *forging* ini masih tetap memiliki tegangan sisa pada arah *circumferential* yang bersifat tarik, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.18, dan Gambar 4.19. Oleh karena itu, roda kereta hasil dari proses *forging* ini masih perlu dilakukan perlakuan panas untuk menghilangkan tegangan sisa yang bersifat tarik tersebut. Bagian utama yang perlu ditekankan dalam pengamatan tegangan sisa pada arah *circumferential* setelah melewati proses perlakuan panas ini adalah bagian rim. Dapat diamati pula bahwa hasil yang ditunjukkan oleh Gambar 4.22 hingga Gambar 4.25 memiliki kecenderungan yang sama seperti yang ada pada hasil yang ditunjukkan oleh Gambar 4.21.



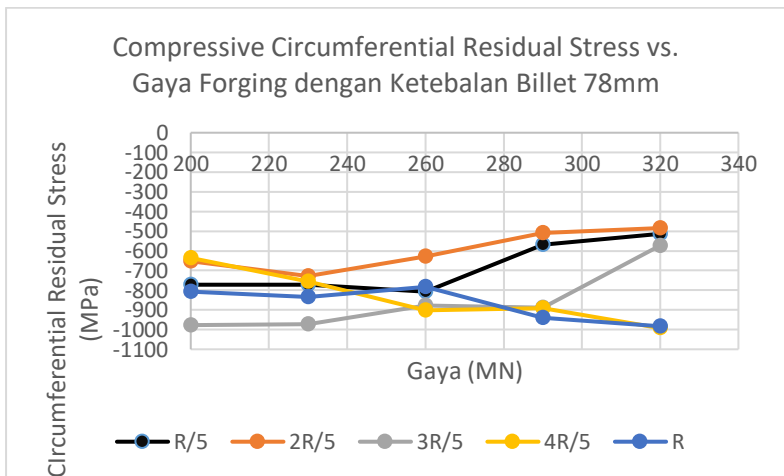
Gambar 4.22 Gaya Forging vs. Nilai Maksimum Tegangan Sisa Kompresi pada Arah *Circumferential* dengan Ketebalan Billet 72mm



Gambar 4.23 Gaya Forging vs. Nilai Maksimum Tegangan Sisa Kompresi pada Arah *Circumferential* dengan Ketebalan Billet 74mm



Gambar 4.24 Gaya *Forging* vs. Nilai Maksimum Tegangan Sisa Kompresi pada Arah *Circumferential* dengan Ketebalan *Billet* 76mm



Gambar 4.25 Gaya *Forging* vs. Nilai Maksimum Tegangan Sisa Kompresi pada Arah *Circumferential* dengan Ketebalan *Billet* 78mm

Pada Gambar 4.21 hingga Gambar 4.25 dapat diketahui bahwa pada setiap lokasi pengamatan dari R/5 hingga R akan memiliki *trend* yang berfluktuasi antara besar gaya *forging* yang digunakan, terhadap nilai maksimum tegangan sisa kompresi pada arah *circumferential* yang dihasilkan. Ketidak konsistenan *trend* dari nilai maksimum tegangan sisa kompresi arah *circumferential* yang dihasilkan akibat pengaruh gaya *forging* yang digunakan dari simulasi ini disebabkan oleh beberapa faktor yang sama dengan pembahasan sebelumnya, yaitu dikarenakan adanya distorsi pada *mesh* atau elemen, dan juga keterbatasan dari cakupan analisa menggunakan *path*.

4.2 Pengaruh Ketebalan Billet terhadap Terbentuknya Tegangan Sisa Kompresi

Selain menentukan besarnya gaya yang digunakan untuk membuat suatu benda dengan proses *forging*, masih terdapat beberapa faktor lain yang juga perlu dipertimbangkan. Salah satu faktor selain besarnya gaya *forging* yang digunakan tersebut adalah faktor ketebalan *billet* yang menjadi geometri awal benda sebelum dilakukan proses *forging*. Penentuan tebal awal geometri *billet* ini harus disesuaikan dengan beberapa rancangan hasil yang diinginkan. Hal yang utama adalah untuk menentukan ketebalan *billet* awal dengan tujuan agar dimensi geometri hasil dari proses *forging* tersebut sesuai dengan yang telah direncanakan. Selain itu, perlu juga untuk mempertimbangkan ketebalan *billet* awal untuk mendapatkan hasil parameter-parameter lain selain ketepatan dimensi agar sesuai dengan yang telah direncanakan. Parameter tersebut diantaranya adalah parameter tegangan sisa yang terdapat pada produk hasil proses *forging*. Pertimbangan untuk menentukan ketebalan *billet* awal agar mendapatkan hasil dimensi, dan tegangan sisa yang diinginkan tersebut juga perlu dilakukan pada proses *forging* roda kereta.

Seperti penjelasan sebelumnya, bahwa tegangan sisa yang terdapat pada roda kereta akibat dari proses pembuatan ini memiliki pengaruh yang cukup signifikan pada saat roda tersebut digunakan dalam operasional. Tegangan sisa ini berpengaruh

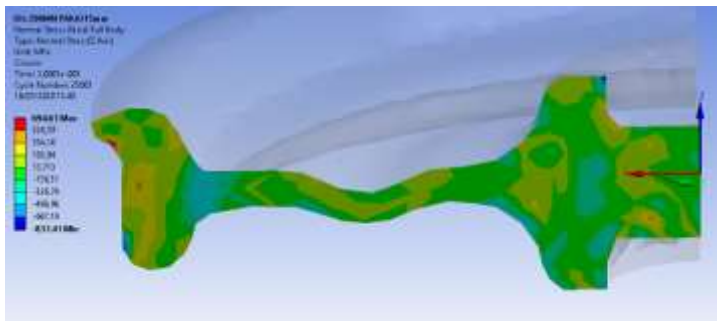
terhadap performa kekuatan roda kereta, terutama ketahanan roda kereta terhadap pembebanan *fatigue* pada saat operasional. Berdasarkan hal tersebut, perlu untuk menganalisa bagaimana pengaruh ketebalan *billet* yang digunakan, terhadap tegangan sisa yang dihasilkan pada roda kereta. Sehingga pada sub bab ini akan membahas hasil dari penelitian terkait dengan pengaruh ketebalan *billet* terhadap tegangan sisa yang terdapat pada roda kereta.

4.3.1 Pengaruh Ketebalan *Billet* Terhadap Tegangan Residual pada Arah Aksial

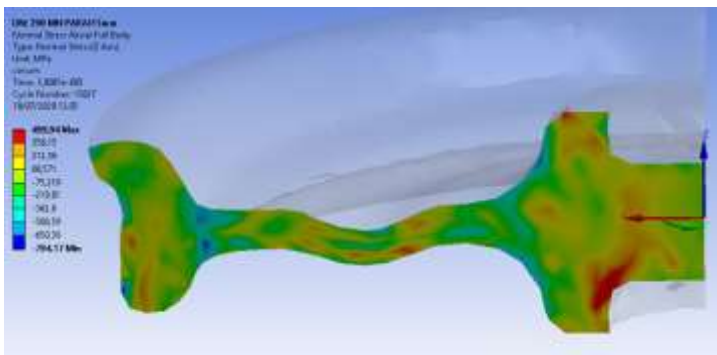
Pada sub bab ini akan membahas bagaimana hasil dari simulasi terkait pengaruh ketebalan *billet* yang digunakan terhadap tegangan sisa pada arah aksial yang terdapat pada roda kereta hasil dari proses *forging*. Tidak jauh berbeda dengan pembahasan tegangan sisa pada arah aksial sebelumnya yang dipengaruhi oleh besar gaya *forging* yang digunakan, tampak pada Gambar 4.26, dan Gambar 4.27 bahwa pada bagian web, hub, dan rim roda kereta didominasi oleh tegangan sisa yang bersifat tarik pada arah aksial. Walaupun begitu, terdapat juga bagian pada roda kereta yang memiliki tegangan sisa pada arah aksial yang bersifat kompresi. Bagian tersebut terletak bagian yang menghubungkan web dengan hub, dan bagian yang menghubungkan bagian web dengan rim. Gambar 4.26 merupakan hasil distribusi tegangan sisa aksial pada roda kereta setelah proses *forging* dengan menggunakan ketebalan *billet* awal 74mm, dan gaya *forging* sebesar 290MN. Sementara itu, Gambar 4.27 merupakan hasil distribusi tegangan sisa aksial pada roda kereta setelah proses *forging* dengan menggunakan ketebalan *billet* awal 78mm, dan gaya *forging* sebesar 290MN.

Pengamatan terhadap tegangan sisa aksial yang terdapat pada roda kereta hasil dari proses *forging* ini lebih mudah untuk dilakukan, karena tegangan pada arah aksial ini memiliki arah yang sama dengan pembebanan pada saat proses *forging*. Dari kedua gambar tersebut dapat dilakukan pengamatan ketika menggunakan gaya *forging* yang sama, dan dengan menggunakan ketebalan *billet* yang berbeda, akan didapatkan hasil bahwa dengan menggunakan ketebalan *billet* yang lebih besar maka distribusi tegangan sisa pada

arah aksial yang bersifat tarik juga akan semakin banyak. Selain itu, juga dapat diamati bahwa terdapat penurunan nilai maksimum tegangan sisa yang bersifat kompresi apabila menggunakan ketebalan *billet* yang lebih besar, dengan menggunakan gaya yang sama. Hal tersebut juga sesuai dengan prinsip suatu material yang sama dengan geometri yang lebih besar akan memiliki ketahanan yang lebih besar pula apabila dibandingkan dengan material yang sama, namun geometri yang lebih kecil.



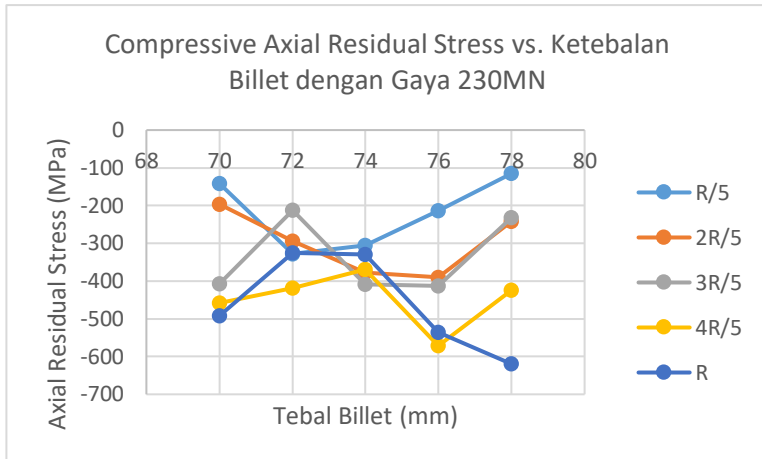
Gambar 4.26 Tegangan Sisa Arah Aksial dengan Ketebalan *Billet* 74mm



Gambar 4.27 Tegangan Sisa Arah Aksial dengan Ketebalan *Billet* 78mm

Selanjutnya, untuk mengamati pengaruh dari ketebalan *billet* yang digunakan terhadap tegangan sisa pada arah aksial ini digunakan 5 lokasi pengamatan yang sama seperti yang dilakukan pada pembahasan sebelumnya. Lokasi pengamatan tersebut terletak pada bagian R/5 hingga R pada arah radial roda kereta, untuk merepresentasikan bagian-bagian yang sama seperti yang telah dijelaskan sebelumnya. Pada pengamatan ini juga menggunakan nilai maksimum tegangan sisa kompresi yang ada pada arah aksial di setiap lokasi pengamatan. Nilai maksimum tegangan sisa kompresi pada arah aksial roda kereta ini didapatkan dengan mengamati tegangan normal pada arah sumbu Z, dan nilai yang paling negatif tersebut merupakan nilai maksimum tegangan sisa kompresi pada arah aksial, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.26, dan Gambar 4.27, dan penjelasan pada sub bab sebelumnya.

