

TUGAS AKHIR - TM 184835

## STUDI NUMERIK SIMULASI PROSES *FORGING* RODA KERETA BERKECEPATAN SEDANG

Dosen Pembimbing Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA

MUHAMMAD ZULFAN FARRUQI NRP 02111640000178

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



TUGAS AKHIR - TM 184835

# STUDI NUMERIK SIMULASI PROSES *FORGING* RODA KERETA BERKECEPATAN SEDANG

Dosen Pembimbing Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA

MUHAMMAD ZULFAN FARRUQI NRP 02111640000178

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



FINAL PROJECT - TM 184835

# NUMERICAL STUDY OF FORGING PROCESS SIMULATION OF MEDIUM SPEED RAILWAYWHEEL

Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA

MUHAMMAD ZULFAN FARRUQI NRP 02111640000178

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

## LEMBAR PENGESAHAN

## STUDI NUMERIK SIMULASI PROSES FORGING RODA KERETA BERKECEPATAN SEDANG

#### **TUGAS AKHIR**

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

Oleh :

Muhammad Zulfan Farruqi NRP. 02111640000178



## STUDI NUMERIK SIMULASI PROSES *FORGING* RODA KERETA BERKECEPATAN SEDANG

| Nama Mahasiswa   | : Muhammad Zulfan Farruqi         |
|------------------|-----------------------------------|
| NRP              | : 02111640000178                  |
| Departemen       | : Teknik Mesin FTIRS-ITS          |
| Dosen Pembimbing | : Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA |

#### Abstrak

Permintaan untuk proses manufaktur yang lebih efisien telah meningkat dalam beberapa tahun terakhir. Proses penempaan dingin disajikan sebagai solusi yang memungkinkan, karena memungkinkan produksi bagian dengan permukaan akhir yang baik dan dengan sifat mekanik yang baik. Namun demikian, desain urutan penempaan dingin sangat empiris dan didasarkan pada pengalaman desainer. Pemodelan komputasi dari setiap tahap proses pembentukan dengan metode elemen hingga dapat membuat desain urutan lebih cepat dan lebih efisien, mengurangi penggunaan metode "trial and error" konvensional. Dalam penelitian ini, penerapan perangkat lunak elemen hingga komersial umum - ANSYS - telah diterapkan untuk memodelkan operasi pembentukan.

Tahapan pada penelitian ini terdiri dari proses pemodelan roda kereta yang kemudian dari situ dapat dimodelkan bagian penempanya (cetakan) menggunakan software pemodelan 3D Solidworks. Proses simulasi meliputi pendifinisian material, meshing, set up, dan analisis hasil. Setelah mendapatkan analisis hasil, dibandingkan dengan perubahan ketebalan benda kerja dan beban penekanan. Untuk ketebalan awal benda kerja divariasikan dengan nilai sebesar 76 mm, 77 mm ,78 mm, 79 mm, dan 80 mm. Sedangkan untuk beban penekanan divariasikan dengan nilai sebesar 180 MN, 190 MN, 200 MN, 210 MN, dan 200 MN. Tujuan dilakukan variasi ini adalah untuk mengetahui pengaruh perubahan ketebalan awal billet dan beban penekanan pada proses forging terhadap bentuk billet dan residual stress hasil proses forging.

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan diketahui bahwa variasi ketebalan awal billet dan besar pembebanan berpengaruh terhadap bentuk billet dan residual stress hasil proses forging. Diperoleh bentuk billet hasil proses forging yang cukup memenuhi ruang cetakan dengan ketebalan awal billet 79 mm dan 80 mm yang diberi pembebanan terbesar dalam variasi yaitu 220 MN (22500 tonf). Namun dengan ketebalan awal billet 79 mm masih ada kekurangan pengisian pada bagian hub. Dengan ketebalan awal billet 80 mm, billet sudah mengisi bagian rim dan bagian hub, namun bagian web justru terjadi kekurangan pengisian.

Residual stress yang timbul pada roda kereta hasil forging dengan ketebalan awal billet 79 mm bersifat kompresi dan ini menguntungkan pada roda kereta. Walaupun pada bagian hub residual stress kompresifnya tergolong rendah sebesar yaitu -71,857 MPa. Hal ini juga terjadi pada roda kereta hasil forging dengan ketebalan awal billet 80 mm, namun pada bagian web residual stress kompresifnya tergolong rendah yaitu sebesar -11,52 MPa.

Kata Kunci : Elemen Hingga, Forging, Roda Kereta, Semi Cepat

## NUMERICAL STUDY OF FORGING PROCESS SIMULATION OF MEDIUM SPEED RAILWAY WHEEL

| Student Name | : Muhammad Zulfan Farruqi           |
|--------------|-------------------------------------|
| Student ID   | : 02111640000178                    |
| Department   | : Mechanical Engineering FTIRS- ITS |
| Advisor      | : Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA   |

#### Abstract

The demand for more efficient manufacturing processes has increased in recent years. The cold forging process is presented as a possible solution, because it allows the production of parts with good surface finish and with good mechanical properties. Nevertheless, the design of cold forging sequences is very empirical and is based on the experience of the designer. Computational modeling of each stage of the formation process by the finite element method can make the design of sequences faster and more efficient, reducing the use of conventional "trial and error" methods. In this research, the application of general commercial finite element software - ANSYS - has been applied to model forming operations.

The stages in this study consisted of the process of modeling the train wheels, which from there could be modeled the forging parts (molds) using 3D Solidworks modeling software. The simulation process includes material definition, meshing, set up, and analysis of results. After getting an analysis of the results, it is compared with changes in workpiece thickness and stress load. For the initial thickness of the workpiece varied with values of 76 mm, 77 mm, 78 mm, 79 mm, and 80 mm. As for the stress load varied with values of 180 MN, 190 MN, 200 MN, 210 MN, and 200 MN. The purpose of this variation is to determine the effect of changes in the initial thickness of the billet and the burden of emphasis on the forging process on the shape of the billets and residual stress resulting from the forging process.

Based on the results of research that has been done, it is known that variations in the initial thickness of the billet and the size of the loading affect the shape of the billet and the residual stress resulting from the forging process. Obtained the form of a billet as a result of the forging process that is sufficient to fill the mold space with an initial billet thickness of 79 mm and 80 mm which is given the largest loading in variations, namely 220 MN (22500 tonf). However, with the initial thickness of the 79 mm billet there is still a lack of filling in the hub. With the initial thickness of 80 mm billets, billets have filled the rim and hub parts, but the web part has a lack of filling.

The residual stress that arises on the forged wheels with an initial billet thickness of 79 mm is compressive and is advantageous for the wheels of the train. Although in the hub section the compressive stress residual is low, namely -71,857 MPa. This also happened to the forged wheels with an initial billet thickness of 80 mm, but on the web the compressive stress residual was low, namely -11.52 MPa.

Keyword : Finite Element, Forging, Railway Wheel, Medium Speed

## 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 yang selalu memberikan semangat sehingga penulis dapat menyelesaikan perkuliahan dengan baik.
- 3. Bapak Ir. Dr. Agus Sigit Pramono, DEA. selaku dosen pembimbing tugas akhir ini, terima kasih atas motivasi, dukungan dan membimbing dengan sangat sabar sehingga penulis bisa menyelesaikan tugas akhir ini.
- 4. Bapak Alief Wikarta, ST., M.Sc.Eng., Ph.D; Achmad Syaifuddin, S.T., M.Eng., Ph.D; dan Ir. Yusuf Kaelani, M.Sc. selaku dosen penguji, terima kasih atas segala saran dan bimbingannya selama ini.
- 5. Pak Ary Bachtiar Krishna Putra, ST., MT., Ph.D. yang berusaha membimbing penulis selaku mahasiswa anak perwaliannya dalam perwalian dari awal hingga saat ini
- Angkatan B-nalz menjadi kawan kawan yang membantu baik suka atau duka bagi penulis dengan sabar mengajari dan menjadi teman belajar otomotif atau organisasi bagi penulis.
- 7. Mas-mas, mbak-mbak, dan adek-adek LBMM yang telah yang telah mengajarkan/berbagi ilmu otomotif atau organisasi dan khusus nya DIVISI Roda Dua yang memberi wejangan dan kepercayaan untuk menjadi lebih baik bagi penulis.

- 8. Arek-arek kontrakan barokah Alvit, Goblin, On, Bodat, Tera, Seloso, Telo, Iqra, dan Beler yang selalu membantu penulis dalam belajar selama 4 tahun duduk di bangku kuliah.
- Partner Tugas Akhir Kafi Hanan al-Hadi dan Roze Windu yang telah membantu, menyemangati, dan mengoreksi penulis untuk bisa menggarap Tugas Akhir ini menjadi lebih baik lagi.
- 10. Teman teman M59 yang telah menemani masa perkuliahan penulis.
- 11. Laily Dwi Nur Syahfitri yang selalu setia menemani penulis di kala bosan, pusing, dan penat dalam menyusun penelitian ini.
- 12. Seluruh bapak karyawan dan staff Departemen Teknik mesin yang membantu penulis dalam menjalani kegiatan-kegiatan perkuliahan dan organisasi.
- 13. Dan semua pihak yang turut membantu, tetapi tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

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, Agustus 2020

Penulis

| ABSTRAK   | i                      |
|---|------------------------|
| KATA PENGATAR   | v                      |
| DAFTAR ISI  | vii                    |
| DAFTAR GAMBAR   | xi                     |
| DAFTAR GRAFIK   | xvii                   |
| DAFTAR TABEL  | xix                    |
| BAB 1 PENDAHULUAN   | 1                      |
| 1.1 Latar Belakang  | 1                      |
| 1.2 Perumusan Masalah   | 3                      |
| 1.3 Batasan Masalah   | 3                      |
| 1.4 Tujuan Penelitian   | 4                      |
| 1.5 Manfaat Penelitian  | 4                      |
| BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA  | 5                      |
| 2.1 Terminologi dan Fungsi Pokok Running Ge   | <i>ear</i> pada Kereta |
|   |                        |
|   | 5                      |
|   | 5                      |
| 2.2 <i>Bogie</i><br>2.2.1 Wheelset  | 5<br>6<br>7            |
| 2.2 Bogie<br>2.2.1 Wheelset<br>2.2.2 Wheels   | 5<br>6<br>7<br>11      |
| <ul> <li>2.2 Bogie</li> <li>2.2.1 Wheelset</li> <li>2.2.2 Wheels</li> <li>2.3 Material Roda Kereta</li> </ul>   | 5<br>                  |
| <ul> <li>2.2 Bogie</li> <li>2.2.1 Wheelset</li> <li>2.2.2 Wheels</li> <li>2.3 Material Roda Kereta</li> <li>2.4 Forging</li> </ul>  | 5<br>                  |
| <ul> <li>2.2 Bogie</li> <li>2.2.1 Wheelset</li> <li>2.2.2 Wheels</li> <li>2.3 Material Roda Kereta</li> <li>2.4 Forging</li> <li>2.5 Cold Forging</li> </ul>  |                        |
| <ul> <li>2.2 Bogie</li> <li>2.2.1 Wheelset</li> <li>2.2.2 Wheels</li> <li>2.3 Material Roda Kereta</li> <li>2.4 Forging</li> <li>2.5 Cold Forging</li> <li>2.6 Hot Forging</li> </ul>   |                        |
| <ul> <li>2.2 Bogie</li> <li>2.2.1 Wheelset</li> <li>2.2.2 Wheels</li> <li>2.3 Material Roda Kereta</li> <li>2.4 Forging</li> <li>2.5 Cold Forging</li> <li>2.6 Hot Forging</li> <li>2.7 Forging Vs Casting</li> </ul>   |                        |
| <ul> <li>2.2 Bogie</li> <li>2.2.1 Wheelset</li> <li>2.2.2 Wheels</li> <li>2.3 Material Roda Kereta</li> <li>2.4 Forging</li> <li>2.5 Cold Forging</li> <li>2.6 Hot Forging</li> <li>2.7 Forging Vs Casting</li> <li>2.8 Hydraulic Presses</li> </ul>  |                        |
| <ul> <li>2.2 Bogie</li> <li>2.2.1 Wheelset</li> <li>2.2.2 Wheels</li> <li>2.3 Material Roda Kereta</li> <li>2.4 Forging</li> <li>2.5 Cold Forging</li> <li>2.6 Hot Forging</li> <li>2.7 Forging Vs Casting</li> <li>2.8 Hydraulic Presses</li> <li>2.8.1 Kapasitas Mesin Hydraulic Presses</li> </ul> |                        |

| 2.9.1 Konsep Tegangan22                            | 2  |
|--|----|
| 2.9.2 Konsep Regangan24                            | 1  |
| 2.9.3 Perilaku Tegangan Regangan24                 | 1  |
| 2.10 Residual Stress                               | 5  |
| 2.11 Deformasi Plastis pada Laju Regangan Tinggi28 | 3  |
| 2.12 Rumus Empiris                                 | )  |
| 2.13 Strain Rate                                   | 3  |
| 2.14 Respon Mekanik Laju Regangan Tinggi34         | 1  |
| 2.15 Metode Elemen Hingga                          | 7  |
| 2.15.1 Prosedur Metode Elemen Hingga40             | )  |
| 2.15.2 Verifikasi Metode Elemen Hingga41           | L  |
| 2.15.3 Validasi Metode Elemen Hingga42             | 2  |
| 2.15.4 Software Berbasis Metode Elemen Hingga42    | 2  |
| 2.15.5 Explicit Dynamic ANSYS42                    | 2  |
| 2.15.6 Aplikasi Metode Elemen Hingga47             | 7  |
| 2.16 Penelitian Terdahulu49                        | )  |
| BAB 3 METODE PENELITIAN                            | 65 |
| 3.1 <i>Flowchart</i> Penelitian                    | 5  |
| 3.2 Observasi                                      | 7  |
| 3.3 Rumusan Masalah67                              | 7  |
| 3.4 Studi Literatur67                              | 7  |
| 3.5 Pemodelan                                      | 3  |
| 3.5.1 Penentuan Data Awal71                        | l  |
| 3.5.2 Proses Desain                                | 5  |

| 3.5.3 Simulasi80   |  |
|--|--|
| 3.5.4 Analisis hasil   |  |
| 3.6 Verifikasi Pemodelan Johnson-Cook90                            |  |
| BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN   |  |
| 4.1.1 Dimensi Roda Hasil Forging                                   |  |
| 4.2 Path   |  |
| 4.3 Residual Stress arah Axial, Circumferential, dan Radial104     |  |
| 4.4 Residual Stress pada Hub106                                    |  |
| 4.4.1 Analisis Residual Stress Arah Axial pada Hub106              |  |
| 4.4.2 Analisis Residual Stress Arah Circumferential pada<br>Hub109 |  |
| 4.4.3 Analisis Residual Stress Arah Radial pada Hub.111            |  |
| 4.5 Residual Stress pada Web114                                    |  |
| 4.5.1 Analisis Residual Stress Arah Axial pada Web114              |  |
| 4.5.2 Analisis Residual Stress Arah Circumferential pada<br>Web117 |  |
| 4.5.3 Analisis Residual Stress Arah Radial pada Web .120           |  |
| 4.6 Residual Stress pada Rim123                                    |  |
| 4.6.1 Analisis Residual Stress Arah Axial pada Rim 123             |  |
| 4.6.2 Analisis Residual Stress Arah Circumferential pada<br>Rim126 |  |
| 4.6.3 Analisis Residual Stress Arah Radial pada Rim.129            |  |
| 4.7 Distribusi Residual Stress pada Roda Hasil Proses Forging      |  |

| 4.7.1 Distribusi Residual Stress Arah Axial    | 132                 |
|--|---------------------|
| 4.7.2 Distribusi Residual Stress Arah Circumfe | erential.134        |
| 4.7.3 Distribusi Residual Stress Arah Radial   | 136                 |
| 4.8 Superposisi Tegangan Normal Preform dan F  | inal Forging<br>138 |
| BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN                     |                     |
| 5.1 Kesimpulan                                 | 1/1                 |
|  |                     |
| 5.2 Saran                                      | 141                 |
| 5.2 Saran<br>DAFTAR PUSTAKA                    | 141<br>141          |

## DAFTAR GAMBAR

| Gambar 2. 1 Tipe utama desain <i>wheelset</i> : a) dengan <i>external</i> dan       |
|---|
| <i>internal journal</i> ; b) dengan <i>disc brake</i> pada <i>axle</i> dan roda; c) |
| dengan gear posisi simetrik dan asimetrik (1, axle; 2, roda; 3,                     |
| journal; 4, disc brake; 5, tooth gear). (Orlova & Boronenko,                        |
| 2006)   |
| Gambar 2. 2 Elemen utama pada profil roda8  |
| Gambar 2. 3 Profil roda: a) Kereta Kargo dan penumpang                              |
| (Russia); b) Kereta cepat (Russia); c) Rolling Stock industri                       |
| (Russia); d) kereta kargo dan penumpang (eropa); (e,f) Kereta                       |
| Cepat (Jepang). (Orlova & Boronenko, 2006)9   |
| Gambar 2. 4 Aus pada <i>tread</i> dan <i>flange</i> 10                              |
| Gambar 2. 5 Titik kontak antara Roda dan Rel11                                      |
| Gambar 2. 6 Tipe utama roda kereta12  |
| Gambar 2. 7 Komponen utama penekan hidrolik untuk                                   |
| penempaan dies tertutup19   |
| Gambar 2. 8 80.000 ton hydraulic press forge (the wall street                       |
| <i>journal</i> )21  |
| Gambar 2. 9 800 MN heavy duty forging press (sinomach.com)                          |
| 21  |
| Gambar 2. 10 (a) Ilustrasi gaya yang bekerja pada suatu struktur                    |
| (b) Ilustrasi orientasi sumbu masing-masing tegangan (Hibbeler,                     |
| 2011)23   |
| Gambar 2. 11 Kurva Tegangan-Regangan dengan Efek                                    |
| Penghilangan Beban (Chakrabarty, 2006)25  |
| Gambar 2. 12 Perkiraan tegangan sisa di roda komuter: (a) setelah                   |
| proses manufaktur dan (b) setelah operasional disimulasikan.                        |
| Level kontur dalam megapascal, MPa (6,895 MPa = 1 ksi)28                            |
| Gambar 2. 13 Tegangan luluh terhadap laju regangan geser untuk                      |
| baja ringan29   |