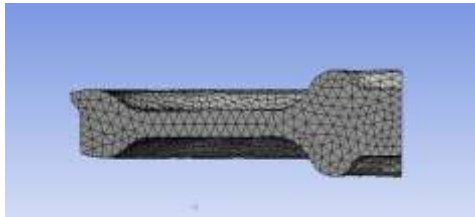
Data yang didapatkan untuk mengamati pengaruh ketebalan *billet* terhadap nilai maksimum tegangan sisa kompresi pada arah aksial ini juga memiliki nilai yang sama dengan data yang telah diperoleh pada Tabel 4.1. Hanya saja untuk mengamati pengaruh ketebalan *billet*, maka perlu adanya perubahan terhadap grafik yang dibuat. Grafik yang dibuat pada sub bab ini adalah grafik antara ketebalan *billet* dengan nilai maksimum tegangan sisa kompresi pada arah aksial roda kereta seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.28. Pada grafik tersebut dilakukan pengamatan terhadap pengaruh ketebalan *billet* terhadap nilai maksimum tegangan sisa kompresi pada arah aksial, dengan gaya *forging* yang sama sesuai dengan variasi yang telah ditetapkan pada penelitian ini.



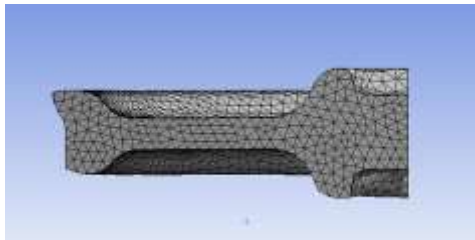
Gambar 4.28 Ketebalan *Billet* vs. Nilai Maksimum Tegangan Sisa Kompresi pada Arah Aksial Roda Kereta

Pada Gambar 4.28 dapat terlihat bahwa pada grafik yang dihasilkan tersebut memiliki error ataupun fluktuasi yang sangat besar, sehingga akan sangat sulit untuk menyimpulkan bagaimana pengaruh ketebalan *billet* yang digunakan pada proses *forging* terhadap nilai maksimum tegangan sisa kompresi pada arah aksial roda kereta. Setelah dilakukan pengamatan, penyebab error ataupun fluktuasi yang sangat besar tersebut disebabkan oleh beberapa faktor. Beberapa faktor tersebut sama seperti yang telah dijelaskan pada penjelesan sebelumnya yaitu adanya faktor distorsi pada *mesh* atau elemen yang digunakan, dan juga sangat terbatasnya cakupan pengamatan apabila dilakukan dengan menggunakan *path*. Selain dua faktor tersebut, terdapat juga faktor lain yang menyebabkan ketidak konsistenan pada hasil yang didapatkan seperti pada Gambar 4.28. Faktor tersebut adalah faktor perbedaan geometri *billet* awal yang cukup signifikan setelah dilakukan proses *preforming* dengan gaya yang sama, namun dengan ketebalan yang berbeda. Hal tersebut akan menyebabkan perbedaan pula pada proses diskritisasi *billet* untuk tahap *final forging* menjadi elemen-elemen yang lebih kecil. Perbedaan

elemen-elemen tersebut yang akhirnya akan mempengaruhi bagaimana nantinya hasil perhitungan jalannya simulasi yang akan didapatkan pada setiap node. Terlebih lagi analisa untuk mendapatkan nilai pada Tabel 4.1, dan Gambar 4.28 tersebut terbatas pada hasil pengamatan yang didapatkan dari analisa *path* yang cakupannya sangat terbatas dengan menggunakan satu garis saja. Dimana nilai yang akan didapatkan dari analisa *path* ini akan sangat bergantung pada nilai yang ada pada *node* ataupun elemen terdekat yang dilalui oleh *path* tersebut. Namun, memang tidak bisa dipungkiri bahwa analisa dengan menggunakan *path* ini akan memberikan hasil yang sangat spesifik. Walaupun begitu, hasil tersebut tidak bisa untuk digeneralisasi menjadi representasi bagian-bagian yang lebih besar seperti pada analisa apabila menggunakan Gambar 4.26, dan Gambar 4.27. Perbedaan geometri yang dihasilkan dengan menggunakan gaya *forging* yang sama, dan ketebalan *billet* berbeda terdapat pada Gambar 4.29, dan Gambar 4.30.



Gambar 4.29 Geometri Awal *Billet*, dan Elemen pada Tahap *Final Forging* dengan Tebal Awal *Billet* 70mm



Gambar 4.30 Geometri Awal *Billet*, dan Elemen pada Tahap *Final Forging* dengan Tebal Awal *Billet* 78mm

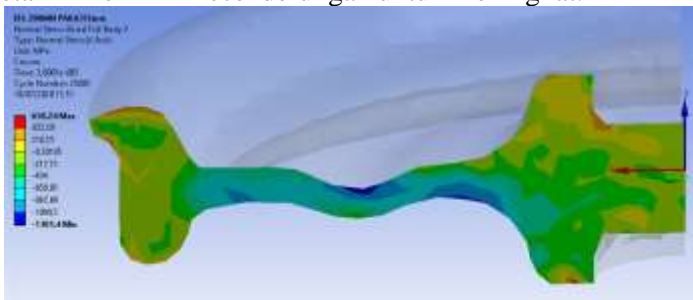
Pada Gambar 4.28 dapat diamati bahwa pada lokasi pengamatan R/5 menunjukkan *trendline* yang menaik dari ketebalan *billet* 72mm hingga 78mm. Selain itu, *trandline* yang menaik ini juga dapat terlihat pada lokasi pengamatan 3R/5 dengan ketebalan 70mm hingga 78mm, pada lokasi pengamatan 4R/5, dan R dengan ketebalan 70mm hingga 74mm. *Trandline* yang cenderung naik ini menjelaskan bahwa adanya penurunan nilai maksimum tegangan sisa kompresi pada arah aksial. Rata-rata penurunan nilai maksimum tegangan sisa pada arah aksial ini berkisar antara 84MPa hingga 114MPa. Hal tersebut sesuai dengan prinsip, dan hipotesa yang telah dijelaskan sebelumnya. Namun, terdapat juga beberapa bagian yang menunjukkan *trandline* yang menurun terutama pada lokasi pengamatan 2R/5 dengan ketebalan 70mm hingga 76mm. Selain karena beberapa faktor penyebab error yang telah dijelaskan sebelumnya, *trandline* menurun ini juga bisa diamati melalui tahapan proses *forging* yang ada, hingga akhirnya *billet* terdeformasi. Pada lokasi pengamatan 2R/5 tersebut cenderung selalu memberikan hasil pengisian *billet* terhadap cetakan dengan sempurna. Beda halnya dengan lokasi pengamatan lain yang masih memiliki celah kekosongan pada cetakan yang tidak terisi dengan sempurna oleh *billet*. Hal itu juga dapat menyebabkan nilai maksimum tegangan sisa pada arah aksial pada lokasi pengamatan 2R/5 ini cenderung naik seiring dengan penambahan ketebalan *billet* awal yang digunakan.

4.3.2 Pengaruh Ketebalan *Billet* Terhadap Tegangan Residual pada Arah Radial

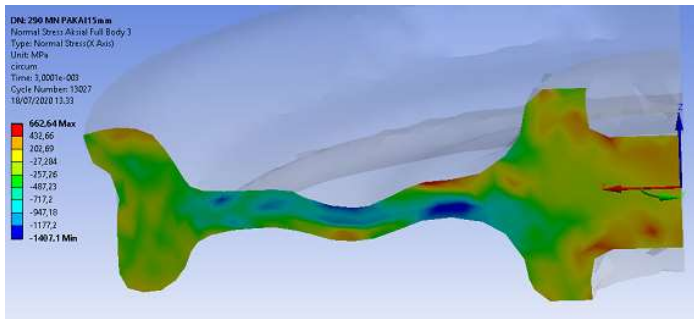
Pengamatan berikutnya adalah bagaimana pengaruh ketebalan *billet* yang digunakan terhadap tegangan sisa pada arah radial yang terdapat pada roda kereta hasil dari proses *forging*. Sama halnya dengan pengamatan tegangan sisa pada arah radial yang dipengaruhi besar gaya *forging* yang digunakan sebelumnya, tampak pada Gambar 4.31, dan Gambar 4.32 bahwa bagian roda kereta hasil dari proses *forging* yang banyak mengandung tegangan sisa pada arah radial yang bersifat tarik adalah bagian hub roda kereta. Sementara pada bagian web, dan bagian rim lebih banyak

didominasi oleh tegangan sisa kompresi pada arah radial. Gambar 4.31 merupakan hasil distribusi tegangan sisa radial pada roda kereta setelah proses *forging* dengan menggunakan ketebalan *billet* awal 74mm, dan gaya *forging* sebesar 290MN. Sementara itu, Gambar 4.32 merupakan hasil distribusi tegangan sisa radial pada roda kereta setelah proses *forging* dengan menggunakan ketebalan *billet* awal 78mm, dan gaya *forging* sebesar 290MN.

Dari kedua gambar tersebut dapat dilakukan pengamatan ketika menggunakan gaya *forging* yang sama, dan dengan menggunakan ketebalan *billet* yang berbeda, akan didapatkan hasil bahwa dengan menggunakan ketebalan *billet* yang lebih besar maka distribusi tegangan sisa pada arah radial yang bersifat tarik juga akan semakin banyak. Terlihat pada bagian hub, dan bagian rim dengan ketebalan yang lebih besar, dan gaya yang sama akan memiliki distribusi tegangan sisa tarik pada arah radial yang lebih besar pula. Namun, berdasarkan kedua gambar tersebut juga dapat diamati bahwa terdapat peningkatan nilai maksimum tegangan sisa yang bersifat kompresi apabila menggunakan ketebalan *billet* yang lebih besar, dengan menggunakan gaya yang sama. Hal tersebut dapat terjadi dikarenakan *billet* dengan ketebalan yang lebih besar memiliki kecenderungan untuk mengisi rongga pada cetakan lebih cepat, dan lebih sempurna apabila mengamati bagaimana proses *forging* yang berlangsung. Sehingga hal tersebut menyebabkan nilai maksimum tegangan sisa kompresi pada arah radial roda kereta ini memiliki kecenderungan untuk meningkat.



Gambar 4.31 Tegangan Sisa Arah Radial dengan Ketebalan *Billet* 74mm

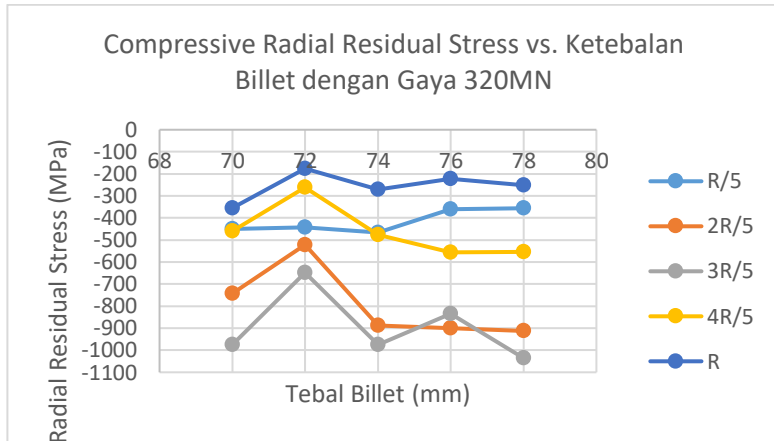


Gambar 4.32 Tegangan Sisa Arah Radial dengan Ketebalan *Billet* 78mm

Oleh karena itu, pada bagian ini juga perlu untuk diamati bagaimana pengaruh dari ketebalan *billet* yang digunakan terhadap tegangan sisa pada arah radial ini menggunakan 5 lokasi pengamatan yang sama seperti yang dilakukan pada pembahasan sebelumnya. Lokasi pengamatan tersebut terletak pada bagian R/5 hingga R pada arah radial roda kereta, untuk merepresentasikan bagian-bagian yang sama seperti yang telah dijelaskan sebelumnya. Pada pengamatan ini juga menggunakan nilai maksimum tegangan sisa kompresi yang ada pada arah radial di setiap lokasi pengamatan. Nilai maksimum tegangan sisa kompresi pada arah radial roda kereta ini didapatkan dengan mengamati tegangan normal pada arah sumbu X, dan nilai yang paling negatif tersebut merupakan nilai maksimum tegangan sisa kompresi pada arah radial, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.31, dan Gambar 4.32, dan penjelasan pada sub bab sebelumnya.