Gambar 2. 14 Pengaruh temperatur dan tingkat regangan pada tegangan luluh besi. (Vohringer, Gbr. 31, hal. 44); (b) Aliran tegangan vs suhu yang ditentukan secara eksperimental dan kalkulasi (menggunakan persamaan Johnson-Cook yang dimodifikasi) untuk tembaga hard-shock (Andrade, Meyers, dan Chokshi, Scripta Met. et Mat. 30 (1994) 933)......31 Gambar 2. 16 Klasifikasi skematis dari teknik pengujian menurut tingkat regangan (Meyers, 1994a)......35 Gambar 2. 17 Pengaruh laju regangan pada respons teganganregangan (dalam kompresi) dari (a) aluminium 7075-T6 dan (b) paduan Ti-6% Al-4% V (M. A. Meyers, G. Subhash, B. Khad, and L. Prasad, Mechanics of Materials, 11 (1994) 175.)......36 Gambar 2. 18 (A) Pengaruh laju regangan pada respons teganganregangan (dalam kompresi) dari titanium murni komersial. (MA Meyers, G. Subhash, B. Khad, dan L. Prasad, Mekanika Bahan, 11 (1994) 175). (B) Efek pada tantalum (dari YG Chen, MA Gambar 2. 19 Klasifikasi metode yang umum digunakan (Hutton, Gambar 2. 20 (a) domain dua dimensi umum pada permasalahan nilai batas  $\phi(x,y)$  (b) tiga titik elemen hingga yang didefinisikan di dalam domain (c) elemen-elemen tambahan yang menunjukkan sebuah bagian dari mesh elemen hingga pada domain......40 Gambar 2. 21 (a) *meshing* domain batas melengkung yang dimodelkan dengan elemen-elemen kotak yang berjumlah 41 elemen (b) fine meshing domain batas melengkung yang dimodelkan dengan elemen-elemen kotak yang berjumlah 192 elemen (Hutton, 2004)......40 Gambar 2. 22 Diagram Alir penggunaan metode elemen hingga dalam kasus penempaan ......48 Gambar 2. 23 Proses panas pembentukan roda......50

| Gambar 2. 24 Proses <i>pre-forming</i> roda kereta50                   |
|--|
| Gambar 2. 25 Proses <i>pre-forming</i> roda kereta tampak isometri50   |
| Gambar 2. 26 Skema proses <i>final forging</i> 51                      |
| Gambar 2. 27 Perbandingan hasil <i>final forging</i> dengan nilai H    |
| yang berbeda51   |
| Gambar 2. 28 Pengaruh kecepatan terhadap beban penekanan52             |
| Gambar 2. 29 FE mesh proses pre forming53                              |
| Gambar 2. 30 Axial compressive stress pada rasio radius yang           |
| berbeda pada proses <i>preforming</i> 54                               |
| Gambar 2. 31 <i>Press load</i> saat proses <i>preforming</i> 54        |
| Gambar 2. 32 Mesh hasil forging55                                      |
| Gambar 2. 33 Effective stress pada 7 titik rasio radius saat proses    |
| forging dari tebal 125 mm55  |
| Gambar 2. 34 Profil dan dimensi benda kerja dan rangkaian die          |
| dalam operasi <i>multistage</i> roda HESA57                            |
| Gambar 2. 35. Posisi dan ukuran pin yang ditanam pada <i>billet</i> 57 |
| Gambar 2. 36. Pin yang terdeformasi pada roda kereta hasil             |
| eksperimen (a) dan simulasi (b)59                                      |
| Gambar 2. 37 <i>Gridline</i> pada tahap penempaan roda yang berbeda    |
| Gambar 2. 38 Peralatan pendinginan roda61                              |
| Gambar 2. 39 Tegangan sisa radial pada rim setelah proses              |
| pendinginan tapak  |
| Gambar 2. 40 Tegangan tekan dan tarik maksimum roda kereta di          |
| arah aksial62  |
| Gambar 2. 41 Tegangan tekan dan tarik maksimum roda kereta             |
| dalam arah radial63  |
| Gambar 2. 42 Tegangan radial dan aksial roda kereta setelah            |
| pendinginan64  |
| Gambar 3. 1 <i>Flowchart</i> Penelitian66                              |
| Gambar 3. 2 Bagan Metode Penelitian67                                  |
|  |

| Gambar 3. 3 <i>Flowchart</i> pemodelan70                                  |
|---|
| Gambar 3. 4 Geometri potongan menyilang roda kereta dengan                |
| diameter 920 mm73   |
| Gambar 3. 5 Halaman kerja baru pada <i>Solidworks</i>                     |
| Gambar 3. 6 <i>Sketch</i> roda77  |
| Gambar 3. 7 Sketsa roda kereta77  |
| Gambar 3. 8 Pemodelan 3D roda kereta77                                    |
| Gambar 3. 9 Pemodelan 3D penampang menyilang roda kereta78                |
| Gambar 3. 10 Sketch cetakan roda78  |
| Gambar 3. 11 <i>Dies final forging</i> 79                                 |
| Gambar 3. 12 Dies pre-forming (a) sketch (b) solid model79                |
| Gambar 3. 13 Penentuan engineering data (a) Dies (b) Billet81             |
| Gambar 3. 14 Import geometri ke dalam ANSYS Design                        |
| Modeller82  |
| Gambar 3. 15 Desain <i>billet full</i> 82                                 |
| Gambar 3. 16 Model Symmetri82   |
| Gambar 3. 17 <i>Symmetric region</i> bidang XY83                          |
| Gambar 3. 18 <i>Symmetric region</i> bidang ZY83                          |
| Gambar 3. 19 Penentuan jenis kontak                                       |
| Gambar 3. 20 Penentuan letak pembebanan85                                 |
| Gambar 3. 21 Penentuan letak tumpuan                                      |
| Gambar 3. 22 Uji konvergen  |
| Gambar 3. 23 <i>Meshing</i> pada simulasi88                               |
| Gambar 3. 24 <i>Workflow</i> proses ekspor hasil simulasi                 |
| Gambar 3. 25 Hasil simulasi90   |
| Gambar 3. 26 Pengamatan verifikasi pemodelan Johnson-Cook                 |
| Gambar 4. 1 Skema proses a) <i>Pre-forming</i> b) <i>Final forging</i> 95 |
| Gambar 4. 2 Forging billet ketebalan awal 76 mm (a) dan 80 mm             |
| (b) dengan beban maksimum 220 MN96  |
|   |

| Gambar 4. 3 Forging billet ketebalan awal 79 mm dengan beban       |
|--|
| 180 MN (a) dan 220 MN (b)98  |
| Gambar 4. 4 Pengukuran ketebalan hasil simulasi pada a) Hub, b     |
| <i>Web</i> , c) <i>Rim</i> 101                                     |
| Gambar 4. 5 Pembuatan path/gridline pada geometri                  |
| Gambar 4. 6 <i>Cylindrical coordinate</i> 105                      |
| Gambar 4. 7 Distribusi axial residual stress pada roda kereta hasi |
| proses forging dengan ketebalan awal billet 79 mm132               |
| Gambar 4. 8 Distribusi axial residual stress pada roda kereta hasi |
| proses forging dengan ketebalan awal billet 80 mm133               |
| Gambar 4. 9 Distribusi circumferential residual stress pada roda   |
| kereta hasil proses forging dengan ketebalan awal billet 79 mm     |
|  |
| Gambar 4. 10 Distribusi circumferential residual stress pada roda  |
| kereta hasil proses forging dengan ketebalan awal billet 80 mm     |
|  |
| Gambar 4. 11 Distribusi radial residual stress pada roda kereta    |
| hasil proses forging dengan ketebalan awal billet 79 mm136         |
| Gambar 4. 12 Distribusi radial residual stress pada roda kereta    |
| hasil proses forging dengan ketebalan awal billet 80 mm137         |
| Gambar 4. 13 Node stage pre-forming sebelum dan sesudah            |
| simulasi139  |
| Gambar 4. 14 Node stage final-forging sebelum dan sesudah          |
| simulasi   |

Halaman ini sengaja dikosongkan

## **DAFTAR GRAFIK**

| Grafik 4. 1 Perbandingan axial residual stress pada hub dengan    |
|---|
| variasi pembebanan  |
| Grafik 4. 2 Perbandingan circumferential residual stress pada hub |
| dengan variasi pembebanan109                                      |
| Grafik 4. 3 Perbandingan radial residual stress pada hub dengan   |
| variasi pembebanan111   |
| Grafik 4. 4 Perbandingan axial residual stress pada web dengan    |
| variasi pembebanan114   |
| Grafik 4. 5 Perbandingan circumferential residual stress pada web |
| dengan variasi pembebanan117                                      |
| Grafik 4. 6 Perbandingan radial residual stress pada web dengan   |
| variasi pembebanan120   |
| Grafik 4. 7 Perbandingan axial residual stress pada rim dengan    |
| variasi pembebanan123   |
| Grafik 4. 8 Perbandingan circumferential residual stress pada rim |
| dengan variasi pembebanan126                                      |
| Grafik 4. 9 Perbandingan radial residual stress pada rim dengan   |
| variasi pembebanan129   |

Halaman ini sengaja dikosongkan

## DAFTAR TABEL

| Tabel 2. 1 Persyaratan Kimia    13   |
|--|
| Tabel 2. 2 Konstanta konstitutif untuk berbagai material ( $\dot{\epsilon} = 1 \text{ s}^{-1}$ ) |
|  |
| Tabel 2. 3 Parameter untuk simulasi proses forging roda kereta58                                 |
| Tabel 2. 4. Posisi pin baja setelah eksperimen dan simulasi59                                    |
| Tabel 2. 5 Fase perlakuan panas61  |
| Tabel 3. 1 Parameter Johnson and Cook dan Mie Gruneisen  |
| Equation of State material billet AISI 1045 steel (Duan et al.,                                  |
| 2010)  |
| Tabel 3. 2 AISI H13 Material properties for dies    74   |
| Tabel 3. 3 Reduksi ketebalan <i>billet</i> beberapa literatur                                    |
| Tabel 3. 4 Variasi ketebalan awal billet75   |
| Tabel 3. 5 Pembebanan pre-forming  |
| Tabel 3. 6 Pembebanan final forging    75  |
| Tabel 3. 7 Parameter untuk simulasi <i>forging</i> roda kereta api                               |
| (variasi)76  |
| Tabel 3. 8 Uji konvergen87   |
| Tabel 3. 9 Data perubahan tegangan dan regangan hasil simulasi                                   |
|  |
| Tabel 4. 1 Pengukuran ketebalan roda hasil forging dengan  |
| pembebanan forging 220 MN101   |
| Tabel 4. 2 Ketebalan cetakan roda dan hasil simulasi dengan                                      |
| ketebalan awal 80 mm102  |

Halaman ini sengaja dikosongkan

## BAB 1 PENDAHULUAN

#### 1.1 Latar Belakang

Transportasi menjadi kebutuhan yang sangat penting dalam kehidupan saat ini. Dengan transportasi, semakin mudahnya mobilisasi dalam berbagai macam aktivitas sehingga memangkas waktu dan biaya, memudahkan pengiriman barang, dan masih banyak lagi manfaatnya. Sehingga dengan kehadirannya dapat meningkatkan pertumbuhan dan perkembangan pada suatu daerah. Demi keamanan dan kenyamanan penggunanya, transportasi ini seharusnya didukung dengan teknologi yang menyokong keandalan dan daya tahan transportasi itu sendiri. Salah satu transportasi yang berpengaruh besar dalam pertumbuhan ekonomi di Indonesia yaitu kereta.

Kereta adalah jenis transportasi yang menggunakan rel sebagai pemandu jalannya. Karena menggunakan rel ini, bentuk roda kereta pun tidak sama dengan kendaraan beroda lain. Modifikasi mesin kereta api terus berkembang, dari yang hanya menggunakan mesin uap, lalu mesin diesel, listrik, hingga yang paling canggih yaitu dengan magnet. Salah satu tujuan perkembangan dan inovasi pada kereta api ini adalah untuk mengurangi waktu tempuh kereta, agar jarak jauh pun dapat ditempuh hanya dengan waktu yang singkat. Hingga saat ini, kereta dapat dibagi dalam tingkat kecepatan lambat, sedang, dan cepat.

Indonesia bekerja sama dengan Jepang, saat ini sedang melakukan studi pembangunan kereta berkecepatan sedang, dengan kecepatan operasional maksimum 160 Km/jam yang menghubungkan Jakarta dan Surabaya dimana jaraknya sekitar 700 Km, sehingga dengan adanya kereta berkecepatan sedang ini, perjalanan dari Jakarta ke Surabaya dapat ditempuh selama 5,5 jam. Selain itu, pembangunan rel untuk kereta cepat Jakarta – Bandung tengah dilakukan, dimana kecepatan operasionalnya hingga 300 Km/jam. Hal ini menjadi bukti bahwa pemerintah

cukup serius dalam meningkatkan pembangunan pada sektor per*hub*ungan dan transportasi di Indonesia. Namun, hingga saat ini, Indonesia masih belum memproduksi sendiri salah satu komponen paling penting dari kereta, yakni roda. Indonesia masih mengimpor roda kereta dari Tiongkok dan Eropa, padahal pemakaiannya yang cukup besar ditambah adanya transportasi kereta rel listrik (KRL), *light rail transit* (LRT), dan *mass rapid transit* (MRT) yang sedang berkembang saat ini.

Pembuatan roda kereta yang paling umum digunakan adalah dengan metode casting dan forging. Casting adalah metode pengecoran logam dimana bahan logam dicairkan melalui proses pemanasan, kemudian dituang pada cetakan. Lalu logam cair ini didiamkan hingga terjadi solidifikasi dan terbentuklah roda kereta. Sedangkan metode forging atau penempaan adalah proses deformasi dimana benda kerja/billet diletakkan diantara 2 cetakan yang disebut *dies*, penekanan dapat dilakukan dengan tekanan kejut atau perlahan. Proses penekanan ini akan menghasilkan bentuk benda kerja yang sesuai dengan profil bentuk dari dies. Properties material yang dihasilkan dengan metode forging memiliki nilai kekuatan dan ketangguhan yang lebih tinggi dimana sangat cocok untuk material roda kereta yang pada kondisi operasionalnya selalu dibebani dan butuh properties material yang baik. Maka dari itu banyak industri manufaktur roda kereta api yang telah meninggalkan metode *casting* ini. Dalam penelitian ini akan dilakukan simulasi proses forging pembentukan roda kereta berkecepatan sedang.

Hasil dari simulasi *forging* roda kereta ini diharapkan dapat memberikan informasi mengenai kekuatan minimum mesin *forging* yang dapat membentuk roda kereta berkecepatan medium. Selain itu, penelitian ini dapat menjadi pedoman atau sumber referensi bagi industri-industri di Indonesia dalam membeli alat penempa yang mampu membentuk roda kereta dengan kekuatan tertentu. Dengan adanya variasi ketebalan roda kereta dan kecepatan pembebanan, diharapkan dapat menjadi pilihan untuk industri-industri dalam memilih metode pembuatan roda kereta api.

## 1.2 Perumusan Masalah

Dari uraian masalah yang terjadi yaitu tentang proses pembuatan roda kereta berkecepatan sedang, maka dapat disusun perumusan masalah yaitu:

Bagaimana pengaruh ketebalan awal *billet* dan beban penekanan *upper die* terhadap proses *forging* roda kereta berdasarkan analisis bentuk *billet* dan *residual stress* hasil proses forging ?

#### 1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah :

- 1. Penelitian ini hanya meliputi analisis dengan menggunakan metode elemen hingga, dengan prosedur sesuai dengan standarisasi.
- 2. Material bersifat homogen dan isotrop.
- 3. Dimensi geometri roda kereta yang akan dibentuk disesuaikan dengan profil dimensi roda kereta tipe S1002 yang dipakai dalam sistem roda kereta Iran.
- 4. Material untuk *billet* yang dimodelkan adalah baja AISI 1045 dan untuk dies AISI H13.
- 5. Analisis tidak memasukkan efek dari perpindahan panas.
- 6. Analisis yang dilakukan hanya meninjau pada *billet* atau benda kerja yang akan dibentuk.
- 7. Kedua dies dianggap sebagai body yang rigid.
- 8. Variasi ketebalan *billet* awal : 76 mm, 77 mm, 78 mm, 79 mm, dan 80 mm.
- Variasi beban penekanan : 180 MN, 190 MN, 200 MN, 210 MN dan 220 MN.

## 1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah :

Mengetahui pengaruh ketebalan *billet* dan beban penekanan *upper die* terhadap proses *forging* roda kereta berdasarkan analisis bentuk *billet* dan *residual stress* hasil proses *forging*.

## **1.5 Manfaat Penelitian**

Manfaat dari tugas akhir ini adalah:

- 1. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menambah referensi tentang analisa forging roda kereta api.
- 2. Sebagai media penelitian dan pengembangan ilmu pengetahuan khususnya bidang manufaktur roda kereta api.
- 3. Meningkatkan kemampuan mahasiswa dalam penggunaan *software*.

## BAB 2

## TINJAUAN PUSTAKA

# 2.1 Terminologi dan Fungsi Pokok *Running Gear* pada Kereta

Perbedaan utama antara kereta api dan jenis transportasi roda lainnya adalah panduan yang disediakan oleh lintasan atau rel. Permukaan rel tidak hanya menyokong roda, tetapi juga mengarahkannya dalam arah lateral. Rel dan *switches* mengubah arah putaran roda dan dengan demikian menentukan arah perjalanan kendaraan kereta api.

Secara terminologi, istilah *running gear* mengacu pada komponen – komponen kendaraan kereta api yang berjalan secara pasif di atas rel. *Running gear* adalah sistem yang memberikan gerak aman kendaraan di sepanjang jalur kereta api. *Running gear* berupa komponen seperti *wheelset* dengan *axlebox*, suspensi elastis, rem, penggerak traksi, dan perangkat untuk mentransmisikan daya tarik dan pengereman ke bodi kereta. (Orlova & Boronenko, 2006)

Fungsi utamanya adalah:

- Transmisi dan pemerataan beban vertikal dari roda kendaraan ke rel;
- Pengarah kendaraan di sepanjang lintasan;
- Kontrol gaya dinamis;
- Peredam yang efisien dari osilasi yang berlebih;
- Penerap gaya traksi dan pengereman.

Berdasarkan pada rangkaian *running gear* nya, kereta dapat dilihat sebagai kereta yang ber*bogie* atau tidak. Pada kendaraan tanpa *bogie*, suspensi, rem, dan komponen traksi dipasang pada rangka bodi kereta. Gaya traksi dan pengereman ditransmisikan melalui batang traksi atau pemandu *axlebox* (terkadang dikenal sebagai "pemandu klakson"). Kendaraan konvensional dua-poros

akan menghasilkan gaya yang lebih besar dalam kurva atau tikungan yang tajam dibandingkan kereta ber*bogie*, oleh karena itu panjangnya terbatas.

*Running gear* yang dipasang pada kerangka terpisah yang dapat berputar relatif terhadap bodi kendaraan dikenal sebagai bogie (atau truk). Jumlah roda yang mereka satukan mengklasifikasikan bogies. Jenis yang paling umum adalah bogie dua poros, tetapi bogie tiga dan empat juga sering ditemukan, sering pada lokomotif. (Orlova & Boronenko, 2006)

#### 2.2 Bogie

*Bogie* adalah suatu konstruksi yang terdiri dari dua perangkat roda atau lebih yang digabungkan oleh rangka yang dilengkapi dengan sistem pemegasan, pengereman, dengan atau tanpa peralatan penggerak dan anti selip, serta keseluruhan berfungsi sebagai pendukung rangka dasar dari badan kereta.

Fungsi utama *bogie* adalah menghasilkan fleksibilitas kereta terhadap rel sehingga roda dapat tetap mengkuti arah rel saat melewati tikungan ("*curve*"). Saat kereta melewati rel yang membelok atau menikung, maka akan terjadi sudut antara garis lurus badan kereta dengan rel. Pada keadaan ini, akan terjadi kontak antara flens dengan rel pada salah satu sisi rodanya. Pada kereta tanpa *bogie* maka sudut ini terbatas karena roda akan selalu segaris dengan badan kereta sehingga saat flens sudah tidak bisa menahan rel, maka roda akan naik ke atas rel dan akhirnya terjadi derailment atau anjlok. Dengan adanya *bogie*, maka roda tidak segaris dengan badan kereta melainkan mempunyai sudut tertentu yang memungkinkan roda bisa membelok mengikuti rel tanpa terjadi anjlok atau roda yang naik ke atas rel.

Selain fleksibilitas, *bogie* juga dapat meredam efek yang diakibatkan oleh rel yang bergelombang naik turun. Titik tengah *bogie* yang disebut "*Center Pivot*" akan membagi defleksi yang terjadi diantara 2 rodanya. Hal ini akan menyebabkan kereta lebih

stabil walau rel tidak rata / bergelombang naik turun. (*Mengenal Istilah Bogie pada Kereta Api (Bag.1)*, n.d.)

## 2.2.1 Wheelset

*Wheelset* terdiri dari dua roda yang di*hub*ungkan secara kaku oleh gandar. *Wheelset* di *support* oleh *bearing* yang terpasang pada *axle journal*.

Wheelset pada kereta memberikan :

- Jarak yang diperlukan antara kendaraan dan lintasan;
- Panduan yang menentukan gerakan pada rel;
- Cara mentransmisikan traksi dan gaya pengereman ke rel untuk mempercepat dan melambatkan kendaraan;

Desain Wheelset bergantung pada:

- Jenis kendaraan (traksi atau trailing);
- Jenis sistem pengereman yang digunakan (rem drum, rem cakram pada poros, atau rem cakram pada roda) ;
- Konstruksi pusat roda dan posisi bantalan pada poros (di dalam atau di luar);
- Keinginan untuk membatasi frekuensi yang lebih tinggi dengan menggunakan elemen tangguh antara pusat roda dan ban.

(Orlova & Boronenko, 2006)

Jenis utama dari desain roda ditunjukkan pada Gambar 2.1.



(b) Wheelsets with brake discs on the axle and on the wheel



Gambar 2. 1 Tipe utama desain *wheelset*: a) dengan *external* dan *internal journal*; b) dengan *disc brake* pada *axle* dan roda; c) dengan *gear* posisi simetrik dan asimetrik (1, *axle*; 2, roda; 3, *journal*; 4, *disc brake*; 5, *tooth gear*). (Orlova & Boronenko, 2006)



Gambar 2. 2 Elemen utama pada profil roda

(Orlova & Boronenko, 2006)

Posisi titik kontak ketika *wheelset* berada di posisi tengah pada rel menentukan apa yang disebut "*circle of the tape*," di mana diameter roda diukur. Profil kerucut berguna untuk mencegah
penggelinciran dan memandu kereta ketika kekuatan cengkram roda pada rel hilang.

Gambar 2. 3 menunjukkan beberapa controh dari profil rodaroda kereta. Untuk memahami perilaku dinamis kereta api, konisitas antar muka sangat penting. Konisitas didefinisikan sebagai perbedaan jari-jari antara roda untuk pergeseran lateral tertentu dari *wheelset*. Di sekitar tepi lingkaran roda, konisitasnya adalah 1:10 atau 1:20 untuk *rolling stock* biasa. Untuk *rolling stock* kecepatan tinggi, konisitasnya dikurangi menjadi sekitar 1:40 atau 1:50. Dapat dilihat dari Gambar 2. 3, bahwa profil roda memiliki *relief* ke sisi luar roda. Ini bertujuan untuk mengangkat bagian luar roda dari rel sehingga memudahkan gerakan saat berpindah. (Orlova & Boronenko, 2006)



Gambar 2. 3 Profil roda: a) Kereta Kargo dan penumpang (Russia); b) Kereta cepat (Russia); c) *Rolling Stock* industri (Russia); d) kereta kargo dan penumpang (eropa); (e,f) Kereta Cepat (Jepang). (Orlova & Boronenko, 2006)

Saat roda aus, bentuk profil dapat berubah secara signifikan tergantung pada sejumlah besar faktor, diantaranya profil kelengkungan rute, desain suspensi, tingkat traksi gaya pengereman yang diterapkan, bentuk profil rel rata-rata yang dilalui dan daerah pelumasan.