Data yang didapatkan untuk mengamati pengaruh ketebalan *billet* terhadap nilai maksimum tegangan sisa kompresi pada arah radial ini juga memiliki nilai yang sama dengan data yang telah diperoleh pada Tabel 4.2. Hanya saja untuk mengamati pengaruh ketebalan *billet*, maka perlu adanya perubahan terhadap grafik yang dibuat. Grafik yang dibuat pada sub bab ini adalah grafik antara ketebalan *billet* dengan nilai maksimum tegangan sisa kompresi pada arah radial roda kereta seperti yang ditunjukkan

pada Gambar 4.33. Pada grafik tersebut dilakukan pengamatan terhadap pengaruh ketebalan *billet* terhadap nilai maksimum tegangan sisa kompresi pada arah radial, dengan gaya *forging* yang sama sesuai dengan variasi yang telah ditetapkan pada penelitian ini.



Gambar 4.33 Ketebalan *Billet* vs. Nilai Maksimum Tegangan Sisa Kompresi pada Arah Radial Roda Kereta

Sama seperti pengamatan yang dilakukan sebelumnya terkait pengaruh ketebalan *billet* terhadap tegangan sisa kompresi pada arah radial, pada Gambar 4.33 dapat terlihat bahwa pada grafik yang dihasilkan tersebut memiliki error ataupun fluktuasi yang sangat besar, sehingga akan sangat sulit untuk menyimpulkan bagaimana pengaruh ketebalan *billet* yang digunakan pada proses *forging* terhadap nilai maksimum tegangan sisa kompresi pada arah radial roda kereta. Faktor yang mempengaruhi terjadinya error atau fluktuasi yang besar ini telah dijelaskan pada pembahasan sebelumnya dan ditunjukkan pada Gambar 4.29, dan Gambar 4.30.

Pada Gambar 4.33 dapat diamati bahwa pada lokasi pengamatan 2R/5 menunjukkan *trandline* yang menurun dari ketebalan *billet* 72mm hingga 78mm. Selain itu, *trandline* yang menurun ini juga dapat terlihat pada lokasi pengamatan 3R/5 dengan ketebalan 72mm hingga 78mm, dan juga pada lokasi

pengamatan 4R/5, dengan ketebalan 72mm hingga 78mm. *Trandline* yang cenderung turun ini menjelaskan bahwa adanya kenaikan nilai maksimum tegangan sisa kompresi pada arah radial. Hal tersebut sesuai dengan penjelasan sebelumnya terkait Gambar 4.31, dan Gambar 4.32 yang menunjukkan adanya peningkatan nilai maksimum tegangan sisa kompresi pada arah radial yang terdapat pada bagian web roda kereta. Rata-rata peningkatan nilai maksimum tegangan sisa pada arah radial karena penggunaan tebal *billet* yang berbeda ini berkisar antara 153,2MPa hingga 169,7MPa. Namun, terdapat juga beberapa bagian yang menunjukkan *trandline* yang menaik, terutama pada lokasi pengamatan R/5 dengan ketebalan 70mm hingga 78mm., dan lokasi pengamatan R dengan ketebalan 70mm hingga 78mm. *Trandline* yang menaik pada lokasi pengamatan R/5, dan lokasi pengamatan R ini memberikan penjelasan bahwa adanya penurunan nilai maksimum tegangan sisa kompresi pada arah radial. Rata-rata penurunan nilai maksimum tegangan sisa pada arah radial karena penggunaan tebal *billet* yang berbeda ini berkisar antara 68,8MPa hingga 78MPa. Selain itu, *trandline* yang menaik pada lokasi pengamatan R/5, dan lokasi pengamatan R ini juga sesuai dengan hasil yang ditunjukkan pada Gambar 4.31, dan 4.32, bahwa semakin tebal *billet* yang digunakan, maka akan cenderung untuk meningkatkan daerah distribusi tegangan sisa yang bersifat tarik pada arah radial, terutama pada bagian hub, dan rim roda kereta.

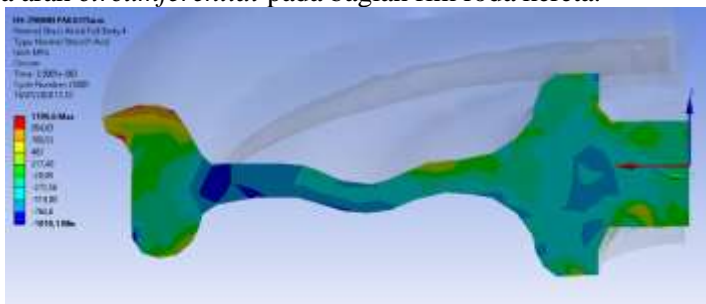
4.3.3 Pengaruh Ketebalan Billet Terhadap Tegangan Residual pada Arah *Circumferential*

Pengamatan terakhir pada penelitian ini yang terkait dengan tegangan sisa adalah bagaimana pengaruh ketebalan *billet* yang digunakan terhadap tegangan sisa pada arah *circumferential* yang terdapat pada roda kereta hasil dari proses *forging*. Seperti yang dijelaskan sebelumnya bahwa tegangan sisa pada arah *circumferential* ini merupakan tegangan sisa utama yang perlu dianalisa sesuai dengan standarisasi EN 13262, dan juga berdasarkan penelitian-penelitian terdahulu. Hal tersebut

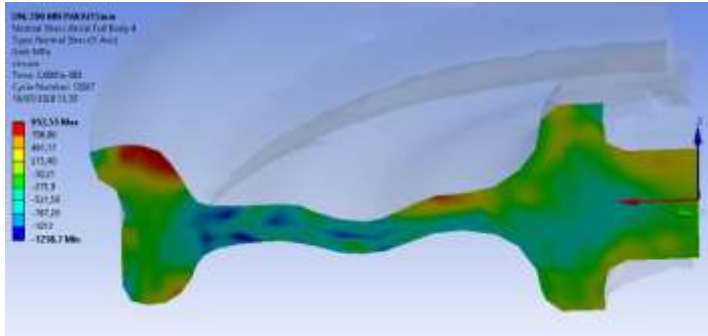
dikarenakan tegangan sisa pada arah *circumferential* ini memiliki pengaruh yang lebih signifikan apabila dibandingkan dengan tegangan sisa lainnya terhadap kekuatan roda kereta pada saat operasional. Sama halnya dengan pengamatan tegangan sisa pada arah *circumferential* yang dipengaruhi besar gaya *forging* yang digunakan sebelumnya, tampak pada Gambar 4.34, dan Gambar 4.35 bahwa bagian roda kereta hasil dari proses *forging* yang lebih banyak mengandung tegangan sisa pada arah *circumferential* yang bersifat tarik adalah bagian rim roda kereta, yang justru bagian rim ini merupakan bagian yang menjadi *concern* dalam pengamatan tegangan sisa pada arah *circumferential*. Sementara pada bagian web, dan bagian hub lebih banyak didominasi oleh tegangan sisa kompresi pada arah *circumferential*. Gambar 4.34 merupakan hasil distribusi tegangan sisa *circumferential* pada roda kereta setelah proses *forging* dengan menggunakan ketebalan *billet* awal 74mm, dan gaya *forging* sebesar 290MN. Sementara itu, Gambar 4.35 merupakan hasil distribusi tegangan sisa *circumferential* pada roda kereta setelah proses *forging* dengan menggunakan ketebalan *billet* awal 78mm, dan gaya *forging* sebesar 290MN.

Dari kedua gambar tersebut dapat dilakukan pengamatan ketika menggunakan gaya *forging* yang sama, dan dengan menggunakan ketebalan *billet* yang berbeda, akan didapatkan hasil bahwa dengan menggunakan ketebalan *billet* yang lebih besar maka distribusi tegangan sisa pada arah *circumferential* yang bersifat tarik juga akan semakin banyak. Terlihat pada bagian web, dan bagian rim dengan ketebalan yang lebih besar, dan gaya yang sama akan memiliki distribusi tegangan sisa tarik pada arah *circumferential* yang lebih besar pula, walaupun terdapat penurunan dari segi nilai maksimum tegangan tarik pada arah *circumferential* yang dihasilkan. Selain itu, berdasarkan kedua gambar tersebut juga dapat diamati bahwa terdapat peningkatan nilai maksimum tegangan sisa yang bersifat kompresi apabila menggunakan ketebalan *billet* yang lebih besar, dengan menggunakan gaya yang sama. Hal tersebut merupakan sebuah keuntungan untuk mendapatkan nilai maksimum tegangan sisa

kompresi pada arah *circumferential* dengan menggunakan *billet* awal yang lebih tebal. Namun, perlu digaris bawahi bahwa peningkatan nilai maksimum tegangan sisa kompresi tersebut terjadi pada bagian web roda kereta. Sementara itu, pada bagian rim roda kereta yang merupakan *concern* utama dalam pengamatan tegangan sisa arah *circumferential* ini terjadi peningkatan distribusi tegangan sisa yang bersifat tarik. Hal tersebut justru akan lebih merugikan, mengingat bagian rim roda kereta ini adalah bagian yang sangat krusial, karena akan mengalami kontak langsung dengan lintasan kereta pada saat operasional. Berdasarkan standarisasi EN 13262 menyebutkan bahwa pada bagian rim tidak boleh terdapat tegangan sisa pada arah *circumferential* yang bersifat tarik hingga kedalaman 35mm dari permukaan terluar roda kereta, yang dapat ditimbulkan dari proses pembuatan roda kereta tersebut. Selain itu, berdasarkan penelitian sebelumnya juga didapatkan analisa bahwa kegagalan yang sering terjadi pada roda kereta tersebut, banyak terdapat pada bagian rim roda kereta. Oleh karena itu, sangat penting untuk mempertimbangkan ketebalan *billet* yang digunakan ini terkait dengan pembentukan tegangan sisa arah *circumferential* pada bagian rim roda kereta.



Gambar 4.34 Tegangan Sisa Arah *Circumferential* dengan Ketebalan *Billet* 74mm

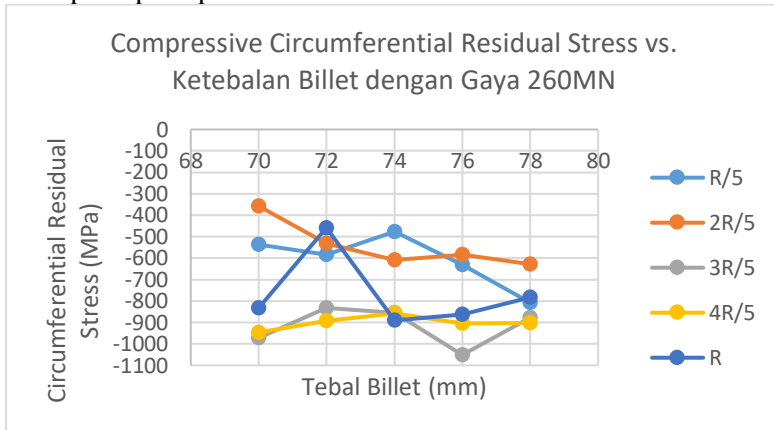


Gambar 4.35 Tegangan Sisa Arah *Circumferential* dengan Ketebalan *Billet* 78mm

Selain itu, pada bagian ini juga perlu untuk diamati bagaimana pengaruh dari ketebalan *billet* yang digunakan terhadap tegangan sisa pada arah *circumferential* ini menggunakan 5 lokasi pengamatan yang sama seperti yang dilakukan pada pembahasan sebelumnya. Lokasi pengamatan tersebut terletak pada bagian R/5 hingga R pada arah radial roda kereta, untuk merepresentasikan bagian-bagian yang sama seperti yang telah dijelaskan sebelumnya. Pada pengamatan ini juga menggunakan nilai maksimum tegangan sisa kompresi yang ada pada arah *circumferential* di setiap lokasi pengamatan. Nilai maksimum tegangan sisa kompresi pada arah *circumferential* roda kereta ini didapatkan dengan mengamati tegangan normal pada arah sumbu Y, dan nilai yang paling negatif tersebut merupakan nilai maksimum tegangan sisa kompresi pada arah *circumferential*, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.34, dan Gambar 4.35, dan penjelasan pada sub bab sebelumnya.

Data yang didapatkan untuk mengamati pengaruh ketebalan *billet* terhadap nilai maksimum tegangan sisa kompresi pada arah *circumferential* ini juga memiliki nilai yang sama dengan data yang telah diperoleh pada Tabel 4.3. Hanya saja untuk mengamati pengaruh ketebalan *billet*, maka perlu adanya perubahan terhadap grafik yang dibuat. Grafik yang dibuat pada sub bab ini adalah grafik antara ketebalan *billet* dengan nilai maksimum tegangan sisa

kompresi pada arah *circumferential* roda kereta seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.36. Pada grafik tersebut dilakukan pengamatan terhadap pengaruh ketebalan *billet* terhadap nilai maksimum tegangan sisa kompresi pada arah *circumferential*, dengan gaya *forging* yang sama sesuai dengan variasi yang telah ditetapkan pada penelitian ini.



Gambar 4.36 Ketebalan *Billet* vs. Nilai Maksimum Tegangan Sisa Kompresi pada Arah *Circumferential* Roda Kereta

Sama seperti pengamatan yang dilakukan sebelumnya terkait pengaruh ketebalan *billet* terhadap tegangan sisa kompresi pada arah aksial, pada Gambar 4.36 dapat terlihat bahwa pada grafik yang dihasilkan tersebut memiliki error ataupun fluktuasi yang sangat besar, sehingga akan sangat sulit untuk menyimpulkan bagaimana pengaruh ketebalan *billet* yang digunakan pada proses *forging* terhadap nilai maksimum tegangan sisa kompresi pada arah *circumferential* roda kereta. Faktor yang mempengaruhi terjadinya error atau fluktuasi yang besar ini telah dijelaskan pada pembahasan sebelumnya dan ditunjukkan pada Gambar 4.29, dan Gambar 4.30.

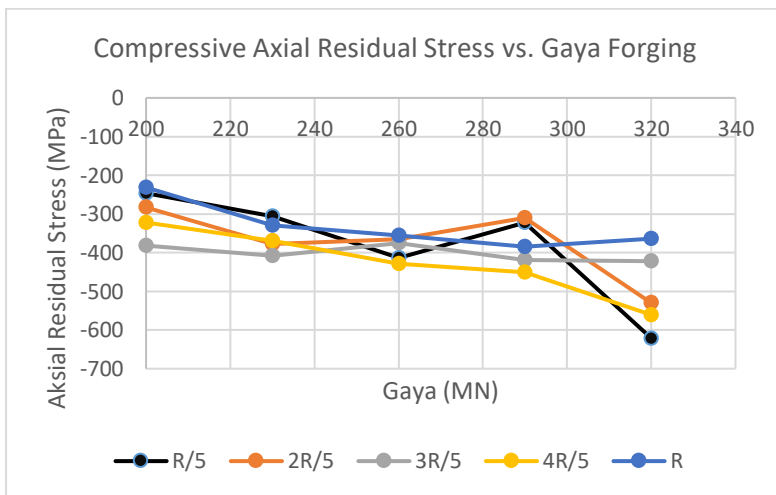
Pada Gambar 4.36 dapat diamati bahwa pada lokasi pengamatan R/5 menunjukkan *trendline* yang menurun dari ketebalan *billet* 70mm hingga 78mm. Selain itu, *trandline* yang

menurun ini juga dapat terlihat pada lokasi pengamatan 2R/5 dengan ketebalan 70mm hingga 78mm, dan juga pada lokasi pengamatan 3R/5, dengan ketebalan 72mm hingga 76mm. *Trandline* yang cenderung turun ini menjelaskan bahwa adanya kenaikan nilai maksimum tegangan sisa kompresi pada arah *circumferential*. Rata-rata peningkatan nilai maksimum tegangan sisa pada arah *circumferential* karena penggunaan tebal *billet* yang berbeda ini berkisar antara 111,7MPa hingga 140,7MPa. Hal tersebut sesuai dengan penjelasan sebelumnya terkait Gambar 4.34, dan Gambar 4.35 yang menunjukkan adanya peningkatan nilai maksimum tegangan sisa kompresi pada arah *circumferential* yang terdapat pada bagian web, dan bagian hub roda kereta. Walaupun pada Gambar 4.35 tersebut menunjukkan bahwa daerah distribusi tegangan sisa yang bersifat kompresi pada arah *circumferential* di bagian hub menjadi semakin mengecil apabila menggunakan ketebalan *billet* awal yang lebih besar. Pada Gambar 4.36 juga dapat diamati bahwa terdapat beberapa bagian yang menunjukkan *trandline* yang menaik, terutama pada lokasi pengamatan 4R/5 dengan ketebalan 70mm hingga 78mm., dan lokasi pengamatan R dengan ketebalan 74mm hingga 78mm. *Trandline* yang menaik pada lokasi pengamatan 4R/5, dan lokasi pengamatan R ini memberikan penjelasan bahwa adanya penurunan nilai maksimum tegangan sisa kompresi pada arah *circumferential*. Rata-rata penurunan nilai maksimum tegangan sisa pada arah *circumferential* karena penggunaan tebal *billet* yang berbeda ini berkisar antara 95,7MPa hingga 105MPa. Selain itu, *trandline* yang menaik pada lokasi pengamatan 4R/5, dan lokasi pengamatan R ini juga sesuai dengan hasil yang ditunjukkan pada Gambar 4.34, dan 4.35, bahwa semakin tebal *billet* yang digunakan, maka akan cenderung untuk meningkatkan daerah distribusi tegangan sisa yang bersifat tarik pada arah *circumferential*, terutama pada bagian rim roda kereta.

4.3 Verifikasi Hasil Tegangan Residual Aksial

Pada sub bab ini akan dibahas bagaimana perbandingan hasil tegangan yang didapatkan pada penelitian ini, dengan hasil

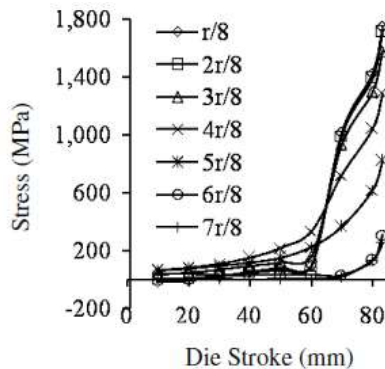
tegangan yang didapatkan pada penelitian sebelumnya yang menjadi referensi pada penelitian ini. Salah satu tegangan yang dianalisa pada penelitian ini adalah tegangan residual pada arah aksial roda kereta hasil dari proses *forging*. Hasil tegangan residual pada arah aksial roda kereta ditunjukkan pada Gambar 4.37. Pada Gambar 4.37 tersebut dilakukan pengamatan terhadap 5 lokasi yang telah ditentukan sebelumnya, yaitu lokasi R/5 hingga R pada arah radial roda kereta. Lokasi pengamatan R/5 merepresentasikan bagian hub roda kereta, sementara lokasi pengamatan 2R/5 hingga 4R/5 merepresentasikan bagian web roda kereta, dan lokasi pengamatan R merepresentasikan bagian rim roda kereta. Pada Gambar 4.37 didapatkan hasil bahwa pada lokasi pengamatan 3R/5, dan 4R/5 memiliki tegangan residual pada arah aksial yang lebih besar apabila dibandingkan dengan bagian lain.



Gambar 4.37 Tegangan Aksial pada Penelitian Ini

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa lokasi pengamatan 3R/5, dan 4R/5 ini merupakan lokasi pengamatan yang berada pada bagian web roda kereta. Hal ini sesuai dengan hasil yang didapatkan pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Tapas Gangopadhyay seperti yang ditunjukkan pada Gambar

4.38. Penelitian yang dilakukan oleh Tapas Gangopadhyay adalah tentang analisa proses *forging* roda kereta dengan metode *hot forging*, dimana *output* dari penelitian tersebut adalah untuk mengestimasi gaya yang dibutuhkan untuk melakukan proses *forging* roda kereta. Sebelum dapat mengestimasi gaya yang dibutuhkan, maka pada penelitian tersebut perlu mengetahui berapa tegangan tekan pada arah aksial *billet* roda kereta pada saat proses *forging*. Tegangan tekan pada arah aksial *billet* roda kereta tersebut ditunjukkan pada Gambar 4.38, dengan melakukan pengamatan pada 7 lokasi pengamatan dalam arah radial roda kereta.



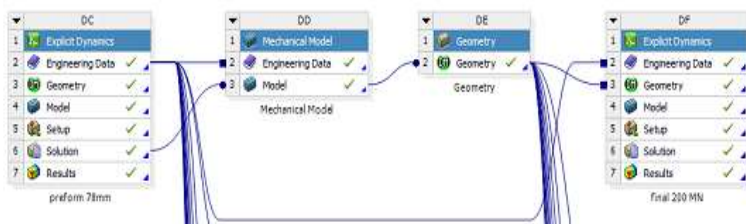
Gambar 4.38 Tegangan Aksial pada Penelitian Sebelumnya

Pada Gambar 4.38 tersebut didapatkan hasil tegangan tekan pada arah aksial roda kereta selama proses *forging*. Perbedaan analisa yang ada pada penelitian yang dilakukan oleh Tapas Gangopadhyay, dengan penelitian ini adalah dalam menganalisa tegangan pada *billet* roda kereta. Pada penelitian yang dilakukan oleh Tapas Gangopadhyay menganalisa tegangan tekan pada arah aksial selama proses *forging*, sementara pada penelitian ini menganalisa tegangan residual pada arah aksial setelah proses *forging*. Hasil tegangan pada arah aksial yang didapatkan pada kedua penelitian ini memiliki kesesuaian. Pada penelitian Tapas Gangopadhyay didapatkan hasil bahwa lokasi pengamatan 4R/8

memiliki tegangan tekan aksial yang lebih tinggi apabila dibandingkan dengan lokasi pengamatan lain. Lokasi pengamatan 4R/8 tersebut juga terdapat pada bagian web roda kereta, sesuai dengan yang didapatkan pada penelitian ini yang direpresentasikan dengan lokasi pengamatan 3R/5, dan 4R/5. Sehingga, pada bagian web roda kereta akan memiliki tegangan tekan pada arah aksial yang lebih tinggi apabila dibandingkan dengan bagian lain pada saat proses *forging*.