Keausan tapak (Gambar 2. 4) akan meningkatkan ketinggian *flange* dan mengkibatkan roda menabrak baut pelat, dll. Jika keausan tapak menyebabkan profil menjadi cekung berlebihan, maka dapat merusak bagian luar roda dan rel. Keausan *flange* dapat menyebabkan peningkatan sudut flange dan mengurangi ketebalan *flange*. (Orlova & Boronenko, 2006)



Gambar 2. 4 Aus pada tread dan flange

(Orlova & Boronenko, 2006)

Dalam kondisi ekstrim, keausan tapak ini dapat meningkatkan risiko *switch-splitting derailment* atau kereta tergelincir keluar rel. Maka umumnya roda dipulihkan ke bentuk awal desainnya dengan membubut roda secara berkala dan dapat dilakukan tanpa harus melepas wheelset dari kereta.

Jelas bahwa kondisi kontak akan sangat bervariasi tergantung pada bentuk profil roda dan rel. Dapat berupa kontak titik tunggal, dua titik, atau konformal seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.5. Kontak satu titik (a) terjadi antara profil roda

kerucut atau tapak dan profil bundar rel. Roda cepat aus ke daerah lokal rel. Kontak dua titik (b) Roda menyentuh rel dengan flangenya. Dalam hal ini, *rolling contact* memiliki dua jari-jari yang berbeda yang menyebabkan intensif slip dan keausan cepat pada flange. Kontak konformal (c) ) Terjadi ketika profil roda dan sisi kepala rel aus sejauh jari-jarinya di sekitar bidang kontak. (Orlova & Boronenko, 2006)



Gambar 2. 5 Titik kontak antara Roda dan Rel

(Orlova & Boronenko, 2006)

# 2.2.2 Wheels

Roda dan gandar adalah komponen paling penting dari kereta *rolling stocks*. Kegagalan mekanis atau desain dimensi yang berlebihan dapat menyebabkan *derailment* (penggelinciran). Roda diklasifikasikan menjadi tipe padat, ban, dan tipe rakitan yang ditampilkan pada gambar 2.6.



(A) Solid Wheels







(C) Assembly Wheels

# Gambar 2.6 Tipe utama roda kereta

(Orlova & Boronenko, 2006)

Solidwheels mempunyai 3 elemen utama: roda, disc, dan hub. Perbedaan utama terletak pada disc. Tyred wheels (Gambar 2. 6.b) memiliki ban yang dipasang dengan disc roda yang dapat dilepas dan diganti ketika mencapai batas operasi maksimum.

Roda dapat memiliki *disc* tipe lurus, berbentuk kerucut, berbentuk S, spoked, atau bergelombang ketika dilihat pada *cross section*. *Disc* lurus mengurangi berat konstruksi dan dapat dibentuk sedemikian rupa sehingga ketebalan logam sesuai dengan tingkat tekanan lokal. *Disc* berbentuk kerucut dan S berfungsi untuk meningkatkan fleksibilitas roda, oleh karena itu mengurangi gaya interaksi antara roda dan rel. *Disc* bergelombang memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap tekukan lateral. (Orlova & Boronenko, 2006)

### 2.3 Material Roda Kereta

Material roda kereta telah distandardisasi dalam manual AAR M-107/M-108 tentang spesifikasi material roda lokomotif dan gerbong, baik yang diproses secara *forging* maupun *casting* (tabel 2.1) dan telah diklasifikasikan menjadi kelas-kelas sebagai berikut

- Kelas L Layanan berkecepatan tinggi dengan kondisi pengereman yang lebih berat daripada kelas dan beban roda ringan.
- Kelas A Layanan berkecepatan tinggi dengan kondisi pengereman berat, tetapi dengan beban roda sedang.
- Kelas B Layanan berkecepatan tinggi dengan kondisi pengereman berat dan beban roda lebih berat.
- Kelas C (1) Layanan dengan kondisi pengereman ringan dan beban roda berat.

(2) Layanan dengan kondisi pengereman yang lebih berat di mana rem tapak digunakan. (Association of American Railroads, 2007)

| Element     | Ladle Analysis (%) |             |             |             |  |  |
|-------------|--------------------|-------------|-------------|-------------|--|--|
| Liement     | Class L            | Class A     | Class B     | Class C     |  |  |
| Carbon      | 0.47 max.          | 0.47-0.57   | 0.57-0.67   | 0.67-0.77   |  |  |
| Manganese   | 0.60-0.90          | 0.60-0.90   | 0.60-0.90   | 0.60-0.90   |  |  |
| Phosphorous | 0.030 max.         | 0.030 max.  | 0.030 max.  | 0.030 max.  |  |  |
| Sulfur      | 0.005-0.040        | 0.005-0.040 | 0.005-0.040 | 0.005-0.040 |  |  |
| Silicon     | 0.15-1.00          | 0.15-1.00   | 0.15-1.00   | 0.15-1.00   |  |  |

#### Tabel 2. 1 Persyaratan Kimia

### 2.4 Forging

Pengerjaan logam, khususnya *forging*, terdiri dari proses deformasi dimana *billet* logam atau *blank* dibentuk oleh alat atau *dies*. Desain dan proses kontrolnya tergantung pada pemahaman tentang karakteristik bahan benda kerja, kondisi pada antarmuka alat / benda kerja, mekanisme deformasi plastik (aliran logam), peralatan yang digunakan, dan persyaratan produk jadi. Faktorfaktor ini mempengaruhi pemilihan geometri dan material pahat serta kondisi pemrosesan (misalnya, suhu dan pelumasan benda kerja dan *die*). Karena rumitnya operasi pengerjaan logam ini, berbagai macam model, seperti analitik, fisik, atau model numerik, sering diandalkan untuk merancang proses tersebut.

Dalam proses *forging*, *billet* atau *blanked sheet*, dibentuk hingga terdeformasi plastis di antara alat atau *dies* untuk mendapatkan bentuk akhir yang diinginkan. Benda kerja, akan mengalami deformasi plastik (permanen) yang besar dan perubahan yang cukup besar dalam bentuk atau penampang. Bagian benda kerja yang mengalami deformasi plasti umumnya jauh lebih besar daripada bagian yang mengalami deformasi elastis; Oleh karena itu, pemulihan elastis setelah deformasi dapat diabaikan. (*ASM Handbook Forming and Forging*, 1988)

Berdasarkan temperatur awal benda kerja, proses forging dikategorikan menjadi tiga, yaitu *Cold forging, Warm forging, dan Hot forging. Cold forging* dilakukan pada benda kerja dengan temperatur sekitar suhu kamar. Material yang biasa diaplikasikan yaitu karbon dan baja paduan standar. *Warm forging* pada kisaran diatas suhu kamar hingga dibawah suhu rekristalisasi dari logam yang ditempa, atau sekitar 800 hingga 1800 derajat Fahrenheit. *Warm forging* memiliki kelebihan berupa berkurangnya beban mesin, berkurangnya beban tekan dan peningkatan keuletan baja dibandingkan dengan *cold forging*. Sedangkan *Hot forging* dilakukan pada suhu diatas suhu rekristalisasi logam. Penempaan ini menghasilkan keuletan yang tinggi, karena rekristalisasi

menjaga *yield strength* dan kekerasan material tetap rendah (*Queen City Forging Co*, n.d.).

# 2.5 Cold Forging

Salah satu tantangan terbesar dalam industri pembentukan logam adalah mendapatkan produk dalam bentuk akhir dan properti dengan permesinan minimum. Proses penempaan dingin adalah opsi yang layak untuk tujuan ini karena bagian yang diproduksi membutuhkan sedikit permesinan, waktu produksi kecil, dan produk menghadirkan kekuatan mekanik yang lebih tinggi daripada bagian yang diproduksi oleh proses lain.

Penempaan dingin adalah proses yang dilakukan di bawah suhu rekristalisasi yang diterapkan untuk membuat bagian-bagian kecil dengan geometri yang bervariasi dan memiliki keunggulan seperti limbah bahan minimum, peningkatan sifat mekanik, seperti kekuatan luluh dan kekerasan, yang menguntungkan penggunaan bahan yang lebih murah , permukaan akhir yang sangat baik, ekonomi energi bila dibandingkan dengan penempaan panas atau hangat, dan alat mengalami kelelahan termal kurang (Roque & Button, 2000).

# 2.6 Hot Forging

Penempaan panas adalah proses penempaan yang paling banyak digunakan. Dalam proses penempaan panas, penempaan dilakukan pada suhu di atas suhu rekristalisasi logam yang berarti pada suhu di mana butiran baru terbentuk dalam logam. Panas ekstrem ini diperlukan untuk menghindari pengerasan regangan logam selama deformasi.

Dalam kondisi nyata selama manufaktur industri, gesekan berperan dalam proses tersebut. Gaya gesekan pada antarmuka *diework* menghambat penyebaran material di dekat permukaan, sedangkan material di tengah dapat mengembang lebih mudah. Hasilnya adalah membuat bentuk laras ke bagian tersebut. Efek ini disebut laras dalam istilah penempaan logam. Laras umumnya tidak diinginkan dan dapat dikontrol dengan menggunakan pelumasan yang efektif. Pertimbangan lain, selama proses pembuatan penempaan panas, yang biasanya bertindak untuk meningkatkan efek laras, adalah perpindahan panas antara logam panas dan die pendingin. Logam yang lebih dekat dengan permukaan die lebih cepat dingin daripada logam di bagian tengah. Bagian yang lebih dingin lebih tahan terhadap deformasi sehingga mengembang lebih sedikit dari bagian yang lebih panas di tengah. Ini yang disebut efek laras.

Keuntungan dari hot forging adalah:

- Laju regangan yang tinggi sehingga logam mudah mengalir;
- Rekristalisasi dan pemulihan memungkinkan;
- Gaya yang dibutuhkan lebih kecil.

Kerugian dari hot forging adalah :

- Pelumasan pada suhu tinggi sulit;
- Oksidasi terjadi pada benda kerja;
- Permukaan akhir yang buruk;
- Toleransi yang kurang tepat
- Kemungkinan pembengkokan material selama proses pendinginan (Steelforging, 2018)

# 2.7 Forging Vs Casting

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

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

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

- *Forging* menghasilkan struktur butir dan karakteristik aliran yang dapat diprediksi dan seragam yang meningkatkan kekuatan arah.
- *Forging* menghilangkan rongga dalam/kantong gas yang melemahkan bagian logam, memberikan keseragaman kimia yang unggul dan meningkatakan Kekuatan Struktural.
- *Forging* memastikan orientasi aliran butir yang tepat, sehingga memaksimalkan ketahanan terhadap kelelahan dan meningkatkan kekuatan benturan.

Singkatnya, proses penempaan baja menambahkan sekitar 30% peningkatan kekuatan / ketangguhan dari *billet* aslinya. Dibandingkan dengan pengecoran baja, biaya perkakas awal untuk penempaan jauh lebih mahal, sehingga diperlukan untuk memproduksi dalam jumlah tinggi untuk 'impas' pada biaya awal. Tetapi mengingat keunggulan penempaan baja, ini adalah metode yang sangat hemat biaya untuk produksi volume besar (Steelforging, 2017)

Sebuah *paper* menjelaskan perbandingan satu jenis produk yang dibuat dengan metode *casting* dan *forging* dan dapat diambil kesimpulan :

- Barang yang ditempa memiliki kekuatan tarik 26% lebih tinggi daripada barang cor. Sehingga didapatkan barang yang lebih kuat dan ringan.
- Barang yang ditempa memiliki kekuatan lelah 37% lebih tinggi yang menghasilkan faktor umur keletihan yang lebih lama. Ini berarti bahwa barang akan bertahan lebih lama.
- Besi tuang hanya memiliki 66% kekuatan luluh baja tempa. Kekuatan luluh merupakan indikator dari apa yang akan ditahan oleh barang sebelum mulai berubah bentuk.
- Barang yang ditempa memiliki pengurangan 58% disuatu area ketika ditarik untuk dirusak. Bagian cor hanya memiliki pengurangan 6% disuatu area. Itu berarti akan ada deformasi yang jauh lebih besar sebelum kegagalan untuk barang hasil tempa (Williams & Fatemi, 2007)

# 2.8 Hydraulic Presses

Pengepres hidrolik digunakan untuk penempaan *die* terbuka dan tertutup. *Ram* digerakkan oleh silinder dan piston hidrolik, yang merupakan bagian dari sistem hidrolik atau hidropneumatik bertekanan tinggi. Setelah kecepatan pendekatan yang cepat, ram (dengan die atas terpasang) bergerak dengan kecepatan lambat sambil mengerahkan kekuatan meremas pada benda kerja. Kecepatan pengepresan dapat dikontrol secara akurat agar memungkinkan kontrol kecepatan aliran logam, sehingga dapat menghasilkan tempa toleransi dekat. Komponen utama dari press hidrolik ditunjukkan pada gambar 2.7.



Gambar 2. 7 Komponen utama penekan hidrolik untuk penempaan *dies* tertutup

- a. Kelebihan dari pengepres hidrolik adalah:
- Tekanan dapat diubah sesuai keinginan pada titik mana pun pada stroke dengan menyesuaikan katup kontrol tekanan.
- Laju deformasi dapat dikontrol selama operasi. Ini sangat penting ketika menempa logam yang rentan terhadap pecah pada tingkat deformasi yang tinggi.
- *Split die* dapat digunakan untuk membuat bagian seperti *offset flanges*, proyeksi, dan *backdraft*, yang akan sulit atau tidak mungkin untuk dimasukkan ke dalam tempa palu.
- Perpindahan panas yang berlebihan dari benda kerja yang panas pada *die* dapat dihilangkan, tindakan meremas yang lembut dari press hidrolik menghasilkan biaya perawatan

yang lebih rendah dan peningkatan umur *dies* karena lebih sedikit goncangan dibandingkan dengan jenis peralatan tempa lainnya.

- Gaya tekan maksimum dapat dibatasi untuk melindungi perkakas.
- b. Kelemahan dari pengepres hidrolik adalah:
- Biaya awal untuk pengepres hidrolik lebih tinggi daripada pengepresan mekanis yang setara.
- Gerakan pengepres hidrolik lebih lambat daripada pengepresan mekanis.
- Gerakan yang lebih lambat dari pengepres hidrolik meningkatkan waktu kontak antara *die* dan benda kerja. Saat menempa bahan pada suhu tinggi (seperti paduan nikel-dasar dan paduan titanium), ini menghasilkan usia pakai yang lebih pendek karena perpindahan panas dari logam kerja panas ke cetakan. (*ASM Handbook Forming and Forging*, 1988)

# 2.8.1 Kapasitas Mesin Hydraulic Presses

Penekan hidraulik dinilai dari besar maksimum gaya tempa yang dapat diberikan. Mesin press *open die* dibangun dengan kapasitas mulai dari 1,8 hingga 125 MN (200 hingga 14.000 tonf), dan mesin press *closed die* berkisar dari 4,5 hingga 640 MN (500 hingga 72.000 tonf). Kecepatan ram selama kondisi penempaan normal bervariasi dari 635 hingga 7620 mm / menit (25 hingga 300 in./min). Kecepatan *press* telah diperlambat hingga sepersekian inci per menit untuk menempa material yang sangat sensitif terhadap laju deformasi. Karakteristik operasional alat pres hidrolik pada dasarnya ditentukan oleh jenis dan desain sistem

penggerak hidroliknya. (ASM Handbook Forming and Forging, 1988)



In April last year, Erzhong Group published a photo of its new, 80,000 ton hydraulic press forge, the biggest of its kind in the world. *HUANG MENGLIN/THE WALL STREET JOURNAL* 

Gambar 2.8 80.000 ton hydraulic press forge (the wall street journal)



Gambar 2. 9 800 MN heavy duty forging press (sinomach.com)

Dilansir dari laman web The Wall Street Journal (gambar 2.8), telah dibangun mesin forging press oleh China National Erzhong

Group yang berhubungan bisnis dengan China National Machinery Industry Corporation (sinomach), mesin ini dapat mengerahkan hingga 80.000 ton tekanan ke bawah menggunakan lima kolom. Jika dibalik, mesin itu bisa mengangkat kapal induk Liaoning China, dengan ruang kosong untuk beberapa kapal selam. Airbus menggunakan bengkel Rusia untuk membuat komponen roda pendaratan untuk A380, pesawat penumpang terbesar di dunia.

# 2.9 Konsep Tegangan dan Regangan

### 2.9.1 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  $\Delta A$  (ditunjukkan oleh gambar 2.10a). Jika jumlah gaya yang bekerja pada area tersebut adalah  $\Delta F_z$ , maka nilai tegangan normal secara matematis serta besar tegangan normal rata-rata dari semua gaya yang bekerja bidang normal luasan  $\Delta A$  dapat dirumuskan sebagai

$$\sigma_z = \lim_{\Delta A \to 0} \frac{\Delta Fz}{\Delta A}$$

$$\sigma_{avg} = \frac{F}{A}$$



**Gambar 2. 10** (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 2.10a, 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  $\Delta A$ . Sehingga secara matematis dirumuskan sebagai berikut

$$\tau_{zx} = \lim_{\Delta A \to 0} \frac{\Delta Fx}{\Delta A}$$
$$\tau_{zy} = \lim_{\Delta A \to 0} \frac{\Delta Fy}{\Delta A}$$

Sehingga besar tegangan normal rata-rata dari semua gaya tangensial yang bekerja bidang normal luasan  $\Delta A$  dapat dirumuskan sebagai

$$\tau_{avg} = \frac{V}{A}$$

Sumbu kerja dari masing-masing tegangan tersebut ditunjukkan oleh gambar 2.10b. Gaya yang bekerja pada luasan bidang secara tegak lurus tersebut biasanya disebut dengan **gaya** geser yang disimbolkan dengan huruf V (Hibbeler, 2011).

#### 2.9.2 Konsep Regangan

Untuk memperoleh satuan deformasi atau regangan ( $\epsilon$ ) adalah dengan membagi perpanjangan ( $\delta$ ) dengan panjang mula – mula (L<sub>0</sub>) dari suatu spesimen. Regangan dapat dirumuskan: (Hibbeler, 2011)

$$\varepsilon = \frac{L_1 - L_0}{L_0} = \frac{\delta}{L_0}$$

Keterangan:

 $\epsilon$  = regangan

 $L_0 = panjang awal (mm)$ 

 $L_1 = panjang akhir (mm)$ 

 $\delta$  = perubahan panjang (mm)

#### 2.9.3 Perilaku Tegangan Regangan

Ketika tegangan sebenarnya ( $\sigma$ ) di plot terhadap regangan sebenarnya ( $\varepsilon$ ), kurva tegangan-regangan material yang telah di *annealing* dalam tegangan sederhana dan kompresi sederhana ditemukan bertepatan satu sama lain. Gambar 2.11 menunjukan kurva tegangan-regangan yang sebenarnya dari material anil dalam tensi (tegangan) yang kecil. Selama tegangan yang diberikan dibawah kekuatan luluh, material masih bersifat elastis, dan apabila beban yang diberikan tadi dihilangkan, maka spesimen akan kembali ke ukuran semula. Dalam gambar 2.11, kemiringan garis OA disebut dengan *modulus Young*. Pada titik A, *hub*ungan linear antara tegangan dan regangan tidak ada lagi dan dikenal sebagai batas proporsionalitas dari *hub*ungan tegangan-regangan. Kisaran elastis umumnya meluas sedikit di luar batas proporsionalitas.

Titik B pada kurva tegangan-regangan dikenal sebagai titik luluh. Lokasi hasil titik B sebagian besar adalah masalah konvensi, karena transisi dari perilaku elastis ke plastik dalam kebanyakan logam itu bertahap. Tegangan yang sesuai dengan hasil titik B disebut tegangan luluh Y, dan didefinisikan sebagai tegangan terkecil yang menyebabkan deformasi plastis pada logam.



Gambar 2. 11 Kurva Tegangan-Regangan dengan Efek Penghilangan Beban (Chakrabarty, 2006)

Seperti yang terlihat pada gambar 2.11, tekanan terus meningkat bersamaan dengan regangan plastik di luarnya titik luluh, sedangkan kemiringan (mewakili tingkat pengerasan regangan) menurun seiring meningkatnya tegangan. Pada titik C, pada kurva tegangan-regangan dalam rentang plastis, jika bebannya sepenuhnya dihilangkan, ada pemulihan elastis di sepanjang jalur CD yang memotong sumbu regangan pada titik E. Regangan plastis pada tahap ini diwakili oleh garis OE. Pembebanan yang dilakukan kembali, menyebakan spesimen terdeformasi plastis hingga titik luluh baru F tercapai.