4.4 Superposisi Tegangan Residual pada Tahap *Pre Forming* dan *Final Forging*

Pada penelitian ini dilakukan analisa terhadap tegangan residual yang ada pada roda kereta hasil dari proses *forging*. Proses *forging* yang dilakukan terdiri dari 2 tahap, yaitu tahap *preforming* dan tahap *final forging*. Pada tiap tahapan proses *forging* ini digunakan bentuk cetakan yang berbeda untuk menunjang tahapan terbentuknya roda kereta. Skema jalannya simulasi untuk proses *forging* dengan 2 tahapan ini ditunjukkan pada Gambar 4.39. Pada gambar tersebut dapat diamati, bahwa dengan skema simulasi seperti itu akan menyebabkan hasil analisa pada tahap *preforming* dan tahap *final forging* menjadi terpisah.



Gambar 4.39 Tahapan Simulasi

Hasil analisa pada 2 tahapan *forging* tersebut menjadi terpisah karena langkah yang dapat dilakukan pada jalannya simulasi ini hanya terbatas pada *transfer* hasil geometri yang telah terdeformasi. Sementara itu, analisa hasil seperti tegangan dan regangan yang ada pada tahap *preforming* tidak dapat ikut serta untuk diekspor menjadi *import load* pada tahap *final forging*.

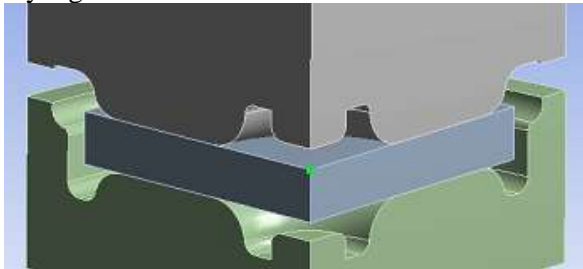
Padahal sebenarnya pada tahap *preforming* tersebut telah terbentuk tegangan residual yang seharusnya juga akan mempengaruhi besar tegangan residual yang dihasilkan pada tahap *final forging*. Sehingga, yang telah dilakukan pada penelitian ini adalah hanya menganalisa tegangan residual yang ada pada tahap *final forging*, tanpa melibatkan *initial stress* pada *billet* akibat dari tahapan *preforming*.

Terdapat beberapa penyebab yang menjadi kendala untuk mentransfer analisa hasil pada tahap *preforming* menjadi *import load* pada tahap *final forging*, diantaranya adalah adanya keterbatasan dari software ANSYS untuk mengkombinasi beberapa analisa atau simulasi dalam lingkup *explicit*. Software ANSYS yang digunakan pada penelitian ini belum menunjang kombinasi simulasi dalam lingkup *explicit*, baik itu kombinasi antara analisa struktural dengan analisa struktural juga, maupun kombinasi antara analisa struktural dengan analisa termal. Selain itu, hal yang menjadi kendala juga adalah adanya penggantian cetakan pada proses *forging* dengan 2 tahapan ini. Hal tersebut mengakibatkan harusnya mengubah geometri dari tahap *preforming* menuju tahap *final forging*, sehingga analisa hasil atau *solution* dari tahap *preforming* tidak dapat diekspor menjadi *import load* pada tahap *final forging*. Geometri pada tahap *final forging* harus berasal dari hasil penggantian geometri sebelumnya seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.39. Adanya 2 kendala tersebut menyebabkan analisa yang ada pada tahap *preforming* dan *final forging* menjadi terpisah, sehingga perlu dilakukan pemodelan ulang pada tahap *final forging*, termasuk juga melakukan proses *mesh* ulang. Hal tersebut menyebabkan *mesh* yang ada pada tahap *preforming* dan *final forging* menjadi berbeda, dan menjadi kendala untuk melakukan analisa kombinasi secara manual dengan melakukan analisa superposisi.

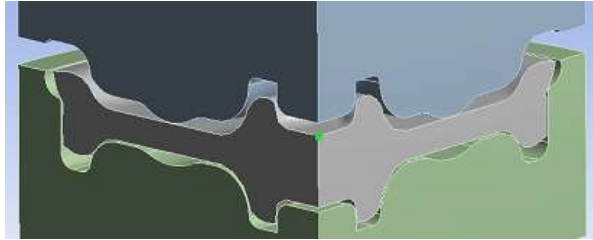
Analisa superposisi secara manual yang bisa dilakukan adalah dengan mengamati lokasi yang sama, atau mengamati *node* yang sama pada tahap *preforming* dan tahap *final forging*. Pada *node* yang sama tersebut nantinya dapat dijumlahkan nilai tegangan

residual dari 2 tahapan *forging*, sehingga analisa hasil yang didapatkan nantinya telah merepresentasikan tegangan residual dari keseluruhan tahapan, tidak hanya yang ada pada tahapan *final forging* tanpa melibatkan *initial stress* dari tahap *preforming*. Namun, seperti yang dijelaskan sebelumnya bahwa elemen atau *mesh* yang ada pada tahap *final forging* ini berbeda dengan yang ada pada tahap *preforming*. Terlebih pada tahap *final forging* cenderung lebih baik menggunakan elemen tetrahedral daripada elemen *hexahedral*. Padahal elemen yang digunakan pada tahap *preforming* adalah elemen *hexahedral*. Hal tersebut menjadi kendala untuk melakukan analisa superposisi pada 2 tahapan *forging* ini.

Walaupun begitu, analisa superposisi ini tetap bisa dilakukan pada titik-titik tertentu. Pada sub bab ini akan dibahas bagaimana untuk melakukan analisa superposisi pada tahap *preforming* dan tahap *final forging*, yang terbatas hanya dapat dilakukan pada titik tertentu yang sama pada 2 tahapan *forging* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.40. Dengan analisa superposisi tersebut akan didapatkan hasil analisa dari keseluruhan tahapan pada titik yang diamati.



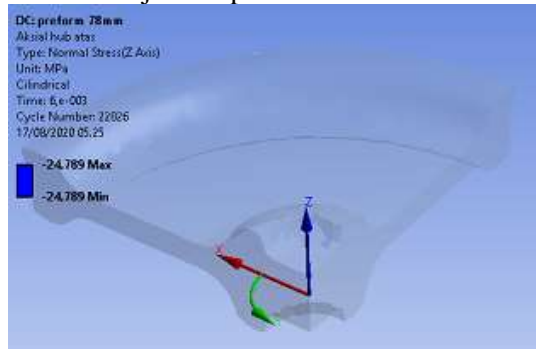
(a)



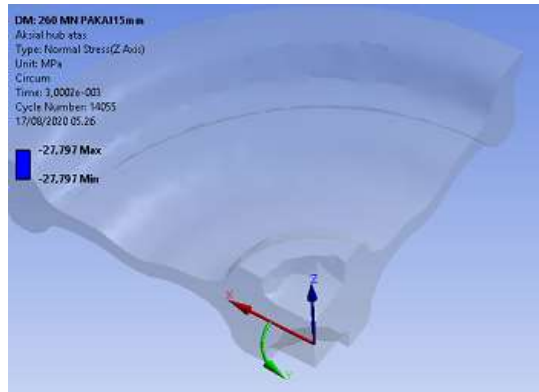
(b)

Gambar 4.40 (a) *Preforming* ; (b) *Final Forging*

Sebagai contoh adalah pada Gambar 4.40, untuk mengamati titik yang sama pada *billet* tahap *preforming*, dan *final forging*. Titik tersebut terdapat pada bagian tengah roda kereta. Setelah menentukan titik pengamatan, maka selanjutnya diamati bagaimana tegangan sisa yang terbentuk pada titik tersebut sebagai hasil dari tahap *preforming*, dan tahap *final forging*. Tegangan sisa pada arah aksial ditunjukkan pada Gambar 4.41.



(a)



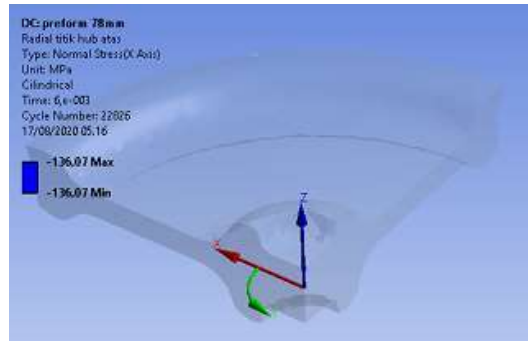
(b)

Gambar 4.41 (a) *Preforming* ; (b) *Final Forging*

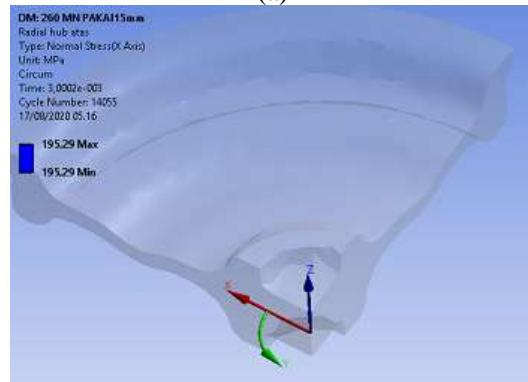
Pada tahap *preforming* menghasilkan tegangan sisa pada arah aksial sebesar $-24,8$ MPa, dan pada tahap *final forging* menghasilkan tegangan sisa sebesar $-27,8$ MPa. Sehingga, apabila dilakukan pengamatan superposisi terhadap 2 hasil tersebut, maka akan didapatkan hasil sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 & \textit{Tegangan residual superposisi} \\
 &= \textit{Tegangan sisa preforming} \\
 &+ \textit{Tegangan sisa final forging} \\
 &= (-24,8) + (-27,8) \textit{ MPa} \\
 &= -52,6 \textit{ MPa}
 \end{aligned}$$

Selain itu, diamati pula tegangan sisa pada arah radial, dan *circumferential* roda kereta seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.42, dan Gambar 4.43.



(a)



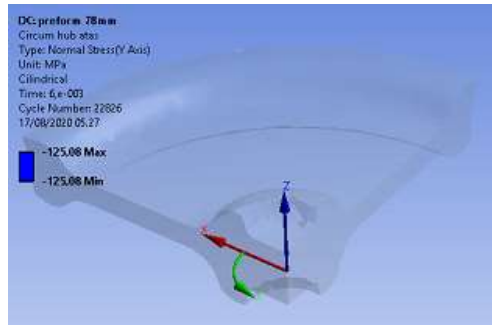
(b)

Gambar 4.42 (a) *Preforming* ; (b) *Final Forging*

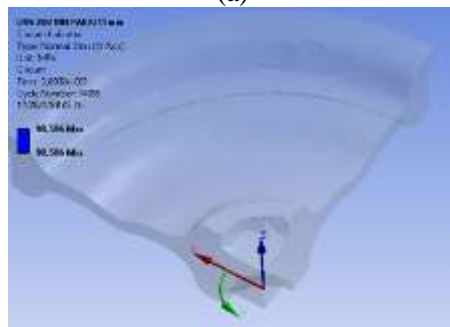
Berdasarkan Gambar 4.42, didapatkan nilai tegangan residual pada arah radial dari tahap *preforming* sebesar -136,1 MPa, dan pada tahap *final forging* dihasilkan tegangan sisa pada arah radial sebesar 195,3 MPa. Sehingga, apabila dilakukan pengamatan superposisi terhadap 2 hasil tersebut, maka akan didapatkan hasil sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 & \text{Tegangan residual superposisi} \\
 & = \text{Tegangan sisa preforming} \\
 & + \text{Tegangan sisa final forging}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= (-136,1) + (195,3) \text{ MPa} \\
 &= 59,2 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$



(a)



(b)

Gambar 4.43 (a) *Preforming* ; (b) *Final Forging*

Berdasarkan Gambar 4.43 Didapatkan nilai tegangan residual pada arah *circumferential* dari tahap *preforming* sebesar -125,1 MPa, dan pada tahap *final forging* dihasilkan tegangan sisa pada arah radial sebesar 98,6 MPa. Sehingga, apabila dilakukan pengamatan superposisi terhadap 2 hasil tersebut, maka akan didapatkan hasil sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 &\textit{Tegangan residual superposisi} \\
 &= \textit{Tegangan sisa preforming} \\
 &+ \textit{Tegangan sisa final forging}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= (-125,1) + (98,6) \text{ MPa} \\ &= -26,5 \text{ MPa} \end{aligned}$$

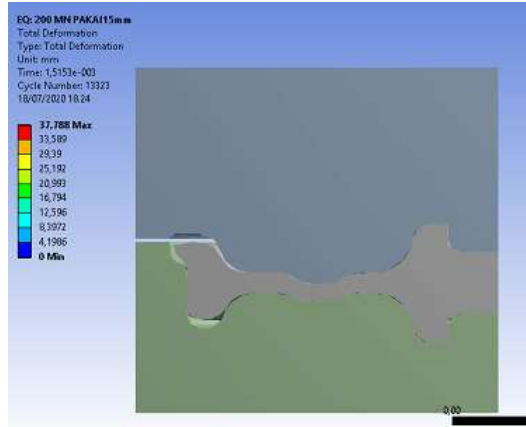
Pengamatan yang dapat dilakukan pada penelitian ini, untuk menganalisa keseluruhan tegangan sisa yang terdapat pada tahap *preforming*, dan tahap *final forging* hanya terbatas pada titik bagian tengah roda kereta saja. Hal tersebut bertujuan untuk benar-benar mengamati titik yang sama pada kedua tahapan *forging* yang digunakan. Apabila telah ditetapkan untuk mengamati titik yang sama, maka selanjutnya dapat dilakukan analisa superposisi untuk mendapatkan hasil kombinasi dari tahap *preforming*, dan tahap *final forging* sesuai dengan contoh yang telah diberikan.