Umumnya, loop histerisis yang terbentuk selama *loading* dan *unloading* diabaikan dan F dianggap bertepatan dengan C. Kurva tegangan-regangan berlanjut sepanjang FG selama pembebanan diteruskan sebagai kelanjutan dari kurva BC. Kurva EFG dapat dianggap sebagai kurva tegangan-regangan logam peregangan ulang dengan jumlah OE. Tingkat *prestrain* yang lebih besar menghasilkan titik luluh yang lebih tinggi dan kurva pengerasan regangan yang lebih rata. Material dikatakan *nonhardening* atau plastis secara ideal ketika laju pengerasan regangan sangat kecil (Chakrabarty, 2006).

# **2.10** Residual Stress

Tegangan sisa atau *residual stress* adalah tegangan yang tetap berada dalam bahan padat setelah penyebab asli dari tegangan telah dihilangkan. Tegangan sisa didefinisikan sebagai gaya tarik atau tekan dalam material, seperti baja, tanpa aplikasi gradien termal atau gaya eksternal. Tegangan sisa adalah produk dari transformasi fasa, deformasi plastis atau efek termal seperti proses kontraksi saat pendinginan. Tegangan sisa bisa jadi diinginkan atau tidak diinginkan. Sebagai contoh, *peening laser* memberikan tekanan residu tekan yang menguntungkan ke dalam komponen logam seperti bilah kipas mesin turbin, dan digunakan dalam kaca yang dikeraskan untuk memungkinkan tampilan kaca yang besar, tipis, yang tahan retak dan gores pada *smartphone*. Namun, tegangan sisa yang tidak diinginkan dalam suatu struktur rancangan dapat menyebabkan kegagalan sebelum waktunya. (Milošević et al., 2017)

Roda diproduksi menggunakan proses penempaan multistage. Selanjutnya, untuk menghilangkan tegangan sisa yang tidak diinginkan yang timbul setelah penempaan, roda ini dipanaskan kembali di atas suhu *austenitizing* (Af = 871 / C atau 1600 / F dalam contoh ini). Setelah dipanaskan kembali, bagian rim pada roda di proses *quenching* dengan menggunakan semprotan air untuk menghasilkan struktur mikro pearlitic berbutir halus dan menginduksi tegangan tekan residual *circumferential* (hoop) yang berguna di permukaan *tread*. distribusi tegangan sisa ini menghambat pembentukan retak kelelahan di rim dan juga memperlambat pertumbuhan retakan ini jika mereka berhasil terbentuk.

Setelah pendinginan, roda ditempatkan di tungku anil selama beberapa jam untuk mengurangi tingkat tegangan sisa. Setelah perlakuan panas ini, roda terekspose pada kondisi sekitar sehingga mulai dingin setara suhu kamar. Distribusi tegangan sisa yang dihasilkan menggambarkan kondisi manufaktur roda "baru", dan menjadi sebuah komponen yang siap untuk dipakai.

Tegangan sisa arah radial dalam roda baru, ditunjukkan pada Gambar 12 (a). Distribusi ini menunjukkan kompresi residu pada permukaan tapak yang menghambat pembentukan retak dan membantu memperlambat tumbuh jika retakan berhasil terbentuk. Tegangan kompresi sisa ini "meremas" celah untuk menutup, membuat lebih sulit baginya untuk menyebar.

Gambar 12 (b) menunjukkan prediksi model tentang pengaruh pengenaan beban operasional. Setelah roda digunakan untuk operasional, wilayah di tengah *tread* telah berbalik ke tegangan *tension*. Kondisi ini dapat menyebabkan pembentukan dan pertumbuhan retak kelelahan ("*thermal cracks*") pada rim yang pada akhirnya dapat menyebabkan kegagalan prematur roda dalam operasionalnya. (Railroad, 1999)



Gambar 2. 12 Perkiraan tegangan sisa di roda komuter: (a)

setelah proses manufaktur dan (b) setelah operasional disimulasikan. Level kontur dalam megapascal, MPa (6,895 MPa = 1 ksi).

Proses heat treatment pada roda akan menginduksi circumferential residual stress yang bersifat kompresi didalam rim. Nilai circumferential residual stress pada tapak (permukaan rim) yang harus dicapai setelah proses heat treatment adalah dalam status kompresi dibawah -80 N/mm<sup>2</sup>. Jika besarnya circumferential pada permukaan tapak roda lebih rendah dari -200 N / mm<sup>2</sup>, harus dibuktikan bahwa tingkat tegangan sisa radial dalam web dapat diterima terkait perilaku kelelahan. (Standard, 2018)

# 2.11 Deformasi Plastis pada Laju Regangan Tinggi

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

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

Dimana  $\varepsilon$  adalah regangan,  $\acute{\epsilon}$  adalah laju regangan, dan T adalah suhu. Karena ada berbagai deformasi substruktur yang bergantung pada laju regangan, temperatur, dan keadaan tegangan, kita harus menambahkan istilah umum yang disebut "sejarah deformasi" ke persamaan di atas:

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

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

$$\sigma \, eff = \frac{\sqrt{2}}{2} \, [(\sigma 1 - \sigma 2)^2 + (\sigma 2 - \sigma 3)^2 + (\sigma 1 - \sigma 3)^2]^{1/2}$$

$$\varepsilon \, eff = \frac{\sqrt{2}}{2} \left[ (\varepsilon 1 - \varepsilon 2)^2 + (\varepsilon 2 - \varepsilon 3)^2 + (\varepsilon 1 - \varepsilon 3)^2 \right]^{1/2}$$



Gambar 2. 13 Tegangan luluh terhadap laju regangan geser untuk baja ringan

(Campbell and Ferguson)

Gambar 2.13 Menunjukkan kekuatan luluh yang lebih rendah dari baja ringan yang diplot terhadap logaritma laju regangan pada suhu yang berbeda, dan dapat disimpulkan:

- 1. Tegangan luluh meningkat seiring meningkatnya laju regangan
- 2. Meningkatnya tegangan luluh dengan laju regangan lebih signifikan pada temperatur rendah (Meyers, 1994b).

#### 2.12 Rumus Empiris

Terdapat sejumlah persamaan yang digunakan untuk menggambarkan perilaku plastis material sebagai fungsi laju regangan dan temperatur. Tujuannya adalah untuk mengurai data pada Gambar 2.13 menjadi satu persamaan tunggal.

$$\sigma = \sigma_0 + k\varepsilon^n$$

Dimana  $\sigma_0$  adalah tegangan luluh, n adalah koefisien kerjapengerasan, dan K adalah faktor yang ada sebelumnya. Pengaruh suhu pada tegangan aliran ditunjukkan oleh persamaan berikut

$$\sigma = \sigma r \left[ 1 - \left( \frac{T - Tr}{Tm - Tr} \right)^m \right]$$

Pada persamaan di atas, Tm adalah titik lebur, Tr adalah suhu referensi untuk tegangan referensi yang telah diukur ( $\sigma_r$ ), dan T adalah suhu untuk  $\sigma$  yang telah dihitung. Persamaan tersebut dapat membentuk kurva parabolik yang mana tingkat kecekungannya ditentukan oleh parameter m, yakni parameter penyesuaian yang ditentukan secara eksperimental. Efek dari laju regangan yang lebih rinci ditunjukkan pada gambar 2. 14, dan dapat dijabarkan dengan mudah dengan beberapa variabel berikut:

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

Namun, *hub*ungan ini sangat sering diamati pada tingkat regangan yang tidak terlalu tinggi





Gambar 2. 14 Pengaruh temperatur dan tingkat regangan pada tegangan luluh besi. (Vohringer, Gbr. 31, hal. 44); (b) Aliran tegangan vs suhu yang ditentukan secara eksperimental dan kalkulasi (menggunakan persamaan Johnson-Cook yang dimodifikasi) untuk tembaga hard-shock (Andrade, Meyers, dan Chokshi, Scripta Met. et Mat. 30 (1994) 933).

Johnson and Cook dan Johnson et al. menggunakan persamaan-persamaan dasar ini dan mengusulkan persamaan berikut:

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

Persamaan ini memiliki lima parameter yang ditentukan secara eksperimental ( $\sigma_0$ , *B*, *C*, *n*, *m*) yang menggambarkan respons sejumlah logam dengan cukup baik. *T*\* dikalkulasi dengan persamaan:

$$T^* = \frac{T - Tr}{Tm - Tr}$$

Tr adalah temperatur referensi di mana  $\sigma_0$  diukur dan  $\varepsilon_0$ adalah laju regangan referensi (dibuat sama dengan 1 untuk mempermudah). Johnson dan Cook menguji sejumlah material dan memperoleh parameter-parameter ini, yang ditunjukkan pada Tabel 2.2. Salah satu masalah dalam persamaan ini adalah bahwa semua parameter digabungkan dengan dikalikan satu sama lain. Namun demikian, persamaan Johnson-Cook tetap menjadi pemodelan pokok yang berguna dan berhasil. Persamaan ini juga telah diterapkan untuk material keramik (dalam bentuk yang telah dimodifikasi) (Meyers, 1994b)

| Tabel 2. 2 Konstanta konstitutit | f untuk berbagai material ( | $(\hat{\epsilon} = 1 \text{ s})$ |
|----------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|
|----------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|

|                               |                        | Desc                            | cription                     |                               | $\sigma = [\sigma]$     | Constituti<br>, + $B\epsilon^n$ ][ | ve Const<br>1 + C lr | Constants for<br>+ C ln ε*][1 - T* <sup>m</sup> ] |      |  |
|-------------------------------|------------------------|---------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------|------------------------------------|----------------------|---|------|--|
| Material                      | Hardness<br>(Rockwell) | Density<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Specific<br>Heat<br>(J/kg K) | Melting<br>Temperature<br>(K) | σ <sub>o</sub><br>(MPa) | B<br>(MPa)                         | n                    | с   | m    |  |
| OFHC copper                   | F-30                   | 8960                            | 383                          | 1356                          | 90                      | 292                                | 0.31                 | 0.025   | 1.09 |  |
| Cartridge brass               | F-67                   | 8520                            | 385                          | 1189                          | 112                     | 505                                | 0.42                 | 0.009   | 1.68 |  |
| Nickel 200                    | F-79                   | 8900                            | 446                          | 1726                          | 163                     | 648                                | 0.33                 | 0.006   | 1.44 |  |
| Armco iron                    | F-72                   | 7890                            | 452                          | 1811                          | 175                     | 380                                | 0.32                 | 0.060   | 0.55 |  |
| Carpenter electrical iron     | F-83                   | 7890                            | 452                          | 1811                          | 290                     | 339                                | 0.40                 | 0.055   | 0.55 |  |
| 1006 steel                    | F-94                   | 7890                            | 452                          | 1811                          | 350                     | 275                                | 0.36                 | 0.022   | 1.00 |  |
| 2024-T351 aluminum            | B-75                   | 2770                            | 875                          | 775                           | 265                     | 426                                | 0.34                 | 0.015   | 1.00 |  |
| 7039 aluminum                 | B-76                   | 2770                            | 875                          | 877                           | 337                     | 343                                | 0.41                 | 0.010   | 1.00 |  |
| 4340 steel                    | C-30                   | 7830                            | 477                          | 1793                          | 792                     | 510                                | 0.26                 | 0.014   | 1.03 |  |
| S-7 tool steel                | C-50                   | 7750                            | 477                          | 1763                          | 1539                    | 477                                | 0.18                 | 0.012   | 1.00 |  |
| Tungsten alloy (.07Ni, .03Fe) | C-47                   | 17000                           | 134                          | 1723                          | 1506                    | 177                                | 0.12                 | 0.016   | 1.00 |  |
| Depleted uranium-0.75% Ti     | C-45                   | 18600                           | 117                          | 1473                          | 1079                    | 1120                               | 0.25                 | 0.007   | 1.00 |  |

| Tabel 2. 2 Konstanta | konstitutif untuk | berbagai material | $(\dot{\epsilon} = 1 \text{ s}^{-1})$ |
|----------------------|-------------------|-------------------|---------------------------------------|
|                      | 1                 |                   |                                       |

| 1 | ١ |
|---|---|
|   | J |

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

Penting untuk mengetahui bahwa persamaan konstitutif empiris di atas pada dasarnya adalah prosedur "curve-fitting". Persamaan Johnson-Cook telah banyak digunakan, dan parameternya dikenal untuk sejumlah besar material. Persamaan konstitutif juga telah dikembangkan untuk bahan keramik. Andrade et al. [12] memodifikasi persamaan Johnson-Cook untuk menggabungkan rekristalisasi dinamis pada suhu yang lebih tinggi.

Mereka memasukkan fungsi peredam H (t) ke dalam persamaan konstitutif:

$$\sigma = (\sigma 0 + B\varepsilon^n) \left( 1 + C \log \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}0} \right) \left[ 1 - \left( \frac{T - Tr}{Tm - Tr} \right) \right] H(T)$$

$$H(T) = \frac{1}{1 - \left[1 - \frac{(\sigma f)rec}{(\sigma f)def}\right]u(T)}$$

u (T) adalah fungsi langkah dari suhu yang didefinisikan sebagai:

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

Tc adalah suhu di mana fenomena kritis (rekristalisasi dinamis, transformasi fase, dll) terjadi.  $(\sigma_f)_{rec}$  dan  $(\sigma_f)_{def}$  adalah tegangan aliran material setelah dan sebelum rekristalisasi. Penerapan persamaan ini pada tembaga dalam kondisi *shock-hardened* membuahkan hasil yang ditunjukkan pada Gambar 2.14 (b) (Meyers, 1994b).

#### 2.13 Strain Rate

Laju regangan, dan kecepatan deformasi, adalah parameter penting. *Strain rate* adalah laju perubahan regangan terhadap waktu.

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt}$$

Contoh:

Proyektil (silinder) dengan panjang 5 cm menumbuk target yang kaku pada kecepatan 1000 m / s. Jika kita mengasumsikan bahwa proyektil akan melambat secara linear dan perubahan panjangnya adalah 2,5 cm (terpotong kerucut), kita dapat menetapkan perkiraan laju regangan :

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\Delta l}{l_0 t} = \frac{2.5}{5t}$$



Gambar 2. 15 Model penumbukan proyektil

Pada tingkat regangan yang lebih tinggi kita mulai memiliki pengaruh peningkatan gaya inersia karena efek perambatan gelombang (Meyers, 1994a)

# 2.14 Respon Mekanik Laju Regangan Tinggi

Pada awal 1905, Bertram Hopkinson melakukan serangkaian eksperimen dinamis pada baja dan menyimpulkan bahwa kekuatan dinamis setidaknya dua kali lebih tinggi dari kekuatan laju regangan rendahnya. Diketahui juga bahwa baja mengalami transisi ductile-to-getas ketika laju regangan meningkat. Dengan demikian adalah normal bahwa para ilmuwan ingin tahu tentang pengaruh laju regangan pada kekuatan bahan. Responsnya sangat beragam, dan oleh karena itu perlu untuk menguji bahan individual untuk mendapatkan informasi spesifik.

| ATE, S                 | COMMON TESTING METHODS   | DYNAMIC CONSIDERATIONS                                 | _       |
|------------------------|--|--|---------|
| 10'<br>10 <sup>6</sup> | HIGH VELOCITY IMPACT<br>-Explosives<br>-Normal plate impact<br>-Pulsed laser<br>-Exploding foil<br>-Incl plate impact (pressure-shear) | SHOCK-WAVE PROPAGATION                                 | INERTIA |
| 10-                    | Statutes their   | SHEAR WAVE PROPAGATION                                 | 5       |
| 104-                   | -Taylor anvil tests<br>-Hopkinson Bar<br>-Expanding ring   | PLASTIC-WAVE PROPAGATION                               | ORCES I |
| 10-                    | DYNAMIC-LOW  | MECHANICAL RESONANCE IN                                | MPO     |
| 102-                   | High-velocity hydraulic, or<br>pneumatic machines; cam   | SPECIMEN AND MACHINE<br>IS IMPORTANT                   | ORTANT  |
| 101-                   | plastometer  |  |         |
| 10-                    | QUASI-STATIC<br>Hydraulic, servo-hydraulic   | TESTS WITH CONSTANT CROSS-<br>HEAD VELOCITY STRESS THE |         |
| 101                    | or screw-driven testing<br>machines  | SAME THROUGHOUT LENGTH OF<br>SPECIMEN                  | INER    |
| 102                    |  |  | Ę       |
| 103                    |  |  | L FORC  |
| 104                    |  |  | ES NE   |
| 105                    |  |  | e<br>E  |
| 106                    | CREEP AND STRESS-<br>RELAXATION  | VISCO-PLASTIC RESPONSE OF<br>METALS                    | SIBLE   |
| 10 <sup>7</sup>        | -Conventional testing<br>machines  |  |         |
| 10-8                   | -Creep testers   |  |         |
| 109                    |  |  |         |

Gambar 2. 16 Klasifikasi skematis dari teknik pengujian menurut tingkat regangan (Meyers, 1994a)

Sebagai contoh dari berbagai respons, Gambar 12.17 menunjukkan kurva tegangan-regangan tekan (spesimen silinder) untuk aluminium 7075-T6 (kiri) dan untuk titanium paduan 6% Al-4% V (kanan).



Gambar 2. 17 Pengaruh laju regangan pada respons tegangan-regangan (dalam kompresi) dari (a) aluminium 7075-T6 dan (b) paduan Ti-6% Al-4% V (M. A. Meyers, G. Subhash, B. Khad, and L. Prasad, Mechanics of Materials, 11 (1994) 175.)

Pengujian dilakukan pada tingkat regangan antara  $3 \ge 10^{-2}$  dan  $5 \ge 10^{-2}$  s-1 untuk paduan aluminium tanpa efek yang jelas pada kurva tegangan-regangan. Untuk paduan titanium, efek yang nyata ditemukan. Tingkat regangan bervariasi antara  $4 \ge 10^{-3}$  dan  $2 \ge 10^{-3}$  dan penguatan laju regangan yang cukup terlihat.

Gambar 12.18 menunjukkan respons tegangan-regangan untuk titanium murni komersial dan tantalum. Kurva laju regangan tinggi ( $e = 3,5 \times 103 \text{ s-1}$ ) untuk tantalum adalah isotermal dan diperoleh dengan mengompresi secara berurutan.



Gambar 2. 18 (A) Pengaruh laju regangan pada respons tegangan-regangan (dalam kompresi) dari titanium murni komersial. (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, dan J. Isaacs, UCSD).

Dapat disimpulkan bahwa ketika laju regangan meningkat, proses deformasi berubah secara bertahap dari isotermal penuh menjadi adiabatik penuh, karena tidak ada cukup waktu bagi panas yang dihasilkan dalam deformasi untuk keluar dari tubuh. Hal ini, dalam beberapa kasus, menimbulkan ketidakstabilan geser adiabatik yang memiliki efek mendalam pada respons mekanis material (Meyers, 1994a)

#### 2.15 Metode Elemen Hingga

Dalam menganalisa dan untuk kemudian merumuskan solusi beberapa permasalahan *engineering*, katakanlah seperti elastisitas, aliran fluida, perpindahan panas, dan lain-lain, pada umumnya peneliti menggunakan metode-metode umum. Salah satunya disebut dengan *FEM (Finite Element Method)* atau metode elemen hingga.

Metode elemen hingga adalah sebuah teknik komputasional yang digunakan untuk mendapatkan solusi aproksimasi dari permasalahan nilai batas pada kasus-kasus *engineering*. Permasalahan nilai batas secara sederhana didefinisikan sebagai sebuah permasalahan matematis yang mana satu atau lebih variabel tidak bebas harus memenuhi sebuah persamaan diferensial dimanapun di dalam sebuah domain variabel bebas yang diketahui dan memenuhi juga kondisi spesifik pada batasan domain tersebut.

Permasalahan nilai batas ini sangat sering direpresentasikan ke dalam sebuah struktur fisis. Contohnya, katakanlah terdapat sebuah volume material yang memiliki sifat-sifat fisis tertentu. Volume tersebut merepresentasikan domain dari sebuah permasalahan nilai batas yang akan diselesaikan. Sederhananya, asumsikan sebuah kasus dua dimensi dengan sebuah variabel permasalahan nilai batas  $\phi(x,y)$  yang akan ditentukan pada setiap titik P(x,y), seperti sebuah persamaan-persamaan fisis diketahui yang terpenuhi secara eksak pada tiap-tiap titik.

Sehingga kita akan dapatkan solusi matematis pada tiap titik tersebut, yang mana solusi tersebut adalah sebuah pernyataan aljabar bentuk tertutup dari variabel-variabel tetap. Akan tetapi pada kenyataannya, domain tersebut secara geometri mungkin sangat kompleks sekali. Sehingga nilai keeksakan solusi aljabar bentuk tertutup akan sangat rendah. Oleh karena itu, solusi aproksimasi berdasarkan pada teknik numerik dan komputasi digital seringkali dibutuhkan dalam analisis *engineering* pada permasalahan-permasalahan yang kompleks. Dan analisis elemen hingga atau metode elemen hingga adalah teknik yang sangat tepat untuk mendapatkan solusi aproksimasi dengan akurasi yang baik (Hutton, 2004).



Gambar 2. 19 Klasifikasi metode yang umum digunakan (Hutton, 2004)

Proses merepresentasikan sebuah domain fisis dengan elemen-elemen hingga dikenal dengan istilah *meshing*. Hasil dari rangkaian elemen-elemen tersebut dikenal dengan istilah *mesh* elemen hingga, gambar 2.20c.