4.5 Ketepatan Geometri pada Tiap Rancangan *Forging*

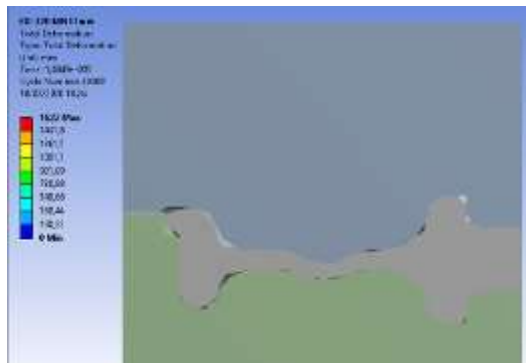
Selain menganalisa bagaimana tegangan sisa yang dihasilkan dari proses *forging* roda kereta, perlu juga untuk menganalisa bagaimana ketepatan dari geometri roda kereta yang telah dihasilkan dari proses *forging* tersebut. Ketepatan geometri yang dihasilkan menjadi hal utama yang akan dipertimbangkan dalam merencanakan proses *forging* untuk membentuk suatu geometri tertentu. Ketepatan geometri yang dihasilkan ini dapat menjadi salah satu parameter keberhasilan dari proses *forging* yang telah direncanakan. Hal tersebut juga berlaku pada proses *forging* roda kereta cepat ini. Mungkin apabila mempertimbangkan hasil tegangan sisa yang terdapat pada produk hasil *forging tersebut*, masih bisa untuk dilakukan proses berikutnya yang berupa proses perlakuan panas untuk menghilangkan tegangan sisa yang terdapat pada produk. Namun, apabila produk yang dihasilkan tersebut memiliki keakuratan yang jauh berbeda dengan yang telah direncanakan, maka akan sangat sulit untuk mengubah geometri tersebut menjadi seperti yang telah direncanakan dengan tahapan-tahapan yang bisa dilakukan setelah proses *forging*. Oleh karena itu, perlu untuk dianalisa bagaimana ketepatan geometri roda kereta dari poses *forging* yang telah direncanakan pada penelitian ini.

Ketepatan geometri produk yang dihasilkan dari proses *forging* ini memiliki beberapa faktor yang menunjang, diantaranya adalah besar gaya *forging* yang digunakan, bentuk geometri awal *billet*, bentuk cetakan, dan kemampuan material untuk terbentuk. Pada sub bab ini akan membahas bagaimana ketepatan geometri roda kereta yang dihasilkan dari proses *forging*, dengan mempertimbangkan faktor geometri awal *billet*, dan juga besar gaya *forging* yang digunakan. Geometri awal *billet* roda kereta ini berbentuk silinder, dan faktor geometri awal *billet* roda kereta yang digunakan pada penelitian ini ditentukan dari ketebalannya. Sementara itu, diameter silinder yang digunakan bernilai tetap. Untuk dimensi dari cetakan yang digunakan pada penelitian ini adalah menyesuaikan dengan dimensi roda kereta, belum ada perubahan yang signifikan dari dimensi cetakan pada penelitian ini.

Ketepatan geometri dari produk hasil *forging* ini dapat diamati dari bagaimana jalannya proses *forging* tersebut. Ketidak tepatan geometri produk hasil *forging* ini disebabkan karena adanya kemungkinan tidak terisinya rongga cetakan secara sempurna oleh *billet*, dan juga terdapat kemungkinan *billet* yang sudah terdeformasi akan mengalami *spring back* sehingga akan mengubah deformasi yang sudah terbentuk saat proses *forging*.



Gambar 4.44 Proses *Forging* dengan Ketebalan *Billet* 70mm, dan Gaya 200MN

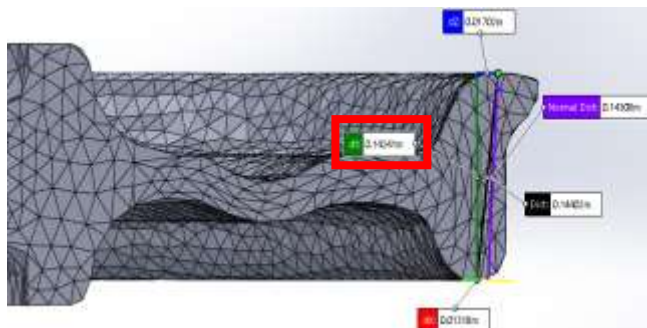


Gambar 4.45 Proses *Forging* dengan Ketebalan *Billet* 70mm, dan Gaya 320MN

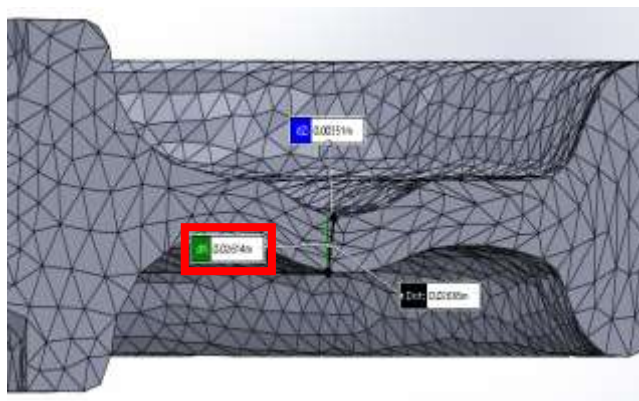
Pada Gambar 4.44, dan Gambar 4.45 dapat dilakukan pengamatan bagaimana proses pengisian *billet* terhadap rongga cetakan, dengan menggunakan ketebalan *billet* yang sama yaitu 70mm, namun dengan gaya *forging* yang berbeda. Pada Gambar 4.44 menggunakan gaya *forging* sebesar 200MN, dan pada Gambar 4.45 menggunakan gaya *forging* sebesar 320MN. Dari

dibutuhkan akan lebih besar daripada 320MN agar *billet* lebih tertekan lagi. Beda halnya dengan Gambar 4.45, ketidak sempurnaan pengisian *billet* pada rongga cetakan lebih disebabkan karena terlalu tipisnya *billet* yang digunakan. Selain itu, penyebab ketidak sempurnaan pengisian *billet* terhadap rongga cetakan adalah dimensi dari cetakan yang masih disesuaikan dengan dimensi roda kereta tanpa ada perubahan yang signifikan. Hal tersebut jelas akan membuat sulitnya *billet* roda kereta untuk mengisi rongga cetakan, utamanya pada bagian *flange* pada rim roda kereta yang memiliki dimensi dengan bentuk *fillet*. Pada proses produksi roda kereta sebenarnya, setelah tahapan *forging* ini dilakukan, maka tahapan berikutnya adalah proses *rolling*, dimana pada tahapan *rolling* ini *flange* roda kereta akan terbentuk dengan baik. Sementara pada tahapan *forging* hanya sebatas memberikan bentuk awal saja untuk bagian *flange*, dan bentuk yang dihasilkan belum terlalu baik.

Untuk mengamati ketepatan geometri roda kereta cepat yang dihasilkan dari proses *forging* ini, maka dilakukan pengukuran ketebalan-ketebalan yang ada pada roda kereta. Ketebalan yang menjadi parameter ketepatan geometri ini adalah ketebalan pada bagian web, dan ketebalan pada bagian rim roda kereta. Ketebalan pada bagian tersebut merepresentasikan bagian yang mengalami deformasi paling besar, yaitu bagian web roda kereta, dan juga merepresentasikan bagian yang mengalami kekosongan rongga cetakan paling banyak yaitu bagian rim roda kereta. Pengamatan ketebalan roda kereta hasil dari proses *forging* ini dilakukan dengan cara mengeksport hasil *billet* yang telah terdeformasi dari tahap *anal forging* ke *software* SOLIDWORKS. Pada *software* SOLIDWORKS tersebut dapat dilakukan evaluasi dengan mengetahui dimensi yang ada. Pengukuran tersebut dilakukan dengan melakukan *measurement* antara jarak garis pada elemen satu dengan garis pada elemen lainnya, sehingga nantinya akan muncul berapa jarak kedua garis tersebut pada arah lurus vertikal yang direpresentasikan dengan pengukuran dY seperti pada Gambar 4.47, dan Gambar 4.48.



Gambar 4.47 Hasil Pengukuran pada Bagian Rim Roda Kereta



Gambar 4.48 Hasil Pengukuran pada Bagian Web Roda Kereta

Gambar 4.47, dan Gambar 4.48 merupakan hasil pengukuran ketebalan roda kereta pada bagian rim, dan bagian web. Roda kereta pada Gambar 4.47, dan Gambar 4.48 tersebut merupakan hasil dari proses *forging* dengan menggunakan ketebalan *billet* awal sebesar 78mm, dan menggunakan gaya *forging* sebesar 320MN. Pembacaan hasil pengukuran ketebalan pada bagian rim, dan bagian web tersebut menggunakan pembacaan yang ditunjukkan oleh parameter dY. Parameter dY tersebut merupakan representasi dari jarak lurus verikal antara dua garis elemen yang dipilih untuk mengetahui jarak diantara keduanya, dan hasilnya

merupakan ketebalan bagian roda kereta yang ingin diketahui. Pada Gambar 4.47 didapatkan hasil pengukuran ketebalan roda kereta pada bagian rim sebesar 142,41mm, dan pada Gambar 4.48 didapatkan hasil pengukuran ketebalan roda kereta pada bagian web sebesar 26,14mm. Ketidaktepatan dari dimensi roda kereta yang dihasilkan ini diakibatkan oleh beberapa faktor.