Pada umumnya, elemen-elemen yang digunakan adalah bentuk garis lurus, sehingga seringkali sangat tidak mungkin untuk memenuhi seluruh domain fisis di dalam *mesh* elemen jika domain memiliki batasan-batasan yang melengkung seperti pada gambar 2.20a dimana sebuah domain dengan batas melengkung dilakukan *meshing* menggunakan elemen-elemen kotak. *Meshing* yang lebih halus untuk domain yang sama ditunjukkan oleh gambar 2.20b dengan elemen yang bentuknya sama namun lebih kecil dan lebih banyak.

Semakin halus proses *meshing* atau semakin banyak jumlah elemen, akurasi aproksimasi semakin baik. Dan apabila hasil fungsi interpolasi sudah memenuhi permintaan matematis yang pasti, sebuah solusi elemen hingga terhadap kasus tersebut sudah dikatakan konvergen (mendekati) terhadap solusi eksak kasus tersebut.



**Gambar 2. 20** (a) domain dua dimensi umum pada permasalahan nilai batas  $\phi(x,y)$  (b) tiga titik elemen hingga yang didefinisikan di dalam domain (c) elemen-elemen tambahan yang menunjukkan sebuah bagian dari *mesh* elemen hingga pada domain

(Hutton, 2004)



**Gambar 2. 21** (a) *meshing* domain batas melengkung yang dimodelkan dengan elemen-elemen kotak yang berjumlah 41 elemen (b) *fine meshing* domain batas melengkung yang dimodelkan dengan elemen-elemen kotak yang berjumlah 192 elemen (Hutton, 2004)

# 2.15.1 Prosedur Metode Elemen Hingga

Prosedur umum untuk analisis elemen hingga terdiri dari tiga tahap yaitu *pre-processing*, *solution*, dan *post-processing*.

- a. Tahap dari pre-processing antara lain:
  - Mendefinisikan domain geometris pada kasus
  - Mendefinisikan tipe-tipe elemen yang akan digunakan

- Mendefinisikan sifat-sifat material dari elemen-elemen
- Mendefinisikan sifat-sifat geometris elemen (panjang, luas, dan lain-lain)
- Mendefinisikan konektivitas antar elemen (model *meshing*)
- Mendefinisikan batas-batas fisis (kondisi batas)
- Mendefinisikan pembebanan
- b. Tahap dari *solution* antara lain:
  - Komputasi nilai-nilai yang tidak diketahui dari variabel-varibel permasalahan nilai batas
  - Komputasi nilai-nilai yang kemudian disubtitusikan untuk mendapatkan variabel-variabel tambahan seperti gaya reaksi, tegangan tiap elemen, dan aliran panas.
- c. Tahap dari post-processing:
  - *Software* mempunyai fitur-fitur umum yang dapat digunakan untuk mengurutkan, menyetak, dan memplot hasil-hasil pilihan dari sebuah solusi elemen hingga (Hutton, 2004).

### 2.15.2 Verifikasi Metode Elemen Hingga

Verifikasi dapat didefinisikan sebagai langkah untuk membuktikan apakah simulasi melalui program komputer dapat menyelesaikan persamaan atau tidak. Menurut Law dan Kelton (1991), suatu model dapat dikatakan valid ketika model simulasi yang dibuat tidak ada perbedaan yang sangat signifikan dengan sistem nyatanya. Oleh karena itu, verifikasi dapat diartikan sebagai proses penerjemahan model simulasi konseptual kedalam bahasa pemrograman secara benar. Verifikasi simulasi dengan cara sederhana dapat dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi dengan hasil lainnya yang memiliki permasalahan dan sistem MEH yang serupa (Logan, 2012).

### 2.15.3 Validasi Metode Elemen Hingga

Validasi merupakan proses penentuan apakah model konseptual simulasi benar-benar merupakan representasi akurat dari sistem nyata yang dimodelkan. Validasi dilakukan dengan membandingkan dan memeriksa model apakah mewakili eksperimen. Suatu model dapat dikatakan valid ketika tidak memiliki perbedaan yang signifikan dengan sistem nyata yang diamati baik dari karakteristik maupun perilakunya (Logan, 2012).

#### 2.15.4 Software Berbasis Metode Elemen Hingga

Terdapat 2 jenis program komputer untuk menyelesaikan permasalahan dengan MEH. Pertama adalah *software* komersial yang menyelesaikan permasalahan rumit (*General-purpose program*) dan yang kedua merupakan *software* dengan kemampuan menyelesaikan permasalahan yang lebih spesifik (*Special-purpose program*). Saat ini, banyak sekali *software* berbasis MEH yang dapat dioperasikan melalui *personal computer* (PC), di antaranya adalah ANSYS, STARDYNE, dan COSMOS (Logan, 2012).

Seluruh *software* di atas memiliki kemampuan standar yang menyediakan informasi seperti di bawah ini:

- a. Tipe elemen, seperti *beam*, *plane stress*, maupun elemen tiga dimensi
- b. Tipe analisa, yaitu statis maupun dinamis
- c. Sifat material, meliputi linear-elastic dan non-linear

#### 2.15.5 Explicit Dynamic ANSYS

Untuk mensimulasikan benda yang menerima tumbukan atau tegangan dinamis dapat digunakan simulasi dengan *ANSYS explicit dynamics*. *Explicit dynamics* dapat mensimulasikan peristiwa singkat yang menerima gaya dinamis yang *nonlinear* dan *transient*.

Persamaan sederhana yang digunakan pada metode analisa ini mengekspresikan konservasi massa, momen, dan energi. Konservasi massa sudah terpenuhi karena berat jenis dari material pada setiap titik waktu bisa ditentukan dari volume dan massa inisial, dapat dirumuskan sebagai berikut

$$\frac{\rho_0 V_0}{V} = \frac{m}{V}$$

Untuk konservasi momentum, digunakan untuk merelasikan percepatan dengan beban dan dapat dirumuskan sebagai berikut

$$\rho \ddot{x} = b_x + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z}$$
$$\rho \ddot{y} = b_y + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z}$$
$$\rho \ddot{z} = b_z + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z}$$

Sedangkan untuk konservasi energi digunakan rumus sebagai berikut

$$\dot{e} = \frac{1}{\rho} \Big( \sigma_{xx} \dot{\varepsilon}_{xx} + \sigma_{yy} \dot{\varepsilon}_{yy} + \sigma_{zz} \dot{\varepsilon}_{zz} + 2\sigma_{xy} \dot{\varepsilon}_{xy} + 2\sigma_{yz} \dot{\varepsilon}_{yz} + 2\sigma_{zx} \dot{\varepsilon}_{zx} \Big)$$

Pada tiap jeda waktu, ketiga persamaan tersebut akan diselesaikan pada setiap elemen di model. Setelah mendapatkan gaya di tiap *node*, percepatan *node* dapat diperoleh dengan rumus sebagai berikut

$$\ddot{x}_i = \frac{F_i}{m} + b_i$$

dimana:  $\ddot{x}_i$  = Percepatan *node* (*i* = 1,2,3)  $F_i$  = Gaya yang bekerja pada *node*   $b_i$  = Percepatan benda m = Massa *node* 

Setelah diperoleh percepatan pada n -  $\frac{1}{2}$ , kecepatan pada n +  $\frac{1}{2}$  bat diperoleh dengan rumus sebagai berikut

$$\dot{x}_{i}^{n+1/2} = \dot{x}_{i}^{n-1/2} + \ddot{x}_{i}^{n} \Delta t^{n}$$

Setelah itu dilakukan perhitungan posisi pada n + 1 dengan rumus sebagai berikut

$$x_i^{n+1} = x_i^n + \dot{x}_i^{n+1/2} \Delta t^{n+1/2}$$

Metode analisa ini memiliki kelebihan yaitu tidak membutuhkan iterasi saat mengintegrasikan waktu, tidak membutuhkan uji konvergensi, dan tidak melakukan invers matriks kekakuan. (Canonsburg, 2016)

### 2.15.5.1 Johnson-Cook Plasticity Model in ANSYS

Model ini digunakan untuk menggambarkan perilaku kekuatan material, biasanya logam, yang dikenai strain tinggi, tingkat regangan tinggi dan suhu tinggi. Perilaku seperti itu mungkin muncul dalam masalah pembebanan impulsif yang kuat karena dampak kecepatan tinggi. Dengan model ini, tegangan luluh bervariasi tergantung pada regangan, laju regangan, dan suhu. Model mendefinisikan tegangan luluh sebagai

$$\sigma_{\mathcal{Y}} = \left(A + B\dot{\varepsilon}^{P^n}\right)(1 + C\ln\dot{\varepsilon}^*)(1 - T^{*m})$$

Dimana:

A = Initial Yield Stress (MPa) B = strain hardening parameter (MPa)

- n = strain hardening exponent
- C = strain rate constant
- m = thermal softening exponent
$T^* = \text{homologous temperature} = \frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}}$  $\overline{\varepsilon_p} = \text{effective plastic strain}$  $\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\varepsilon}^*}{\dot{\varepsilon_0}} \text{ dimensionless strain rate}$ 

Ekspresi pada set kurung pertama memberikan tegangan sebagai fungsi regangan ketika  $\overline{\epsilon_p} = 1/s$  dan T<sup>\*</sup> = 0 (mis. Untuk percobaan laboratorium pada suhu kamar). Konstanta A adalah tegangan luluh dasar pada strain rendah sedangkan B dan n mewakili efek pengerasan regangan.

Ekspresi pada set kurung kedua mewakili efek dari laju regangan pada kekuatan luluh dari material. Laju regangan referensi yang digunakan untuk mengukur data material digunakan untuk menormalkan peningkatan laju regangan plastis. 1.0 / detik digunakan secara default.

Ekspresi pada set kurung ketiga mewakili pelunakan termal sedemikian rupa sehingga tegangan luluh turun ke nol pada suhu leleh Tmelt.

Model kekuatan Johnson-Cook dapat digunakan dalam semua jenis elemen dan dalam kombinasi dengan semua persamaan keadaan. (Canonsburg, 2016)

#### 2.15.5.2 Shock EOS Linear

Persamaan Rankine-Hugoniot untuk kondisi loncatan kejut dapat dianggap sebagai mendefinisikan suatu relasi antara pasangan variabel  $\rho$  (densitas), P (tekanan), e (energi), naik (Kecepatan partikel) dan U (guncangan kecepatan).

Dalam banyak eksperimen dinamis membuat pengukuran naik dan telah ditemukan bahwa untuk sebagian besar padatan dan banyak cairan di berbagai tekanan ada *hub*ungan linier empiris antara dua variabel ini:

$$U = c_0 + su_p$$

Maka mudah untuk membuat bentuk persamaan keadaan berdasarkan Mie-Gruneisen berdasarkan guncangan Hugoniot:

$$P = P_H + \gamma_\rho (e - e_H)$$

dimana diasumsikan bahwa  $\rho = \gamma_0$ ,  $\rho 0 =$  konstan dan

$$P_H = \frac{P_0 C_0^2 (1+\mu)}{[1-(s-1)\mu]^2}$$

$$e_H = \frac{1}{2} \frac{P_H}{P_0} \left( \frac{\mu}{1+\mu} \right)$$

Perhatikan bahwa untuk s> 1 formulasi ini memberikan nilai pembatas kompresi karena tekanan cenderung tak terbatas. Penyebut persamaan pertama di atas menjadi nol dan karenanya tekanan menjadi tak terbatas untuk 1– (s-1)µ= 0 memberikan kepadatan maksimum  $\rho = s \rho 0$  (s-1). Namun, jauh sebelum rezim ini didekati, asumsi konstanta  $\gamma_{\rho}$  mungkin tidak valid. Selanjutnya, asumsi variasi linier antara kecepatan kejut U dan kecepatan partikel  $u_p$  tidak tahan untuk kompresi yang terlalu besar. Model linear Shock EOS memungkinkan Anda memasukkan *hub*ungan kecepatan kejut kuadratik - kecepatan partikel secara opsional dari bentuk:

(Canonsburg, 2016)

$$U_s = C_0 + S_1 u_p + S_2 u_p^2$$

Dimana:

 $S_{1},S_{2}$  = empirical parameter

 $C_0$  = sound velocity (m/s)  $\gamma$  = Gruneisen Coefficient

# 2.15.6 Aplikasi Metode Elemen Hingga

Pembentukan logam adalah proses manufaktur yang digunakan secara luas karena dapat membuat dimensi yang presisi dengan limbah yang sedikit, serta meningkatkan sifat mekanik benda kerja. Namun, urutan pembentukan desain baru bukanlah tugas yang mudah, dan itu membutuhkan banyak percobaan dan penyesuaian untuk mencapai kondisi produksi yang memuaskan. Metode *"trial and error"* empiris telah secara tradisional diterapkan pada desain pembentukan logam, namun, pendekatan ini mahal dan memakan waktu.

Simulasi komputer telah menjadi andalan dan dapat diterima dalam industri pembentukan logam sejak 1980-an. Analisis pembentukan logam dapat dilakukan dalam tiga skala pemodelan (Koop et al., n.d.). Skala pertama adalah pemodelan global, yang hanya memprediksi beban proses atau pekerjaan. Metode analitik digunakan untuk tujuan ini. Analisis skala lokal digunakan untuk memperkirakan variabel termo-mekanis seperti regangan, laju regangan, dan suhu.

Dengan pengembangan luas dalam mekanika komputasi, metode numerik telah digunakan sebagai alternatif ekonomis untuk melakukan pemodelan lokal. Pemodelan skala mikro menghitung evolusi mikro-struktural selama proses pembentukan. Karena analisis skala global hanya berlaku untuk situasi sederhana dan pemodelan mikro masih baru dan hanya memberikan hasil untuk kondisi tertentu, pemodelan lokal adalah pendekatan yang paling populer. Di antara metode lain, Metode Elemen Hingga (FEM) banyak digunakan dalam analisis pembentukan logam karena kemampuannya untuk memodelkan geometri alat dan bagian yang rumit dalam proses pembentukan.

Gambar 2.22 menunjukkan bagaimana analisis elemen hingga (FEA) dapat digunakan dalam desain pembentukan logam.

FEA dapat memberikan informasi terperinci untuk membentuk desainer seperti membentuk kekuatan, prediksi cacat, pola aliran, dan konsentrasi tegangan pada cetakan. Keluaran regangan, misalnya, dapat menampilkan area konsentrasi regangan untuk mengidentifikasi kemungkinan kegagalan awal pada alat atau untuk memprediksi masalah kemampuan bentuk. Oleh karena itu, desain fabrikasi bagian dapat dimodifikasi untuk meningkatkan masa pakai alat atau untuk meningkatkan kondisi kemampuan bentuk, dan desain baru dapat diperiksa dengan simulasi elemen hingga berulang sebelum pengujian eksperimental.





Banyak aspek pembentukan dapat dianalisis dari solusi simulasi. Misalnya, aliran tidak teratur, yang dapat menyebabkan cacat internal produk, dapat dideteksi dari simulasi. Masalah pengisian die juga dapat diprediksi oleh pola deformasi dan solusi tegangan / regangan. Deformasi elastis dari alat, yang harus dikontrol untuk mempertahankan toleransi yang diinginkan, dapat diverifikasi dalam prediksi analisis elemen hingga.

Konvergensi solusi dari metode ini diperiksa dengan mengurangi langkah waktu, dan dengan meningkatkan jumlah node dari model analisis. (Roque & Button, 2000)

# 2.16 Penelitian Terdahulu

Dalam menyusun laporan ini, penulis meninjau beberapa ber*hub*ungan penelitian terdahulu yang masih dengan pembentukan roda kereta. Yang pertama yaitu penelitian yang dilakukan oleh Yanju wang dengan judul "Research on hot forging process of C grade steel train wheel". Dalam penelitiannya dijelaskan bahwa baja grade C telah luas digunakan sebagai material dari roda kereta. Roda kereta diproduksi di bawah temperatur tinggi dan terdeformasi plastis. Yanju Wang melakukan simulasi proses forging menggunakan metode finite element aplikasi DEFORM. FEM digunakan dengan untuk mengoptimalkan rasio distribusi material dari hub. serta mengurangi kecacatan dan meningkatkan efisiensi produktivitas. Pembentukan roda yang dilakukan hanya 2 tahap, yaitu preforming dan final forging.

Tujuan dari *pre-forming* adalah mendistribusikan material benda kerja secara wajar dan diharapkan material mengalir pada bagian *hub* dan *rim*. Skema pemodelan yang dilakukan dapat dilihat pada gambar 2.23. Ketebalan benda kerja pada *pre-forming* menjadi parameter penting produk terbentuk dengan baik. Dalam proses *pre-forming*, hasil dari kalkulasi mendapatkan nilai H sebesar 65 – 70 mm. Lalu pada *final forging*, ketebalan benda kerja tereduksi menjadi 48 mm. Karena simulasi ini adalah *hot forming*, maka parameter seperti temperatur awal *billet*, *die*, dan lingkungan harus diatur terlebih dahulu.



pre-formingfinal forgingGambar 2. 23Proses panas pembentukan roda



Gambar 2. 24 Proses pre-forming roda kereta



Gambar 2. 25 Proses pre-forming roda kereta tampak isometri

Setelah proses *pre-forming* selesai, hasil simulasi ini akan dilanjutkan ke proses *final forging* dengan cara di *export* ke DEFORM 2D dengan format .dfx. Kemudian proses *set up* dan *meshing* dilakukan kembali. Gambar 2.26 adalah pemodelan final forging.



Gambar 2. 26 Skema proses final forging

Efek dari dua parameter penempaan yang berbeda pada penempaan akhir dibandingkan (Gbr.2.27). Terlihat, ukuran awal *billet* adalah sama (535mm), jika parameter *pre-forming* H (Gbr.2.24) berbeda, fitur akhir roda akan berbeda. Hasil simulasi numerik menunjukkan bahwa jika ketebalan *pre-forming billet* adalah 70mm, roda *final forging* akan dalam kondisi baik (kanan). Jika ketinggian *pre-forming* H adalah 65mm, cacat pengisian akan terjadi pada proses penempaan roda kereta akhir (kiri). Jelas, penentuan parameter yang wajar sangat diperlukan untuk proses penempaan roda kereta.





(1)535mm $\rightarrow$ (H)65mm $\rightarrow$ 48mm (2) 535mm $\rightarrow$ (H)70mm $\rightarrow$ 48mm

Gambar 2. 27 Perbandingan hasil *final forging* dengan nilai H yang berbeda



Gambar 2. 28 Pengaruh kecepatan terhadap beban penekanan

Selain parameter ketebalan *pre-forming*, kecepatan dalam proses forging juga berpengaruh terhadap *forming load* atau beban penekanan yang dibutuhkan. Pada gambar 2.28, *trendline* menunjukkan variasi kecepatan proses simulasi yang berupa waktu pembentukan, ternyata berpengaruh terhadap beban penekanan. Dimana semakin cepat proses pembentukannya, semakin besar beban yang dibutuhkan.

Penelitian selanjutnya adalah penelitian yang dilakukan oleh Tapas Gangopadhyay et al (2010) dengan judul "*Threedimensional finite element analysis of multi-stage hot forming of railway wheels*". Tapas melakukan simulasi *hot forming* roda kereta dengan metode analisa *three dimensional finite element* menggunakan *software* DEFORM 3D yang meliputi proses *upsetting, forging, dan punching.* Studi ini menunjukkan bahwa desain, optimisasi, dan analisis gangguan proses untuk proses pembuatan roda kereta api multi-tahap dapat dilakukan secara efisien dengan *three dimensional finite element simulation.* 

Untuk proses *preforming*, pemodelan yang dilakukan adalah membuat benda kerja berbentuk silindris dengan diameter 385 mm dan ketebalan 615 mm. Material untuk *billet* yang digunakan adalah baja AISI 1045 karena komposisinya yang mirip dengan material roda. Tabulasi *flow stress material* pada temperatur 899°, 999°, 1099° C dan *strain rate* 0,1/s, 100/s yang digunakan didapat dari *database software* DEFORM 3D, juga *temperature dependent thermal conductivity* dan *heat capacity* pada kisaran 100° – 1485°C. Untuk mengurangi durasi simulasi, model benda kerja yang disimulasikan hanya 1/12 nya. *Element* yang digunakan adalah *tetrahedral* dengan jumlah 18400 *element*. Sedangkan *dies* dimodelkan sebagai objek yang *rigid*, dengan *element* sebanyak 33076 dan 33012 atas dan bawah. Material untuk *dies* yang digunakan adalah baja AISI H13. *Preforming* dilakukan dengan kecepatan *dies* sebesar 43,36 mm/s, untuk mengurangi ketebalan benda kerja hingga 125 mm.



Gambar 2. 29 FE mesh proses pre forming

Hasil *pre-forming* dapat dilihat pada gambar 2.29. Deformasi *meshing* pada gambar 2.29 pada akhir proses *upsetting*, sudah sesuai dengan bentuk *preform* namun terdapat cacat lipatan pada sisi atas dan bawah permukaan *billet*. Berdasarkan gambar 2.29, proses *pre-forming billet* untuk mengubah tebalnya menjadi 125 mm, dibutuhkan *press load* sebesar 32 x 10<sup>5</sup> N atau 3,2 MN.



Gambar 2. 30 Axial compressive stress pada rasio radius yang berbeda pada proses preforming

Perubahan temperatur dan tegangan pada *billet* dianalisa dengan membuat titik pada 7 rasio radius (RR) yang bervariasi dari r/8 sampai 7r/8, dimana r adalah titik radius maksimum dari koordinat aksial *billet* hasil *preform*. Pada gambar 2.30 dapat dilihat bahwa distribusi *axial compressive stress* semakin berkurang seiring meningkatnya RR. *Axial stress* juga meningkat seiring meningkatnya *dies stroke* dan sebagai hasilnya, press load juga meningkat (gambar 2.31).



Gambar 2. 31 Press load saat proses preforming



Gambar 2. 32 Mesh hasil forging

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



Gambar 2. 33 *Effective stress* pada 7 titik rasio radius saat proses forging dari tebal 125 mm

Berdasarkan pengamatan pada 7 titik yang dibagi berdasarkan rasio jari-jari billet, didapatkan bahwa nilai effective stress berfluktuasi seiring meningkatnya die stroke. Namun pada stroke maksimal, didapatkan pada titik 4r/8 nilai effective stress tertinggi, yaitu pada area web. Didapatkan effective stress terendah pada titik 2r/8 pada area hub.

Selanjutnya adalah penelitian yang dilakukan oleh Xiaohui SHEN et al (2015) dengan judul "*Experiment and simulation* of metal flow in multi-stage forming process of railway wheel". Penelitian yang dilakukan oleh Xiao hui SHEN ini adalah membandingkan antara hasil eksperimen dan simulasi proses pembentukan roda kereta dengan metode FEM untuk mengamati aliran logam. Proses pembentukan roda yang dilakukan meliputi proses upsetting, pre-forging, final forging, rolling, dan dishing. Keseluruhan simulasi dimodelkan dengan axisymmetric untuk mempermudah pengamatan aliran logam dalam arah radial. Aliran logam pada billet yang didapatkan dari hasil simulasi, divalidasi oleh eksperimen industri dengan menanam pin-pin baja pada billet. Garis alir pada simulasi memberikan informasi tentang aliran logam selama proses pembentukan. Informasi ini berguna untuk mengoptimasi desain dan mendeteksi cacat roda.

Eksperimen industri yang dilakukan bertujuan untuk menyelidiki aliran logam dan pengisian ruang pada cetakan selama pembentukan bertingkat roda kereta tipe HESA diameter 840 mm, dimana tipe ini dipakai untuk kereta kargo. Profil cetakan dan rangkaian tahapan pembentukan roda kereta ini dapat dilihat pada gambar 2.34.



Gambar 2. 34 Profil dan dimensi benda kerja dan rangkaian die dalam operasi *multistage* roda HESA

Penanaman pin baja pada *billet* sebelum pemanasan dilakukan untuk mengamati aliran logam, dimana ilustrasinya dapat dilihat pada gambar 2.35



Gambar 2. 35. Posisi dan ukuran pin yang ditanam pada billet

Pemodelan simulasi roda kereta yang dilakukan Xiao Hui Shen menggunakan *software* MSC. SuperForm. Semua *dies* didefinisikan sebagai *body* yang *rigid*. Tipe *element* yang digunakan untuk benda kerja pada simulasi adalah tipe *quadrilateral*. *Remeshing* otomatis dengan metode "*advanced front quad*" akan diaktifkan ketika *mesh* terdistorsi parah. Sifat fisik termal tergantung suhu berasal dari basis data material SuperForm dalam bentuk baja C60, yang memiliki komposisinya serupa dengan bahan roda baja CL60. Parameter yang didefinisikan pada pemodelan FEM adalah seperti pada tabel 2.3

Tabel 2. 3 Parameter untuk simulasi proses forging roda kereta

| Parameters  | Values |  |
|---|--------|--|
| Upper die speed/(mm • s <sup>-1</sup> )                                   | 50     |  |
| Initial temperature of the billet/°C                                      | 1230   |  |
| Temperature of the dies/ $^{\circ}\!\!\!C$                                | 700    |  |
| Ambient temperature/°C  | 20     |  |
| Contact heat transfer coefficient/(W $\cdot$ m $^{-2}$ $\cdot$ K $^{-1})$ |        |  |
| Convection heat transfer coefficient/(W $\cdot$ m^{-2} $\cdot$ K^{-1})    |        |  |
| Emissivity of the workpiece   |        |  |
| Heat conversion factor  | 0.9    |  |
| Shear friction coefficient  | 0.5    |  |

Kontur dan distribusi dari pin baja pada roda yang telah terdeformasi secara eksperimen, diilustrasikan pada gambar 2.36 a. dibandingkan dengan aliran pin baja pada roda yang terdeformasi dari hasil simulasi FEM (2.36 b), posisi pin baja ini terlihat kemiripan antar kedua proses, detailnya ditabelkan pada tabel 2.4.



(0)

**Gambar 2. 36.** Pin yang terdeformasi pada roda kereta hasil eksperimen (a) dan simulasi (b)

| Tabel 2. 4. Posisi | pin baj | a setelah | eksperimen | dan | simu | lasi |
|--------------------|---------|-----------|------------|-----|------|------|
|--------------------|---------|-----------|------------|-----|------|------|

|                    | LA  | Lc  | $L_1$ | L <sub>2</sub> | L4  | L <sub>5</sub> |
|--------------------|-----|-----|-------|----------------|-----|----------------|
| Simulated value    | 395 | 135 | 395   | 87             | 415 | 272            |
| Experimental value | 393 | 138 | 394   | 83             | 405 | 251            |

Aliran logam dapat dilihat dari pergerakan garis grid aksial dari *billet* sampai menjadi roda (gambar 2.37 a dan b). gambar 2.37 c dan d menunjukkan adanya "*neutral plane*" pada *web* ketika bentuk benda kerja hasil *pre-forging* dilanjutkan ke proses *final forging*. Pada proses *final forging*, logam di dalam *neutral plane* mengalir untuk mengisi ruangan *hub* pada *die*. Sedangkan logam pada luar *neutral plane* mengalir untuk mengisi ruangan *rim* pada *die*. Untuk meminimalkan beban *final forging*, *neutral plane* harus terjaga di tengah-tengah *web* roda selama tahap penempaan untuk memastikan *hub* dan *rim* terisi secara bersamaan. Namun, dalam produksi industri, lubang *hub* sering diisi sebelum ketebalan *web* mencapai nilai targetnya untuk roda dengan diameter luar kurang dari 960 mm. Gambar 2.37 (d) menunjukkan bahwa ruang *hub* terisi penuh ketika ketebalan *web* 36,6 mm, sedangkan ruang *rim* belum terisi sepenuhnya. Sebaliknya, *web* dikompresi untuk mencapai target ketebalannya yaitu 35,8 mm, hingga akhirnya ruang *rim* terisi 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. 37 Gridline pada tahap penempaan roda yang berbeda

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



Gambar 2. 38 Peralatan pendinginan roda

dari perlakuan adalah untuk Tujuan panas menyamaratakan struktur mikro pada rim pada arah radial dan axial. Setelah perlakuan panas selesai, rim ini di dinginkan dengan semprotan air pada permukaan tread. Proses pendinginan roda kereta ini meningkatkan kekuatan, meningkatkan ketahanan aus dan menginduksi residual stress yang diinginkan. Setelah proses pendinginan, roda ditempatkan di dalam tungku panas selama 2 sampai 5 jam. Selama fasa ini terdapat tension diantara bagian terluar rim yang lebih dingin, dan bagian dalam rim yang lebih panas. Proses panas ini menghasilkan compressive residual stress yang menguntungkan pada rim roda. Stres ini berkontribusi terhadap pencegahan terbentuknya retak rim pada roda. Fase-fase proses perlakuan panas dijabarkan pada tabel 2.5.

| Dhaca | hasa Process Duration |          | Film coefficient [W mm <sup>-2</sup> C <sup>-1</sup> ] |                          | Dulls town arothers <sup>0</sup> C |  |
|-------|-----------------------|----------|--|--------------------------|------------------------------------|--|
| Phase | PIOCESS               | Duration | Tread  | Other                    |                                    |  |
| 1     | Pre-quench            | 2 min    | 2.837 x 10 <sup>-5</sup>                               | 2.837 x 10 <sup>-5</sup> | Ambient temperature                |  |
| 2     | Quench                | 4 min    | 0.001766   | 2.837 x 10 <sup>-5</sup> | Ambient temperature                |  |
| 3     | Pre-reheat            | 2 min    | 2.837 x 10 <sup>-5</sup>                               | 2.837 x 10 <sup>-5</sup> | Ambient temperature                |  |
| 4     | Reheat                | 2 hr     | 2.837 x 10 <sup>-5</sup>                               | 2.837 x 10 <sup>-5</sup> | 510                                |  |
| 5     | Cooling               | 10 h     | 2.837 x 10 <sup>-5</sup>                               | 2.837 x 10 <sup>-5</sup> | Ambient temperature                |  |

 Tabel 2. 5
 Fase perlakuan panas



Gambar 2. 39 Tegangan sisa radial pada rim setelah proses pendinginan tapak

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



Gambar 2. 40 Tegangan tekan dan tarik maksimum roda kereta di arah aksial



Gambar 2. 41 Tegangan tekan dan tarik maksimum roda kereta dalam arah radial

Distribusi tegangan normal pada arah radial dan axial dari hasil proses perlakuan panas pada roda dapat dilihat pada gambar dibawah. Hasil untuk arah axial ditunjukkan oleh axis Y sedangkan untuk arah radial oleh axis Z. Berdasarkan gambar 2.42 dapat dilihat bahwa tegangan sisa axial di area tengah rim secara nominal adalah *tension* mencapai 103 MPa, sedangkan tegangan sisa axial secara nominal adalah *compression* di permukaan tread sebesar -150 MPa. Pada gambar tersebut juga dapat dilihat bahwa tegangan sisa radial secara nominal adalah *tension* pada area tengah rim antara 65 sampai 119 MPa, sedangkan tegangan sisa radial secara nomimal adalah *compression* pada permukaan tread sebesar -289 MPa.





Gambar 2. 42 Tegangan radial dan aksial roda kereta setelah pendinginan

# BAB 3 METODE PENELITIAN

## 3.1 Flowchart Penelitian

Metodologi Penelitian adalah sebuah upaya sistematis dalam rangka pemecahan masalah yang dilakukan, agar dapat menjawab permasalahan-permasalahan atau fenomena yang terjadi. *Flowchart* penelitian ditunjukkan pada gambar 3.1.





Gambar 3. 1 Flowchart Penelitian

Dalam bidang keteknikan, ada tiga metode yang dapat digunakan dalam proses penelitian, seperti tampak pada gambar 3.2. Setelah mengetahui macam – macam metode penelitian, penulis memutuskan menggunakan Penelitian Numerik berupa *Finite Element Method* (FEM) atau Metode Elemen Hingga (MEH). Dikarenakan objek penelitian dapat dikatakan kompleks sehingga untuk melakukan analisis eksplisit dinamis tidak dapat dilakukan dengan analisa perhitungan manual, sehingga pada penelitian ini menggunakan perhitungan metode elemen hingga dengan menggunakan *software* ANSYS Workbench.





#### 3.2 Observasi

Observasi merupakan langkah pertama yang dilakukan penulis dalam penelitian ini. Tujuan observasi adalah menentukan ruang lingkup permasalahan yang akan dijadikan penelitian. Dalam hal ini, observasi dilakukan dalam lingkup pembuatan roda kereta api untuk kereta api kecepatan sedang dengan proses *forging*.

## 3.3 Rumusan Masalah

Setelah melakukan observasi, penulis merumuskan masalah yang terdapat dalam lingkup observasi. Permasalahan akan berfokus tentang membuat pemodelan dan simulasi tiga dimensi dari proses *forging* roda kereta api, lalu analisis hasil dari simulasi sehingga didapatkan bentuk roda kereta api kecepatan sedang yang sesuai dengan bentuk *dies* serta tegangan residual yang terbentuk setelah proses *forging*.

## 3.4 Studi Literatur

Studi literatur dilakukan oleh peneliti dengan tujuan mendapatkan informasi lebih mendalam serta menunjang

penelitian. Studi literatur yang pertama dilakukan adalah mencari jurnal-jurnal penelitian terdahulu yang meneliti tentang topik yang sejenis seperti analisa proses *forging*, dimensi roda kereta berkecepatan sedang, serta material roda kereta. Studi literatur selanjutnya adalah mempelajari beberapa *textbook* mengenai *plastic wave*, plastisitas, dan pengaruh *strain rate* pada deformasi material.

# 3.5 Pemodelan

Penulis melakukan simulasi *forging* 2 step yang terdiri dari *pre-forming* dan *final forging*. Tujuan dari *pre-forming* adalah untuk mendistribusikan material secara wajar ke daerah *hub* dan *rim* sehingga mempermudah proses selanjutnya yakni *final forging*.

Sebelum melakukan pemodelan, perlu dilakukan pencarian data-data pendukung seperti dimensi roda kereta berkecepatan medium melalui jurnal-jurnal tentang roda kereta, lalu menentukan data yang sesuai dan yang akan dipakai sebagai input dalam simulasi.

Setelah data-data pendukung didapatkan, selanjutnya adalah memodelkan dimensi roda kereta yang sudah ditentukan dengan program CAD (*computer-aided design*) dimana peneliti menggunakan *software* pemodelan 3D *Solidworks*. Dari roda kereta yang telah dimodelkan tadi dapat dimodelkan cetakan *forging* atau yang disebut dengan *dies*. Berikut adalah diagram alir yang menggambarkan tahapan-tahapan yang dilakukan peneliti mulai dari pemodelan 3D hingga simulasi.





Gambar 3. 3 Flowchart pemodelan

Penjelasan lebih rinci mengenai tahapan-tahapan pada *flowchart* pemodelan diatas adalah sebagai berikut

# 3.5.1 Penentuan Data Awal

Data awal berupa dimensi roda kereta yang akan dibentuk, data material roda, ketebalan *billet*, juga kecepatan dan beban penekan. Dimensi roda kereta dapat dilihat pada gambar 3.4. Material yang digunakan dalam pemodelan untuk *billet* yaitu *steel* AISI 1045 yang komposisinya mirip dengan roda kereta (Gangopadhyay et al., 2011). Selain itu, steel AISI 1045 juga merupakan baja yang umum digunakan di Asia dan luas digunakan untuk komponen permesinan yang membutuhkan kekuatan dan ketahanan aus yang tinggi seperti crankshaft, poros, roda gigi, baut, connecting rod, dsb namun dengan harga yang murah dan mudah didapatkan.

Material billet dimodelkan Johnson-Cook Plasticity Model. Model ini cocok untuk masalah di mana tingkat regangan bervariasi pada kisaran besar dan perubahan suhu karena disipasi plastis menyebabkan pelunakan material. Namun dalam pencarian data pendukung berupa parameter Johnson-Cook ini, peneliti sulit menemukan untuk parameter yang digunakan dalam kasus yang sama yaitu forging. Berdasarkan penelitian (Duan et al., 2010), parameter J-C digunakan dalam pemodelan high speed machining dalam proses manufaktur. Di mana perbedaan paling penting dalam mekanika pemotongan antara high speed machining dan conventional machining adalah kecepatan permesinan itu sendiri. Model Johnson-Cook digunakan untuk simulasi morfologi dan gava pemotongan chip. Model ini adalah strain rate dan temperature dependent, visco-plastik model material yang menggambarkan hubungan stres, regangan, laju regangan dan temperatur. Sangat cocok untuk masalah di mana tingkat regangan bervariasi pada rentang yang luas (10<sup>2</sup>s<sup>-1</sup> hingga 10<sup>6</sup> s<sup>-1</sup>), dan suhu berubah karena deformasi plastik yang disebabkan oleh pelunakan termal. Dan berdasarkan penelitian (Kang & Jeon, 2018) yang mengidentifikasi batas hidrodinamik pada material AISI 1045 dan AISI 4340 yang memiliki densitas sama namun kekuatan yang berbeda ketika ditembus oleh SCJ. Komponen hulu ledak muatan terjadi deformasi besar di bawah beban laju regangan tinggi karena tekanan ledakan. Efek pengerasan dari kondisi seperti itu dipertimbangkan dengan menerapkan hubungan konstitutif Johnson-Cook. Sedangkan hubungan tekanan dan volume karena dampak hypervelocity dipertimbangkan dengan persamaan keadaan Mie – Grüneisen.

Apabila dibandingkan dari penelitian oleh (Duan et al., 2010) dan (Kang & Jeon, 2018) di mana keduanya adalah kasus yang berbeda, nilai parameter Johnson-Cook yang digunakan ternyata memiliki kesamaan data. Sehingga peneliti mencoba menggunakan parameter J-C tersebut, namun perlu diverifikasi lagi antara hasil simulasi terhadap hasil perhitungan menggunakan persamaan J-C ini. Sebaiknya, perlu pencarian yang lebih jauh lagi tentang parameter Johnson-Cook model AISI 1045 yang digunakan dalam simulasi proses forging agar hasil simulasi yang didapatkan lebih mendekati keadaan yang sebenarnya. Sifat mekanis yang meliputi parameter persamaan konstitutif *Johnson and Cook* dan *Mie-Gruneisen Equation of State* dijabarkan seperti pada tabel 3.1. Sedangkan model material untuk cetakan (*dies*) adalah *steel* AISI H13 linear elastis dengan nilai properties material seperti pada tabel 3.2.



# Gambar 3. 4 Geometri potongan menyilang roda kereta dengan diameter 920 mm

# **Tabel 3. 1** Parameter Johnson and Cook dan Mie GruneisenEquation of State material billet AISI 1045 steel (Duan et al.,<br/>2010)

| Ι                     | STILAH                       | SATUAN            | NILAI |
|-----------------------|------------------------------|-------------------|-------|
| D                     | ensity (ρ)                   | Kg/m <sup>3</sup> | 7850  |
| Spec                  | ific heat ( $C_0$ )          | J/Kg.C            | 480   |
| She                   | ar modulus                   | MPa               | 80000 |
|                       | Initial yield stress         | MPa               | 553   |
| Johnson and           | (A)                          |                   |       |
| Cook                  | Strain hardening             | MPa               | 600   |
| constitutive          | constant (B)                 |                   |       |
| equation              | Strain hardening             | -                 | 0,234 |
| parameters            | <i>exponent</i> ( <i>n</i> ) |                   |       |
|                       | Thermal softening            | -                 | 1     |
|                       | coefficient (m)              |                   |       |
|                       | Strain rate constant         | -                 | 0,013 |
|                       | ( <i>C</i> )                 |                   |       |
|                       | Melting                      | °K                | 1733  |
|                       | temperature (Tm)             |                   |       |
|                       | Reference strain             | /sec              | 1     |
|                       | rate                         |                   |       |
| Mie-                  | Gruneisen                    |                   | 1,954 |
| Gruneisen coefficient |                              |                   |       |
| Equation of           | Parameter C1                 | m/s               | 4570  |
| State                 | Parameter S1                 |                   | 1,49  |
|                       | Parameter                    | s/m               | 0     |
|                       | quadratic S2                 |                   |       |

| ISTILAH                    | SATUAN            | NILAI |
|----------------------------|-------------------|-------|
| Density (ρ)                | Kg/m <sup>3</sup> | 7800  |
| Specific heat ( $C_0$ )    | J/Kg.C            | 460   |
| Shear modulus              | MPa               | 81000 |
| Tensile Strength, Ultimate | 1990              | MPa   |
| Tensile Strength, Yield    | 1650              | MPa   |
| Modulus of Elasticity      | 210               | GPa   |
| Bulk Modulus               | 160               | GPa   |
| Poissons Ratio             | 0,3               | -     |

Tabel 3. 2 AISI H13 Material properties for dies

Ketebalan billet dari beberapa literatur terdapat pada tabel berikut

Tabel 3. 3 Reduksi ketebalan billet beberapa literatur

| No | Literature    | Title                      | Reduction |
|----|---------------|----------------------------|-----------|
| 1. | (Koop et al., | Multilevel Simulation of   | 47 %      |
|    | n.d.)         | Metal Forming Process      |           |
| 2. | (Oh, 1982)    | Finite Element Analysis of | 69 %      |
|    |               | Metal Forming              |           |
| 3. | (Necaticora,  | Friction Analysis in Cold  | 67 %      |
|    | 2004)         | Forging                    |           |

Reduksi ketebalan billet yang peneliti gunakan

% reduction = 
$$\left|\frac{25 - 80}{80}\right| x \ 100\% = 68,75\%$$

Untuk menentukan ketebalan awal billet yang akan digunakan dalam simulasi, peneliti mengacu pada beberapa literatur tentang *cold forging* seperti yang ditabelkan pada tabel 3.3. Karena ketebalan paling kecil dari roda yang akan dibentuk adalah 25 mm. maka kira-kira ketebalan awal yang dapat digunakan adalah sebesar kurang lebih 80 mm.

| No | Ketebalan <i>billet</i> (mm) |
|----|------------------------------|
| 1. | 76                           |
| 2. | 77                           |
| 3. | 78                           |
| 4. | 79                           |
| 5. | 80                           |

Tabel 3. 4 Variasi ketebalan awal billet

Besar pembebanan juga berpengaruh terhadap hasil forging. Berdasarkan *trial and error*, penulis menentukan variasi pembebanan proses forging yang dijabarkan pada tabel sebagai berikut

Tabel 3. 5Pembebanan pre-forming

| No | Besar pembebanan (MN) |
|----|-----------------------|
| 1. | 250                   |

| 11 | forgin | g        |
|----|--------|----------|
| l  | $l_1$  | l forgin |

| No | Besar pembebanan (MN) |
|----|-----------------------|
| 1. | 180                   |
| 2. | 190                   |
| 3. | 200                   |
| 4. | 210                   |
| 5. | 220                   |

| Pre-forming |                 | Final forging   |
|-------------|-----------------|-----------------|
| Ketebalan   |                 |                 |
| awal        | Pembebanan (MN) | Pembebanan (MN) |
| 76          |                 | 180             |
| 77          |                 | 190             |
| 78          | 250             | 200             |
| 79          |                 | 210             |
| 80          |                 | 220             |

 Tabel 3. 7 Parameter untuk simulasi forging roda kereta api (variasi)

## 3.5.2 Proses Desain

Proses desain tidak dilakukan langsung pada *software* ANSYS melainkan menggunakan *software* Solidworks untuk memudahkan penulis dalam merancang desain karena bentuk yang cukup rumit, dan untuk memudahkan dalam memfiksasi *file* desain yang benar agar bisa di impor ke dalam *software* ANSYS, dimana *file* desain nanti akan berformat .IGS. Langkah-langkah dalam mendesain pemodelan *forging* adalah sebagai berikut

a. Membuka halaman baru dalam bentuk *part* dan memilih *plane* untuk membuat *sketch* baru



Gambar 3.5 Halaman kerja baru pada Solidworks



b. Membuat *sketch* sesuai data dimensi yang telah ditentukan

Gambar 3. 6 Sketch roda

c. Merevolve sketch roda untuk membuat daging benda





d. Desain roda yang diinginkan





Gambar 3. 8 Pemodelan 3D roda kereta



Gambar 3.9 Pemodelan 3D penampang menyilang roda kereta

e. Membuat cetakan (*dies*) *upper* dan *lower* berdasarkan desain roda yang telah dibuat, dengan cara menambah daging pada sisi atas dan bawah roda dengan memisah *sketch* roda menjadi dua bagian pada bagian tengah.