Faktor yang pertama adalah tidak terisinya rongga cetakan oleh *billet* secara sempurna. Hal tersebut dikarenakan *billet* yang digunakan terlalu tebal, ataupun juga diameter *billet* yang digunakan terlalu lebar, sehingga beberapa bagian dari *billet* menghalangi jalannya cetakan untuk melakukan proses *forging* secara sempurna. Terhambatnya pergerakan cetakan ini dapat dilihat seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4.46, dimana *billet* yang melebar tersebut terlalu tebal, dan menghalangi pergerakan saat proses *forging*. Pada dasarnya, adanya beberapa bagian *billet* yang melebar, dan menghalangi pergerakan cetakan tersebut bukanlah permasalahan utama dalam tahapan *forging* pada proses pembuatan roda kereta, karena memang pada tahap *forging* roda kereta ini lebih mengarah kepada proses *impression die forging*. Roda kereta hasil proses *forging* ini selanjutnya akan melalui tahap *rolling*, dan juga *machining*, dimana pada tahap tersebut dimensi dari roda kereta akan diperbaiki sesuai dengan dimensi yang telah direncanakan, dan toleransi ukuran yang telah ditetapkan juga sebelumnya. Namun, hal tersebut bukan berarti perancangan proses *forging* roda kereta ini bisa dengan dimensi atau geometri cetakan yang tidak teratur. Perancangan proses *forging* roda kereta ini tetap harus mengacu pada geometri, dan dimensi dari roda kereta yang ingin dibuat, sehingga nantinya pada tahap *machining* tidak perlu melakukan pemotongan terhadap roda kereta terlalu banyak untuk mendapatkan geometri yang tepat.

Faktor kedua yang dapat menyebabkan ketidak tepatan dari dimensi roda kereta yang dihasilkan adalah adanya proses *spring back* dari material roda kereta. Kemungkinan terjadinya proses *spring back* ini adalah pada saat setelah pembebanan *forging* pada *billet* ini dihilangkan. Sesuai dengan prinsip *residual stress*,

dimana pada saat pembebanan pada suatu geometri ini dihilangkan, maka perilaku tegangan terhadap regangan ini juga akan bergerak menuju titik nol, walaupun tegangan tersebut tidak akan bisa kembali menuju titik nol dengan sempurna. Namun, pergerakan perilaku tegangan terhadap regangan sesaat setelah pembebanan dihilangkan ini juga menyebabkan regangan bergeser menuju titik nol, walaupun juga tidak akan bisa dengan sempurna kembali ke titik nol. Hal tersebutlah yang menjadi penyebab adanya kemungkinan *spring back* pada material roda kereta setelah pembebanan *forging* dihilangkan dengan mengangkat *upper die*.

Pada Gambar 4.47, dan Gambar 4.48 tersebut didapatkan roda kereta dengan dimensi yang kurang tepat, dengan menggunakan parameter pengukuran ketebalan pada bagian web, dan bagian rim. Dimensi roda kereta yang direncanakan adalah memiliki ketebalan pada bagian web sebesar 22mm, dan ketebalan pada bagian rim sebesar 135mm. Sehingga, pada hasil proses *forging* dengan ketebalan *billet* awal sebesar 78mm, jari-jari *billet* 430mm, dan gaya *forging* sebesar 320MN, didapatkan hasil penyimpangan ataupun *error* pada geometri roda kereta yang dihasilkan sebesar 5,5% pada parameter pengukuran ketebalan bagian rim roda kereta, dan 18,8% pada parameter pengukuran ketebalan bagian web roda kereta. Penyimpangan ketebalan pada bagian rim tersebut sebesar 7,41mm dari dimensi yang direncanakan, dan penyimpangan pada bagian web sebesar 4,14mm dari dimensi yang direncanakan. Hasil pengukuran ketebalan geometri roda kereta dari proses *forging* telah terdapat pada Tabel 4.4.

Ketebalan Billet (mm)	Gaya (MN)	Ketebalan Rim (mm)	Ketebalan Web (mm)	Ketebalan Rim Sesuai Dimensi (mm)	Ketebalan Web Sesuai Dimensi (mm)	Error Rim (%)	Error Web (%)
70	200	115.48	25.9	135	ø2	14.5	17.7
	230	119.37	25.38			11.6	15.4
	260	123.07	24.66			8.8	12.1
	290	129.86	22.98			3.8	4.5
	320	133.62	22.2			1.0	0.9
72	200	125.58	26.21			7.0	19.1
	230	128.78	25.55			4.6	16.1
	260	132.6	25.18			1.8	14.5
	290	136.28	24.67			0.9	12.1
	320	136.61	22.96			1.2	4.4
74	200	121.87	28.75			9.7	30.7
	230	126.44	27.63			6.3	25.6
	260	135.93	26.69			0.7	21.3
	290	136.55	25.59			1.1	16.3
	320	137	25.35			1.5	15.2
76	200	125.75	29.2			6.9	32.7
	230	130.6	28.31			3.3	28.7
	260	136.08	27.6			0.8	25.5
	290	137.65	25.68			2.0	16.7
	320	139.96	25.65			3.7	16.6
78	200	129.18	30.74	4.3	39.7		
	230	132.72	30.07	1.7	36.7		
	260	136.84	29.05	1.4	32.0		
	290	141.25	28.46	4.6	29.4		
	320	142.41	26.14	5.5	18.8		

Tabel 4.4 Pengamatan Dimensi Ketebalan Roda Kereta Cepat Hasil Proses *Forging*

Pada Tabel 4.4 dapat diketahui bahwa dengan menggunakan *billet* dengan ketebalan yang lebih kecil, maka ketebalan pada bagian rim yang didapatkan tersebut cenderung tidak sesuai dengan geometri yang direncanakan. Ketidaksiuaian tersebut cenderung dikarenakan ketebalan yang dihasilkan pada bagian rim yang dihasilkan tidak mencapai ketebalan yang telah direncanakan.

Tidak tercapainya ketebalan bagian rim tersebut ditunjukkan pada hasil proses *forging* dengan ketebalan *billet* awal 70mm. Dengan menggunakan tebal *billet* awal sebesar 70mm, dan jari-jari *billet* 430mm, maka *billet* tersebut tidak dapat mengisi rongga cetakan secara sempurna. Terlihat pada ketebalan bagian rim yang dihasilkan tidak dapat mencapai ketebalan yang telah ditentukan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.44, dan Gambar 4.45.

Selain itu, pada Tabel 4.4 juga dapat diamati bahwa dengan menggunakan gaya yang lebih besar, maka error yang dihasilkan dari ketebalan bagian rim, dan bagian web cenderung menurun. Hal tersebut dapat terlihat dengan mengamati ketebalan pada bagian rim cenderung mendekati ukuran yang telah direncanakan dengan menggunakan gaya *forging* yang lebih besar pada setiap variasi ketebalan *billet*. Hal tersebut dapat terjadi karena semakin besar gaya *forging* yang digunakan, maka akan semakin kuat pula tekanan yang diterima oleh *billet*, sehingga material *billet* pada bagian web yang menerima tekanan lebih awal, akan bergerak melebar mengisi rongga cetakan pada bagian rim, dan bagian hub. Dengan bergerak melebarnya material yang ada pada bagian web tersebut, akan menyebabkan bagian rim, dan bagian hub lebih terisi dengan sempurna. Semakin besar gaya *forging* yang digunakan, maka material pada bagian web *billet* akan semakin bergerak melebar ke arah rim, dan hub roda kereta. Tidak tercapainya ketebalan pada bagian rim sesuai dengan dimensi yang telah ditetapkan tersebut juga dikarenakan kurangnya pergerakan melebar dari material pada bagian web *billet*, yang disebabkan kurangnya tekanan yang mendorong pergerakan material tersebut. Sehingga perlu ditetapkan besar gaya *forging* yang digunakan agar dapat mendorong material *billet* untuk mengisi rongga cetakan dengan sempurna. Pada hasil pengamatan ketepatan dimensi roda kereta yang dihasilkan berdasarkan parameter ketebalan rim, dan web pada Tabel 4.4, dapat diamati bahwa rancangan proses *forging* yang tepat berdasarkan parameter ketebalan ini adalah dengan menggunakan ketebalan *billet* awal sebesar 74mm hingga 78mm,

dengan diameter *billet* 430mm, dan dengan menggunakan gaya *forging* sebesar 260MN hingga 320MN.

Namun, juga perlu untuk mempertimbangkan bagaimana hasil pengisian *billet* terhadap rongga cetakan pada bagian-bagian yang lain, utamanya pada bagian yang memiliki fillet pada cetakan. Selain itu, perlu juga untuk mempertimbangkan memodifikasi geometri dari cetakan agar proses deformasi dari *billet* dapat mengisi rongga cetakan dengan sempurna, dan dimensi akhir roda kereta yang dihasilkan dari proses *forging* tidak memiliki penyimpangan yang terlalu besar. Proses memodifikasi cetakan tersebut bisa dilakukan dengan membuat cetakan yang memiliki ukuran ketebalan yang lebih kecil daripada ukuran ketebalan roda kereta yang ingin dibuat. Dengan begitu, diharapkan dimensi roda kereta memiliki penyimpangan yang lebih kecil karena *billet* dapat lebih tertekan, sehingga dapat mengisi rongga cetakan dengan lebih sempurna, dan juga memberikan ruang pada *billet* saat terjadi *spring back* pada material roda kereta setelah proses *forging*. Selain itu, perlu juga untuk mengubah geometri cetakan pada bagian rim roda kereta, utamanya pada bagian *flange* menjadi bentuk yang lebih sederhana dari pada bentuk roda kereta yang ingin dibuat, karena nantinya bagian *flange* ini akan lebih terbentuk pada tahapan berikutnya setelah *forging*, yaitu pada tahapan *rolling*. Dengan mengubah geometri cetakan pada bagian *flange* ini menjadi lebih sederhana, diharapkan pengisian *billet* terhadap rongga cetakan, terutama pada bagian rim ini bisa lebih sempurna, sehingga ketebalan roda kereta pada bagian rim bisa lebih mendekati ketebalan sesuai dengan yang telah direncanakan.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian yang sudah dilakukan, maka didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Nilai maksimum tegangan residual yang bersifat kompresi pada arah aksial memiliki peningkatan seiring dengan penambahan besar gaya *forging* yang diberikan. Rata-rata peningkatan nilai maksimum tegangan sisa kompresi pada arah aksial ini berkisar antara 64,67MPa hingga 86,16MPa. Selain itu, nilai maksimum tegangan sisa yang bersifat kompresi pada arah aksial ini memiliki kecenderungan semakin menurun, seiring dengan penggunaan billet awal yang semakin tebal. Rata-rata penurunan nilai maksimum tegangan sisa pada arah aksial karena penggunaan tebal billet yang berbeda ini berkisar antara 84MPa hingga 114MPa.
2. Nilai maksimum tegangan sisa yang bersifat kompresi pada arah radial memiliki penurunan seiring dengan penambahan besar gaya *forging* yang diberikan. Penurunan ini dapat diamati pada lokasi pengamatan 2R/5 hingga R pada arah radial billet roda kereta dengan rata-rata penurunan nilai berkisar antara 140,4MPa hingga 164,4MPa. Sementara itu, nilai maksimum tegangan sisa yang bersifat kompresi pada arah radial ini memiliki kecenderungan untuk semakin naik pada lokasi pengamatan 2R/5 hingga 4R/5, seiring dengan penggunaan billet awal yang semakin tebal. Rata-rata peningkatan nilai maksimum tegangan sisa pada arah radial karena penggunaan tebal billet yang berbeda ini berkisar antara 153,2MPa hingga 169,7MPa. Namun, pada lokasi pengamatan R/5, dan R memiliki kecenderungan semakin menurun dengan rata-rata penurunan berkisar antara 68,8MPa hingga 78MPa.
3. Nilai maksimum tegangan sisa yang bersifat kompresi pada arah *circumferential* memiliki penurunan seiring dengan penambahan besar gaya *forging* yang diberikan. Penurunan ini

dapat diamati pada lokasi pengamatan R/5 hingga 3R/5 dengan rata-rata penurunan berkisar antara 71,5MPa hingga 156,8MPa. Namun, pada lokasi pengamatan 4R/5 hingga R terjadi peningkatan dengan rata-rata peningkatan berkisar antara 92,8MPa hingga 123,7MPa. Sementara itu, nilai maksimum tegangan sisa yang bersifat kompresi pada arah circumferential ini memiliki kecenderungan untuk semakin naik pada lokasi pengamatan R/5 hingga 3R/5, dengan rata-rata peningkatan berkisar antara 111,7MPa hingga 140,7MPa. Namun, pada lokasi pengamatan 4R/5, dan R, nilai maksimum tegangan sisa yang bersifat kompresi pada arah circumferential ini memiliki kecenderungan semakin menurun dengan rata-rata penurunan nilai berkisar antara 95,7MPa hingga 105MPa.