Gambar 3. 10 Sketch cetakan roda

f. Merevolve sketch dies untuk membuat daging benda dengan memilih axis pada garis sumbu arah Y



# Gambar 3. 11 Dies final forging

Dengan mengacu beberapa referensi, penulis memodifikasi bentuk dies *pre-froming* berdasarkan bentuk *dies final forging*. Bentuk dies pre-forming dapat dilihat pada gambar 3.12



(b)

Gambar 3. 12 Dies pre-forming (a) sketch (b) solid model

Tahap desain *dies upper* dan *lower* telah selesai, lalu *file* tersebut disimpan dengan format .IGS agar bisa diimpor pada program ANSYS. Selanjutnya adalah tahap simulasi dalam program ANYS 19.2

## 3.5.3 Simulasi

# 3.5.3.1 Pre-forming

Pada penelitan ini, simulasi yang dilakukan menggunakan *software* elemen hingga yaitu ANSYS Workbench versi 19.2 subprogam *explicit dynamics*. Sebelum melakukan simulasi perlu dilakukan proses *set up* pada program agar program dapat menjalankan perintah simulasi dengan benar. Karena simulasi yang pertama dilakukan adalah simulasi *pre-forming*. Maka parameter yang di *set up* adalah parameter untuk proses *pre-forming*.

# a. Mendefinisikan Engineering Data

Engineering data merupakan fitur untuk memilih dan mengatur jenis material yang akan digunakan pada simulasi. Jenis material yang akan digunakan pada *dies* adalah structural steel, sedangkan untuk billet, jenis material yang digunakan adalah structural steel non linear, dengan memasukkan data johnson and cook strength dan EOS linear sesuai tabel 3.1 pada engineering data. Material billet ini diharapkan tidak pecah atau mengalami failure ketika mengalami proses penempaan, namun sudah mengalami deformasi plastis. Karena apabila dalam prosesnya material yang digunakan belum melewati titik luluh nya, maka ketika beban dihilangkan material akan kembali ke bentuk semula sehingga tidak terbentuk roda sesuai yang diinginkan.
| operti | es of Outline Row 3: AISI 1045 |             |              |
|--------|--------------------------------|-------------|--------------|
|        | A                              | 8           | c            |
| 1      | Property                       | Value       | Unit         |
| 2      | Material Field Variables       | 1 Table     |              |
| 3      | 2 Density                      | 7850        | kg m^-3      |
| 4      | 🚰 Specific Heat, Ca            | 477         | J kg^-1 C^-1 |
| 5      | Johnson Cook Strength          |             |              |
| 6      | Strain Rate Correction         | First-Order |              |
| 7      | Initial Yield Stress           | 553         | MPa          |
| 8      | Hardening Constant             | 600,8       | MPa          |
| 9      | Hardening Exponent             | 0,234       |              |
| 0      | Strain Rate Constant           | 0,013       |              |
| 1      | Thermal Softening Exponent     | 1           |              |
| 2      | Melting Temperature            | 1733        | к            |
| 3      | Reference Strain Rate (/sec)   | 1           |              |
| 14     | 🔛 Shear Modulus                | 80000       | MPa          |
| 15     | 😑 🔀 Shock EOS Linear           |             |              |
| 16     | Gruneisen Coefficient          | 1,954       |              |
| 7      | Parameter C1                   | 4570        | m s^-1       |
| 18     | Parameter S1                   | 1,49        |              |
| 19     | Parameter Quadratic 52         | 0           | s m^-1       |

| 1  | \   |
|----|-----|
| 1  | a١  |
| ٠. | aı  |
| `` | ~ / |

| Propertie | Properties of Outline Row 4: h13 |                                     |            |  |  |  |  |
|-----------|----------------------------------|-------------------------------------|------------|--|--|--|--|
|           | А                                | В                                   | с          |  |  |  |  |
| 1         | Property                         | Value                               | Unit       |  |  |  |  |
| 2         | 🔀 Material Field Variables       | III Table                           |            |  |  |  |  |
| 3         | 🔀 Density                        | 7,8                                 | g cm^-3    |  |  |  |  |
| 4         | Isotropic Elasticity             |                                     |            |  |  |  |  |
| 5         | Derive from                      | Young's Modulus and Poisson's Ratio |            |  |  |  |  |
| 6         | Young's Modulus                  | 2,15E+05                            | MPa 💌      |  |  |  |  |
| 7         | Poisson's Ratio                  | 0,3                                 |            |  |  |  |  |
| 8         | Bulk Modulus                     | 1,7917E+11                          | Pa         |  |  |  |  |
| 9         | Shear Modulus                    | 8,2692E+10                          | Pa         |  |  |  |  |
| 10        | 🔁 Specific Heat, Co              | 434                                 | Jkg^-1C^-1 |  |  |  |  |

(b)

## Gambar 3. 13 Penentuan engineering data (a) Dies (b) Billet

## b. Mengimpor geometri cetakan

Setelah menentukan jenis material di *engineering data*, selanjutnya adalah mengimpor geometri cetakan dengan format .IGS yang telah dibuat ke dalam sub program ANSYS yaitu *design modeller*.



81

#### Gambar 3. 14 Import geometri ke dalam ANSYS Design Modeller

#### c. Mendesain *billet* (benda kerja)

Beda kerja (*billet*) didesain di dalam program *design modeller* untuk memudahkan dalam memvariasikan ketebalan *billet* dan mengatur posisi pemodelan *forging* yang ingin disimulasikan. Di dalam *design modeller* juga dapat membuat potongan menyilang dengan fitur *symmetri* untuk mempercepat proses simulasi dan juga memudahkan analisa *filling billet* pada *dies*. Desain *billet* diposisikan berada diantara *upper* dan *lower die*. *Upper die* diposisikan sangat dekat dengan *billet* untuk mempercepat proses simulasi.



Gambar 3. 15 Desain billet full



Gambar 3. 16 Model Symmetri

#### d. Symmetric region

Karena model 3D dibuat simetri untuk mengurangi beban perhitungan, maka pada sisi perpotongan diberikan kondisi batas *symmetric region. Symmetric region* diberikan pada *plane* XY searah sumbu Z dan plane ZY searah sumbu X . Kondisi batas ini diberikan supaya model memiliki perlakuan seperti model penuh. Gambar 3.17 merupakan sisi perpotongan yang diberi *symmetric region*.



Gambar 3. 17 Symmetric region bidang XY



Gambar 3. 18 Symmetric region bidang ZY

#### e. Menentukan jenis kontak

Keluar dari program *design modeller*, selanjutnya masuk ke program *mechanical modeller* untuk melakukan proses *set up*. Karena dalam simulasi ini terdapat interaksi berupa tumbukan antara 2 benda, maka jenis kontak atau interaksi tersebut didefinisikan terlebih dahulu. Permukaan yang mengalami kontak adalah permukaan *billet* terhadap permukaan *dies*. Jenis kontak yang digunakan adalah *frictional* dengan *behavior symmetric*. Dimana nilai *friction coefficient* untuk *cold forging* adalah sebesar 0,1, *dynamic coefficient* sebesar 0,05, dan *decay constant* sebesar 2. (Necaticora, 2004)



Gambar 3. 19 Penentuan jenis kontak

## f. Meshing

Setelah mendefinisikan model, material, dan kontak, maka tahap selanjutnya adalah *meshing*. *Meshing* berguna membagi model 3D menjadi model diskrit yang mana merupakan inti dari *Finite Element Method*. Semakin banyak elemen *meshing* maka hasil yang didapat semakin mendekati nilai real. Pada *software* terdapat beberapa metode atau bentuk *mesh* yang dapat digunakan, yaitu *tetrahedrons, hex dominant, sweep*, dan *multizone*. Jumlah dan ukuran tiap elemen juga dapat divariasi dengan mengubah parameter seperti *size function, element size, relevance center,* atau *span angle center*.

g. Menentukan pembebanan

Dalam proses *forging* terdapat 2 bagian cetakan, *upper* dan *lower*. *Lower die* sebagai dudukan daripada *billet* dan *upper die* yang bekerja menempa *billet*. Sehingga dalam pengaturannya, *upper die* diseleksi sebagai komponen yang bergerak dan yang memberikan beban.



## Gambar 3. 20 Penentuan letak pembebanan

h. Menentukan letak tumpuan

Lower die sebagai dudukan billet diseleksi menjadi fixed support



#### Gambar 3. 21 Penentuan letak tumpuan

i. Uji konvergen

Setelah melalui proses set up di atas, model dapat disimulasikan sehingga didapatkan nilai distribusi tegangan normal pada model. Akan tetapi, kita belum tahu apakah hasil ini valid, karena kita belum dapat menyimpulkan apakah bentuk *mesh* yang digunakan tadi sudah benar-benar merepresentasikan domain fisis dari model. Oleh karena itu perlu dilakukan uji konvergensi terhadap beberapa variasi bentuk *mesh*.

Semakin kecil ukuran elemen atau semakin banyak elemen memang hasil yang dihasilkan akan lebih valid, akan tetapi hal ini akan berpengaruh pada proses simulasi yang memakan waktu lebih lama. Oleh karena itu, uji konvergensi juga diperlukan untuk mengoptimasi validitas hasil dan lama proses simulasi. Uji konvergensi dilakukan dengan cara membuat grafik *hub*ungan antara ukuran mesh dengan besar tegangan pada suatu titik dari hasil simulasi model.

| Mesh<br>(mm) | Normal Stress<br>(MPa) | Quality  | Nodes | Element |
|--------------|------------------------|----------|-------|---------|
| 15           | 823,63                 | 0,983    | 5172  | 4040    |
| 14           | 958,59                 | 0,976    | 6036  | 4735    |
| 13           | 923,94                 | 0,9832   | 8043  | 6516    |
| 12           | 992,09                 | 0,9836   | 9408  | 7650    |
| 11           | 942,37                 | 0,9844   | 12632 | 10542   |
| 10           | 927,6                  | 0,9818   | 15160 | 12698   |
| 9            | 978,31                 | 0,983493 | 21033 | 17992   |
| 8            | 994,54                 | 0,985413 | 29600 | 25722   |
| 7            | 997,38                 | 0,9842   | 41811 | 36880   |
| 6            | 986,87                 | 0,987114 | 66001 | 59340   |

Tabel 3.8 Uji konvergen



## Gambar 3. 22 Uji konvergen

Berdasarkan gambar 3.22 dapat diketahui bahwa awalnya terjadi perubahan nilai tegangan yang cukup fluktuatif pada ukuran mesh 15 sampai 9 mm. Kemudian setelah ukuran mesh diperkecil

lagi dari 8 hingga 6 mm didapatkan nilai tegangan pada suatu titik yang tidak berubah secara signifikan. Apabila dicek error dari ukuran 9 ke 8, didapatkan nilai sebesar 1,6 %, dari 8 ke 7 mm sebesar 0,2 %, dar 7 ke 6 sebesar 1 % sehingga model sudah dapat dikatakan konvergen. Karena tujuan dari uji konvergensi ini adalah mendapatkan ukuran mesh dengan banyak element dan node yang dapat merepresentasikan domain fisis yang benar pada model dan juga optimasi lama proses simulasi, maka dipilihlah ukuran mesh 8 mm dengan banyak nodes dan element sebesar 29600 dan 25722 masing-masing.



Gambar 3. 23 Meshing pada simulasi

## 3.5.3.2 Proses Final Forging

Setelah proses *pre-forming* selesai, hasil simulasi yang berupa *billet* terdeformasi akan menjadi *billet* awal untuk proses *final forging*. Rangkaian *workflow* seperti pada gambar 3.24 diperlukan untuk mengekspor hasil simulasi. Lalu selanjutnya rangkaian *set up* yang meliputi pendefinisian kontak, *symmetric region*, tumpuan, beban, kecepatan, dan *meshing*, diperlukan kembali dengan cara yang sama seperti proses *pre-forming* diatas

namun dengan geometri *billet* yang telah terdeformasi dan menggunakan parameter *final forging* pada tabel 3.3.



Gambar 3. 24 Workflow proses ekspor hasil simulasi

#### 3.5.4 Analisis hasil

Setiap proses manufaktur logam akan menghasilkan *residual stress* terhadap benda kerjanya. Pada umumnya benda kerja akan diproses perlakuan panas untuk menghilangkan *residual stress* ini. Untuk mengetahui besar *residual stress* yang timbul akibat proses *forging*, maka penulis memilih *normal stress* sebagai *output solver*nya. Untuk mengetahui nilai tegangan residual dalam arah axial, radial, dan circumferential, digunakan *normal stress* ini karena nilai tegangannya dapat diketahui pada arah sumbu x, y, maupun z.

Dari simulasi percobaan yang telah dilakukan, akan disimulasikan kembali dengan beban penekanan dan ketebalan awal *billet* yang bervariasi. Tahapan simulasi ini sama persis dengan simulasi sebelumnya. Selain mencari nilai residual stress yang timbul akibat proses forging. Variasi ini juga dilakukan untuk menemukan konfigurasi input pada mesin forging yang paling optimal untuk membentuk roda kereta berkecepatan sedang.



Gambar 3. 25 Hasil simulasi

#### 3.6 Verifikasi Pemodelan Johnson-Cook

Untuk memverifikasi parameter pemodelan johnson-cook yang digunakan untuk material steel AISI 1045, peneliti mencoba membandingkan besar tegangan dari hasil simulasi dengan tegangan hasil perhitungan tangan. Tegangan dan regangan yang digunakan untuk verifikasi diambil dari satu titik pada billet seperti ditunjukkan pada gambar 3.26. Sedangkan perubahan nilai tegangan dan regangan yang terjadi pada billet saat simulasi ditabelkan pada tabel 3.9.



Gambar 3. 26 Pengamatan verifikasi pemodelan Johnson-Cook

| Tabel 3. 9 Data | perubahan | tegangan | dan regangan | hasil | simulasi |
|-----------------|-----------|----------|--------------|-------|----------|
|-----------------|-----------|----------|--------------|-------|----------|

| Waktu (s) | Waktu (s) Tegangan (MPa) |          | Keterangan   |  |
|-----------|--------------------------|----------|--------------|--|
| 0,0005    | 610,4                    | 0,017378 |              |  |
| 0,00075   | 1023,9                   | 0,20378  | Verifikasi 1 |  |
| 0,001     | 1041,8                   | 0,28258  | Verifikasi 2 |  |

Parameter pemodelan Johnson-Cook steel AISI 1045

| Initial yield stress (A) | = 553 MPa |
|--------------------------|-----------|
| Hardening constant (B)   | = 600 MPa |
| Hardening exponent (n)   | = 0,234   |
| Strain rate constant (C) | = 0,013   |
| Thermal coefficient (m)  | = 1       |
| Melting temperature (°K) | = 1733    |
| Ref. strain rate         | = 1       |

Sehingga perumusan Johnson-Cook untuk steel AISI 1045 adalah sebagai berikut

$$\sigma_{dyn} = (553+600 \, \varepsilon^{0,234})(1+0,013 ln \dot{\varepsilon^*})(1-T^1)$$

a) Verifikasi 1 Berdasarkan data pada tabel 3.9, didapatkan

strain rate = 
$$\frac{\Delta \varepsilon}{\Delta t} = \frac{(0,20378 - 0,017378)}{(0,00075 - 0,0005)} = 745,608/s$$

 $\sigma_{dyn} = (553 + 600 \cdot (0,20378)^{0,234})(1 + 0,013 \cdot \ln (745,608))(1 - 0^1) = 966,52 \text{ MPa}$ 

Hasil dari simulasi didapatkan  $\sigma_{dyn} = 1023,9$  MPa

$$error = \frac{|966,52 - 1023,9|}{966,52} x \ 100\% = 5,9\%$$

 b) Verifikasi 2 Berdasarkan data pada tabel 3.9, didapatkan

strain rate = 
$$\frac{\Delta \varepsilon}{\Delta t} = \frac{(0,28258 - 0,20378)}{(0,001 - 0,00075)} = 315,2/s$$

 $\sigma_{dyn = (553+600. (0,28258)^{0,234})(1+0,013. \ln (315,2))(1-0^1) = 1076,41 MPa}$ 

Hasil dari simulasi didapatkan  $\sigma_{dyn} = 1041.8$  MPa

$$error = \frac{|1076,41 - 1041,8|}{1076,41} x \ 100\% = 3,2\%$$

Setelah dilakukan verifikasi dengan cara membandingkan nilai tegangan hasil simulasi dengan hasil perhitungan tangan, didapatkan error dibawah 10 %. Dari sini, pemodelan johnson-cook bisa dianggap valid dan proses pengamatan hasil simulasi dapat dilanjutkan.

#### BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini dilakukan menggunakan metode Finite Element dengan menggunakan software ANSYS *Workbench explicit dynamic*. Simulasi yang pertama adalah simulasi proses *pre-forming* (gambar 4.1 a) dengan pembebanan sebesar 250 MN dan variasi ketebalan awal *billet* (benda kerja) sebesar 76 mm, 77 mm, 78 mm, 79 mm, dan 80 mm. Selanjutnya, hasil dari simulasi *pre-forming* dipakai untuk simulasi *final forging* (gambar 4.1 b) dengan variasi pembebanan sebesar 180 MN, 190 MN, 200 MN, 210 MN, dan 220 MN. Setelah dilakukan simulasi *final forging* ini, maka akan didapatkan bentuk akhir roda kereta dari keseluruhan proses *forging* dan tegangan sisa yang timbul pada roda kereta akibat proses *forging* itu sendiri. Data hasil variasi disajikan dalam bentuk grafik dan tabel.

Analisis yang dilakukan pada roda hasil proses *forging* yang akan diamati adalah pada saat kondisi setelah pembebanan dihilangkan, atau dalam proses forging adalah ketika *upper die* kembali ke posisi semula. Hal ini dilakukan untuk dapat memberikan sifat elastis material yang ada walaupun kecil sehingga bentuk akhir roda yang dibentuk dapat dipastikan telah dalam kondisi plastis atau tidak akan kembali lagi ke bentuk semula. Selain itu dengan menghilangkan pembebanan ini, analisis tegangan sisa atau *residual stress* yang timbul juga akan lebih valid sesuai dengan definisi *residual stress* yang dijelaskan pada bab 2, yaitu tegangan yang tinggal pada suatu objek yang dikenai gaya atau beban, ketika gaya atau beban tersebut dihilangkan.