4. Perencanaan proses forging roda kereta cepat, dengan ketepatan geometri yang bagus dihasilkan dengan menggunakan ketebalan billet awal sebesar 74mm hingga 78mm, dengan diameter billet 430mm, dan gaya forging sebesar 260MN hingga 320MN.

5.2 Saran

Adapun saran dari penelitian ini, untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Perlu adanya perbandingan dari hasil simulasi *forging* roda kereta menggunakan software ANSYS *explicit dynamics* ini, dengan menggunakan *software* lainnya seperti ABAQUS, ataupun DEFORM, sebagai pembanding dari hasil yang didapatkan.
2. Perlu dilakukan modifikasi terhadap cetakan roda kereta, untuk mendapatkan hasil geometri roda kereta yang lebih sesuai, dan pengisian *billet* terhadap rongga cetakan lebih sempurna.
3. Selain menggunakan verifikasi proses, pada tingkatan yang lebih tinggi nantinya perlu juga untuk memverifikasi hasil dari simulasi yang telah dirancang dengan membandingkan dari hasil eksperimen.
4. Perlu dipertimbangkan untuk melibatkan variabel suhu, dan merancang proses pembuatan roda kereta dengan menggunakan

metode *hot forging*, baik itu menggunakan *software* ANSYS, ABAQUS, ataupun DEFORM nantinya.

5. Perlu dipelajari lebih jauh lagi dalam menggunakan preferensi ataupun metode *mesh* yang lain, untuk mendapatkan hasil yang lebih konsisten, dan juga lebih konvergen.
6. Perlu dipelajari lebih jauh lagi terkait *mesh distortion*, *erotion control*, *material failure*, untuk menentukan seberapa kemampuan material *billet* untuk menerima proses pembentukan, dan menentukan kapan material tersebut akan pecah.
7. Perlu dianalisa ketepatan hasil tegangan sisa dari simulasi, karena dalam penggunaan *explicit dynamics* pada *software* ANSYS ini memiliki kekurangan dalam membaca *transfer load* sebagai *import initial boundary condition* dari proses simulasi yang satu, kepada proses simulasi yang lain.

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

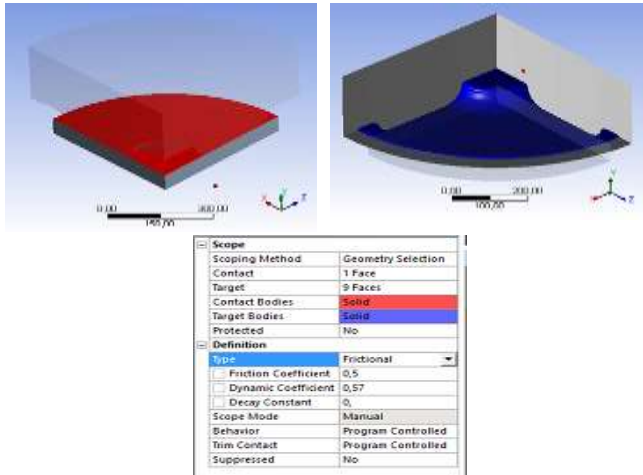
DAFTAR PUSTAKA

- Altan, T., & Ngaile, G. (2005). Cold and Hot Forging. In *ASM International*.
- Canonsburg, A. D. (2016). *ANSYS Explicit Dynamics Analysis Guide*. 15317(12-2 (64)), 724–746.
- Davey, K., Miller, B. C., & Ward, M. J. (2001). Efficient strategies for the simulation of railway wheel forming. *Journal of Material Processing Technology*, 118, 389–396.
- Gangopadhyay, T., & Ohdar, R. K. (2011). Three-dimensional finite element analysis of multi-stage hot forming of railway wheels. *Advanced Manufacturing Technology*, 301–312.
- Gordon, J., & Perlman, A. B. (1998). Estimation of residual stresses in railroad commuter car wheels following manufacture. *American Society of Mechanical Engineers, Rail Transportation Division (Publication) RTD*, 15, 13–18.
- Hibbeler, R. C. (2011). *Mechanics of Materials* (Eight Edit). Pearson Prentice Hall.
- Jing, L., Su, X., & Zhao, L. (2017). The Dynamic Compressive Behavior and Constitutive Modeling of D1 Railway Wheel Steel Over a Wide Range of Strain Rates and Temperatures. *Results in Physics*, 7, 1452–1461.
- Lima, E. A., Martins, T. S., & Santos, A. A. (2019). Effect of manufacturing residual stress on the fatigue life of railway wheels for heavy-haul transportation. *Procedia Structural Integrity*, 17, 246–253.

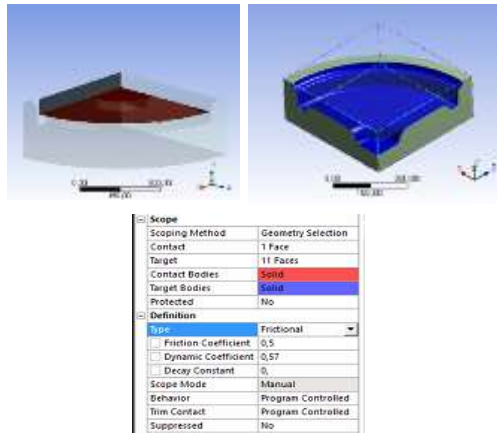
- Madency, E., & Guven, I. (2015). *The Finite Element Method and Applications in Engineering using ANSYS* (second). Springer International.
- Meyers, M. A. (1994). Shear Bands: Metallurgical Aspects. In *Dynamic Behavior of Materials*.
- Orlova, A., & Boronenko, Y. (2006). *Handbook of Railway Vehicle Dynamics*.
- Shen, X., 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*.
- Standard, E. (2018). *EUROPEAN STANDARD 13262*.
- Wang, Y., & Fang, G. (2011). Research on Hot Forging Process of C-grade Steel Train Wheel by FEM. *Advanced Materials Research*, 162, 492–497.
- Williams, J., & Fatemi, A. (2007). Fatigue performance of forged steel and ductile cast iron crankshafts. *SAE Technical Papers*, 1–32.

LAMPIRAN

1. Pengaturan Kontak pada Tahap *Pre Forming*

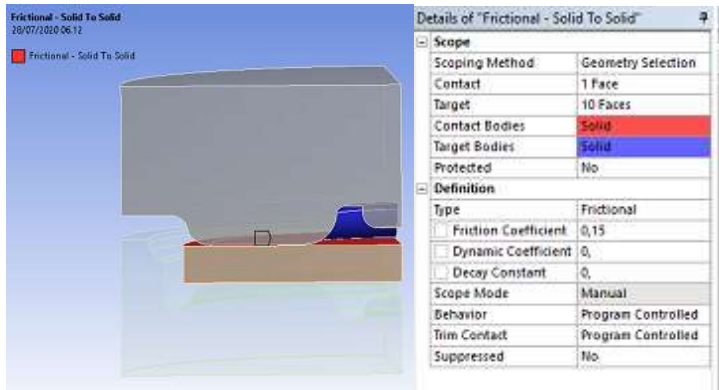


(a) Bagian Atas *Billet*

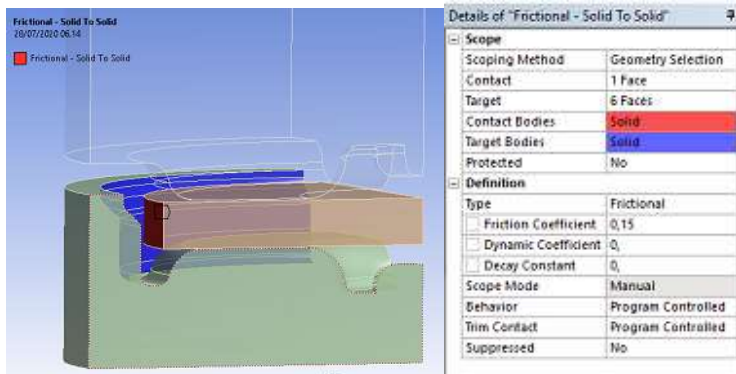


(b) Bagian Bawah *Billet*

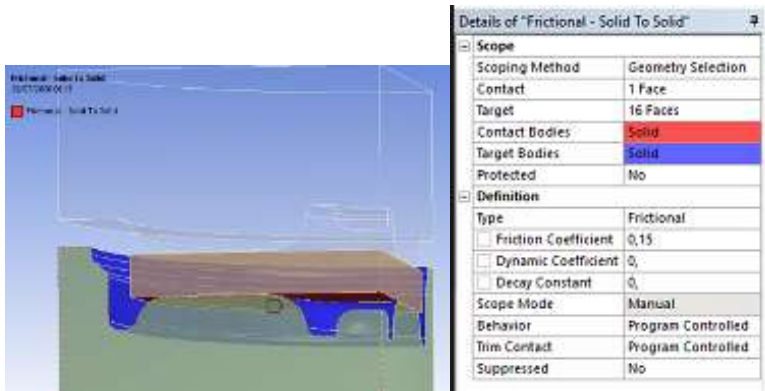
2. Pengaturan Kontak pada Tahap *Final Forging*



(a) Bagian Atas *Billet*

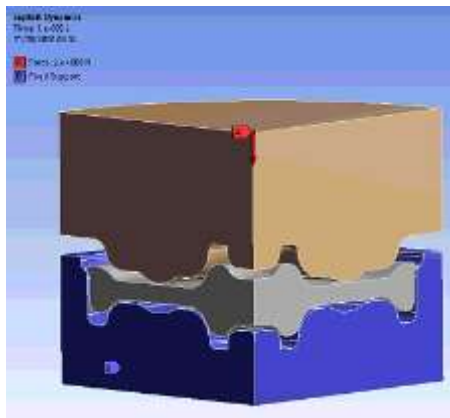


(b) Bagian Samping *Billet*



(c) Bagian Bawah *Billet*

3. Pemberian Gaya *Forging*



BIODATA PENULIS



Kafi Hannan Al Hadi dilahirkan di Jember, 03 April 1998. Riwayat pendidikan penulis diawali di SD Al-Furqan Jember pada tahun 2004-2010. Setelah itu melanjutkan pendidikan di SMP Negeri 2 Jember pada tahun 2010-2013. Kemudian melanjutkan ke SMA Negeri 1 Jember, pada tahun 2013–2016. Lalu penulis melanjutkan ke jenjang perkuliahan strata satu (S1) Departemen Teknik Mesin di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya.

Penulis aktif dalam kegiatan akademik maupun organisasi selama perkuliahan. Dalam organisasi kemahasiswaan, penulis aktif menjadi staff Divisi Kewirausahaan Lembaga Bengkel Mahasiswa Mesin (LBMM) pada tahun 2017, dan pada tahun 2018 diamanahi menjadi Ketua Divisi Kewirausahaan Lembaga Bengkel Mahasiswa Mesin (LBMM) Departemen Teknik Mesin ITS. Penulis mempunyai motto hidup “*Selesaikan apa yang harus kita selesaikan*” yang membuat penulis lebih bersemangat untuk memotivasi diri sendiri menjadi kepribadian yang lebih baik lagi. Untuk semua informasi dan masukan kritik atau saran terkait tugas akhir ini dapat menghubungi penulis melalui email kafi.hannan98@gmail.com.