94

(a)



Gambar 4.1 Skema proses a) *Pre-forming* b) *Final forging* 



## 4.1 Analisis Bentuk Roda Kereta Hasil Proses Forging





(b)

**Gambar 4. 2** *Forging billet* ketebalan awal 76 mm (a) dan 80 mm (b) dengan beban maksimum 220 MN

Gambar 4.2 a menunjukkan bentuk roda kereta hasil simulasi *forging* dengan pembebanan maksimum pada *billlet* yang memiliki ketebalan awal 76 mm (paling kecil dalam variasi) ketika *upper die* telah mencapai *stroke* maksimal (upper die menekan kebawah hingga kontak dengan lower die). Sedangkan gambar 4.2 b adalah forging dengan ketebalan awal billet 80 mm (paling besar dalam variasi) dengan besar pembebanan yang sama.

Berdasarkan gambar 4.2 a Terlihat banyak ruang cetakan yang belum terisi oleh *billet* ketika *upper die* sudah mencapai *stroke* maksimalnya. Terdapat kekosongan ruang cetakan pada bagian *hub, web*, dan *rim*. Sedangkan pada *forging* dengan ketebalan awal *billet* 80 mm, hampir seluruh bagian cetakan roda telah terisi oleh *billet* ketika *upper die* telah mencapai *stroke* maksimalnya. Namun masih terdapat bagian pada *web* yang tidak terisi secara sempurna.

Kekurangan dalam pengisian ruang cetakan dapat disebabkan oleh beberapa hal antara lain, desain cetakan proses *pre-forming* dan volume material. Tahap *pre-forming* merupakan tahap penting dalam proses *forging*. *Pre-forming* bertujuan untuk mendistribusikan material awal sehingga pada saat proses *final forging* material dapat mengisi cetakan secara sempurna dan bersamaan, karena bagian roda begitu kompleks yang terdiri dari bagian *hub, web,* dan *rim* dan memiliki ketebalan yang berbedabeda. Selain itu adanya tahap *pre-forming* juga untuk menjaga material cetakan *final forging* agar tidak cepat aus atau rusak karena penekanan awal yang besar.

Kekurangan pengisian cetakan juga disebabkan kekurangan volume material *billet*. Meningkatkan ketebalan *billet* berarti meningkatkan volume material *billet* untuk mengisi kekosongan cetakan. Berdasarkan gambar 4.2, dengan menggunakan cetakan roda dan pembebanan yang sama pada proses *pre-forming* dan *final forging*, volume *billet* yang lebih besar dapat mengisi cetakan roda lebih baik.







Gambar 4. 3 *Forging billet* ketebalan awal 79 mm dengan beban 180 MN (a) dan 220 MN (b)

Gambar 4.3 adalah bentuk roda kereta hasil forging dengan *billet* yang memiliki ketebalan awal 79 mm yang diberi

pembebanan 180 MN (a) dan 220 MN (b) ketika *upper die* telah mencapai *stroke* maksimal (*upper die* menekan kebawah hingga kontak dengan *lower die*). Berdasarkan gambar 4.3, forging pada billet dengan ketebalan awal yang sama namun pembebanan yang berbeda, didapatkan pembebanan yang lebih besar menyebabkan *billet* lebih mengisi ruang cetakan.

Pada pembebanan yang lebih besar, material *billet* lebih terdistribusi akibat penekanan yang lebih besar. Sehingga material billet lebih bisa mengisi ruang cetakan terutama pada bagian hub dan rim. Karena billet ini adalah benda yang inkompresibel, maka seharusnya pemodelan ini dapat dianggap volume konstan. Artinya, pada tiap macam besar pembebanan, volume material *billet* tidak berubah-ubah. Namun pengisian ruang pada hub dan rim ini bisa terjadi akibat distribusi material pada area web berpindah kearah hub dan rim. Hal ini bisa dicek dengan mengukur dimensi roda kereta hasil forging pada ketebalan awal tetap dengan variasi pembebanan, yang akan dijelaskan pada sub bab berikut ini.

### 4.1.1 Dimensi Roda Hasil Forging

Untuk mengetahui pengaruh peningkatan ketebalan awal billet dan peningkatan besar pembebanan forging terhadap dimensi roda kereta yang dihasilkan, peneliti mengukur ketebalan roda kereta hasil forging kemudian dibandingkan dengan ukuran cetakan roda. Dimensi ketebalan roda kereta hasil forging yang baik adalah yang paling mendekati dengan dimensi cetakan.

Peneliti membandingkan ketebalan pada 3 bagian inti dari roda kereta yakni *hub, web,* dan *rim* antara dimensi roda hasil forging dan dimensi cetakan yang digunakan. Dimensi roda kereta hasil forging dapat diukur menggunakan *software* Solidworks dengan cara mengimpor hasil simulasi dari ANSYS yang telah diekspor ke dalam format .stl, lalu diukur menggunakan fitur *measure* pada *toolbar evaluate.* Contoh hasil pengukuran diilustrasikan pada gambar 4. 4.











Gambar 4. 4 Pengukuran ketebalan hasil simulasi pada a) *Hub*, b) *Web*, c) *Rim* 

Hasil pengukuran dimensi dari keseluruhan variasi disajikan dalam bentuk tabel pada lampiran. Di bawah ini, peneliti hanya menyajikan salah satu dari konfigurasi variasi.

Tabel 4.1 di bawah menunjukkan hasil pengukuran ketebalan bagian hub, web, dan rim roda kereta hasil forging dari tiap ketebalan awal billet yang bervariasi dari 76 mm hingga 80 mm pada saat diberi pembebanan sebesar 220 MN.

| Ketebalan (mm) |         |        |         |               |          |        |  |
|----------------|---------|--------|---------|---------------|----------|--------|--|
| Cetak          | an Roda |        | Roda Ke | ereta Hasil S | Simulasi |        |  |
| Kereta         |         | 76 mm  | 77 mm   | 78 mm         | 79 mm    | 80 mm  |  |
| HUB            | 173,83  | 163,89 | 172     | 172,8         | 172,8    | 174,58 |  |
| WEB            | 26,3    | 23     | 22,7    | 22,9          | 25,69    | 24     |  |
| RIM            | 135     | 134,35 | 133     | 134,5         | 135,43   | 136,54 |  |

**Tabel 4. 1** Pengukuran ketebalan roda hasil forging denganpembebanan forging 220 MN

Berdasarkan tabel 4.1, dimensi roda kereta hasil *forging* dengan ketebalan awal *billet* 79 mm dan 80 mm adalah yang paling mendeketi dimensi cetakan dibandingkan dengan ketebalan awal billet dibawahnya. Dimensi roda kereta hasil forging dengan ketebalan awal billet 79 mm, pada area *web* dan rim sudah terisi mendekati ketebalan cetakan, namun masih terdapat kekurangan pada bagian *hub*. Dimensi roda kereta hasil forging dengan ketebalan awal 80 mm, didapatkan ukuran *hub* dan rim yang melebihi ukuran cetakan. Namun pada bagian *web* justru tidak terisi sempurna. Hal ini terjadi karena material pada web terdistribusi ke arah rim dan hub lebih banyak sehingga melebihi ukuran cetakan dan kedua cetakan tidak saling bertemu.

Tabel 4.2 di bawah menunjukkan hasil pengukuran ketebalan bagian hub, web, dan rim roda kereta hasil forging dari billet yang memiliki ketebalan awal 80 mm yang diberi pembebanan yang divariasikan dari 180 MN sampai 220 MN.

| Ketebalan (mm)         |        |                            |        |        |        |        |  |  |
|------------------------|--------|----------------------------|--------|--------|--------|--------|--|--|
| Cetakan Roda<br>Kereta |        | Roda Kereta Hasil Simulasi |        |        |        |        |  |  |
|                        |        | 180 MN                     | 190 MN | 200 MN | 210 MN | 220 MN |  |  |
| HUB                    | 173,83 | 173,76                     | 174,05 | 174,19 | 174,4  | 174,58 |  |  |
| WEB                    | 26,3   | 24,98                      | 24,82  | 24,58  | 24,36  | 24     |  |  |
| RIM                    | 135    | 136,26                     | 136,38 | 136,43 | 136,49 | 136,54 |  |  |

 Tabel 4. 2 Ketebalan cetakan roda dan hasil simulasi dengan ketebalan awal 80 mm

Berdasarkan tabel 4.2, pada ketebalan awal yang sama yaitu 80 mm, forging dengan pembebanan yang lebih besar menghasilkan dimensi billet yang lebih mengisi cetakan karena material juga lebih terkompresi dan terdistribusi sehingga bisa mengisi celah-celah kekosongan pada cetakan. Pada pembebanan 180 MN, ketebalan hub, web, dan rim hanya sebesar 173,76 mm, 24,98 mm, dan 136,26 mm masing-masing. Sedangkan tebal cetakan pada hub, web, dan rim adalah 173,83 mm, 26,3 mm, dan 135 mm, masing-masing. Pada pembebanan 220 MN, ketebalan hub, web dan rim sebesar 174,58 mm, 24 mm, dan 136,54 mm masing-masing. Pada bagian hub dan rim semakin besar beban, semakin besar pula dimensinya. Sedangkan pada bagian web, semakin besar beban, maka semakin kecil dimensinya. Hal ini disebabkan material pada area web berpindah atau terdistribusi ke arah hub dan rim untuk proses pengisian. Oleh karena itu, desain cetakan *pre-forming* sangat menentukan hasil proses *forging* itu sendiri.

#### 4.2 Path

Adapun dari hasil simulasi yang akan dilakukan, data akan diambil pada *gridline* yang terbagi menjadi 3 berdasarkan rasio radius dan dipilih pada rasio 2R/8 untuk area *hub*, 5R/8 untuk area *web*, dan 7R/8 untuk area *rim*, dimana R adalah jari-jari maksimum *billet*. Untuk membuat titik pengamatan ini, digunakan fitur "path" pada ANSYS. *Gridlines* yang terbagi kearah jari-jari *billet* ditampilkan seperti gambar dibawah ini



#### Gambar 4.5 Pembuatan path/gridline pada geometri

Dari ketiga *gridline* tersebut, akan dianalisis nilai tegangan normal yang timbul setelah proses forging. Tegangan normal yang akan dihasilkan ada yang bernilai positif (tegangan tarik) dan bernilai negatif (tegangan kompresi).

Analisis menggunakan fitur path pada ansys ini, memiliki kelebihan yaitu dapat melihat tegangan pada kedalaman suatu geometri. Namun kekurangan dari menggunakan fitur ini adalah pembacaan tegangan yang terlalu sensitif, dimana apabila jalur path digeser sedikit saja maka tegangan yang terbaca cukup berbeda.

## 4.3 Residual Stress arah Axial, Circumferential, dan Radial

Seperti yang telah dibahas pada bab 2, residual stress akan timbul salah satunya akibat proses manufaktur seperti proses forging. Residual stress pada roda kereta dapat dikatakan bermanfaat apabila kehadirannya melawan gaya beban yang muncul saat kondisi operasional sehingga dapat meningkatkan kekuatan dan umur dari roda. Umur roda yang dimaksud disini adalah kekuatan roda pada bagian tapak (tread), karena bagian tapak ini adalah bagian yang berkontak langsung dengan rel dalam kondisi operasional kereta. Dalam kondisi operasional, roda kereta mengalami berbagai macam gaya pembebanan karena kereta yang beroperasi tidak hanya berjalan lurus diatas rel, namun kereta juga mengalami kondisi belok, kondisi crossing, dan juga pengereman. Dari berbagai macam kondisi operasional tersebut, arah gaya pada roda juga menjadi berbagai macam arah, yaitu arah radial ketika kereta berjalan lurus, arah axial ketika kondisi crossing, dan arah circumferential ketika kondisi pengereman.

Oleh karena itu perlu dilakukan pengamatan nilai residual stress hasil dari proses forging pada arah axial, yang dapat berguna ketika roda mengalami pembebanan pada arah axial yaitu pada saat kondisi berbelok dan juga crossing. Residual stress arah radial, yang dapat berguna ketika roda mengalami pembebanan pada arah radial yaitu pada saat roda menerima pembebanan statis untuk menopang berat kereta, dan juga pembebanan dinamis saat kereta berjalan. Dan residual stress arah circumferential yang dapat berguna ketika roda diberi beban pengereman.

Untuk mengetahui nilai residual stress pada arah axial, radial, dan circumferential, peneliti menggunakan output *normal stress* yang berorientasi pada sumbu X, Y, dan Z berdasarkan koordinat *cylindrical* seperti pada gambar 4.6. Di mana sumbu z (axial) adalah sumbu searah pembebanan forging, sumbu x (radial) adalah sumbu yang sejajar dengan jari-jari roda, dan sumbu y (circumferential) adalah sumbu yang melingkar terhadap titik pusat roda.



Gambar 4. 6 Cylindrical coordinate





## Grafik 4. 1 Perbandingan axial residual stress pada *hub* dengan variasi pembebanan

Grafik diatas menunjukkan perbandingan nilai residual stress arah axial pada roda dibagian *hub* yang diwakilkan oleh *gridline* 2R/8 dengan pembebanan yang divariasikan yaitu 180 MN, 190 MN, 200 MN, 210 MN, dan 220 MN, dimana garis biru tua menunjukkan nilai residual stress arah axial dengan ketebalan awal *billet* 76 mm, garis warna jingga menunjukkan residual stress arah axial dengan ketebalan awal *billet* 77 mm, garis warna abu menunjukkan residual stress arah axial dengan ketebalan awal *billet* 78 mm, garis warna kuning menunjukkan residual stress arah

axial dengan ketebalan awal *billet* 79 mm, dan garis warna biru muda menunjukkan residual stress arah axial dengan ketebalan awal *billet* 80 mm yang didapat dari hasil simulasi forging.

Garis yang menunjukkan residual stress arah axial dengan ketebalan awal 79 mm dan 80 mm berbentuk garis yang solid, sedangkan garis yang menunjukkan residual stress arah axial dengan ketebalan awal yang lain berbentuk garis putus-putus untuk menunjukkan bahwa dengan ketebalan awal 79 mm dan 80 mm menghasilkan bentuk billet akhir setelah proses forging yang lebih baik dibanding dengan ketebalan awal lain dibawahnya.

Berdasarkan grafik didapatkan bahwa nilai residual stress arah axial pada bagian hub berubah-ubah seiring meningkatnya ketebalan awal dan pembebanan. Residual stress meningkat pada semua ketebalan awal ketika pembebanan dinaikkan menjadi 190 MN. Pada ketebalan maksimum yaitu 80 mm, residual stress cenderung naik seiring meningkatnya pembebanan namun tidak signifikan. Sedangkan pada ketebalan minimum yaitu 76 mm, nilai residual stress mulanya meningkat ketika pembebanan ditingkatkan hingga 200 MN, namun ketika ditingkatkan lagi hingga 220 MN, residual stressnya menurun. Pada ketebalan 77 mm, residual stress mulanya naik ketika peningkatan beban sampai 200 MN, lalu residual stress turun pada pembebanan 210 MN, kemudian naik kembali pada pembebanan maksimal. Pada ketebalan 78 dan 79 mm, nilai residual stressnya memiliki kemiripan dari pembebanan 180 MN hingga 210 MN, namun pada pembebanan maksimal residual stress ketebalan 79 mm turun sedangkan ketebalan 78 mm mengalami kenaikan.

Berdasarkan grafik diatas, nilai *residual stress* berfluktuasi seiring bertambahnya ketebalan awal *billet* dan besar pembebanan. Hal ini disebabkan karena kondisi penekanan yang berbeda pada *billet* tepatnya bagian *hub*, ketika dikenai pembebanan yang berbeda-beda. Selain itu, panjang *gridline* yang terbaca juga berbeda-beda karena faktor besar pembebanan dan ketebalan, dimana geometri *hub* yang terbentuk dari hasil simulasi *forging* kurang mengisi ruang cetakan pada pembebanan dan ketebalan tertentu. Namun, secara mayoritas, setiap seri ketebalan menunjukkan *trendline* yang cenderung naik seiring meningkatnya pembebanan.

Apabila meninjau dari konfigurasi variasi yang paling optimal, sesuai dengan pembahasan dari sub bab sebelumnya, maka ketebalan awal 79 mm dan 80 mm dengan pembebanan 220 MN adalah konfigurasi yang lebih baik dibanding dengan konfigurasi variasi yang lain. Berdasarkan grafik 4.1 nilai residual stress arah axial pada hub dengan konfigurasi ini menunjukkan nilai residual stress bersifat kompresi karena nilainya negatif. Dimana dengan ketebalan awal 79 mm saat pembebanan 220 MN nilai residual stress arah axial sebesar -343,43 MPa. Dengan ketebalan awal 80 mm saat pembebanan 220 MN nilai residual stress arah axial sebesar -220,78 MPa. Berdasarkan teori pada bab 2 tentang residual stress yang timbul pada roda kereta, nilai residual stress yang baik adalah bersifat kompresi karena dapat thermal atau fatigue crack dan menghambat mencegah pertumbuhan crack apabila berhasil terbentuk. Walaupun bagian yang paling rentan terjadi crack pada bagian roda adalah bagian vang kontak langsung dengan rel yaitu bagian tread pada rim, namun ada baiknya kalau pada setiap bagian roda, residual stress yang timbul adalah bersifat kompresi.



# 4.4.2 Analisis Residual Stress Arah Circumferential pada *Hub*

Grafik 4. 2 Perbandingan circumferential residual stress pada *hub* dengan variasi pembebanan

Grafik diatas menunjukkan perbandingan nilai residual stress arah circumferential pada roda dibagian *hub* yang diwakilkan oleh *gridline* 2R/8 dengan pembebanan yang divariasikan yaitu 180 MN, 190 MN, 200 MN, 210 MN, dan 220 MN, dimana garis biru tua menunjukkan nilai residual stress arah circumferential dengan ketebalan awal *billet* 76 mm, garis warna jingga menunjukkan nilai residual stress arah circumferential dengan ketebalan awal *billet* 77 mm, garis warna abu menunjukkan

nilai residual stress arah circumferential dengan ketebalan awal *billet* 78 mm, garis warna kuning menunjukkan nilai residual stress arah circumferential dengan ketebalan awal *billet* 79 mm, dan garis warna biru muda menunjukkan nilai residual stress arah circumferential dengan ketebalan awal *billet* 80 mm yang didapat dari hasil simulasi forging.

Garis yang menunjukkan residual stress arah circumferential dengan ketebalan awal 79 mm dan 80 mm berbentuk garis yang solid, sedangkan garis yang menunjukkan residual stress arah circumferential dengan ketebalan awal yang lain berbentuk garis putus-putus untuk menunjukkan bahwa dengan ketebalan awal 79 mm dan 80 mm menghasilkan bentuk billet akhir setelah proses forging yang lebih baik dibanding dengan ketebalan awal lain dibawahnya.

Pada ketebalan 78 mm dan 80 mm, trendline residual stress menunjukkan kemiripan, cenderung turun seiring meningkatnya pembebanan, walaupun pada beban 210 MN residual stress sempat naik, lalu kemudian turun kembali di beban 220 MN. Pada ketebalan 76 mm, 77 mm, dan 79 mm, residual stress menunjukkan nilai yang fluktuatif. Berdasarkan grafik diatas, trendline dari setiap seri ketebalan dominan menunjukkan penurunan circumferential residual stress pada hub seiring meningkatnya pembebanan.

Apabila meninjau dari konfigurasi variasi yang paling optimal, sesuai dengan pembahasan dari sub bab sebelumnya, maka ketebalan awal 79 mm dan 80 mm dengan pembebanan 220 MN adalah konfigurasi yang lebih baik dibanding dengan konfigurasi variasi yang lain. Berdasarkan grafik 4.2 nilai residual stress arah circumferential pada hub dengan konfigurasi ini menunjukkan nilai residual stress bersifat kompresi karena nilainya negatif. Dimana dengan ketebalan awal 79 mm saat pembebanan 220 MN nilai residual stress arah circumferential sebesar -232,56 MPa. Dengan ketebalan awal 80 mm saat pembebanan 220 MN nilai residual stress arah circumferential sebesar -509,42 MPa. Berdasarkan teori pada bab 2 tentang residual stress yang timbul pada roda kereta, nilai residual stress yang baik adalah bersifat kompresi karena dapat mencegah thermal atau fatigue crack dan menghambat pertumbuhan crack apabila berhasil terbentuk. Walaupun bagian yang paling rentan terjadi crack pada bagian roda adalah bagian yang kontak langsung dengan rel yaitu bagian tread pada rim, namun ada baiknya kalau pada setiap bagian roda, residual stress yang timbul adalah bersifat kompresi.



4.4.3 Analisis Residual Stress Arah Radial pada Hub

Grafik 4. 3 Perbandingan radial residual stress pada *hub* dengan variasi pembebanan

Grafik diatas menunjukkan perbandingan nilai residual stress arah radial pada roda dibagian *hub* yang diwakilkan oleh *gridline* 2R/8 dengan pembebanan yang divariasikan yaitu 180 MN, 190 MN, 200 MN, 210 MN, dan 220 MN, dimana garis biru tua menunjukkan nilai residual stress arah radial dengan ketebalan awal *billet* 76 mm, garis warna jingga menunjukkan nilai residual stress arah radial dengan ketebalan awal *billet* 77 mm, garis warna abu menunjukkan nilai residual stress arah radial dengan ketebalan awal *billet* 78 mm, garis warna kuning menunjukkan nilai residual stress arah radial dengan ketebalan awal *billet* 79 mm, dan garis warna biru muda menunjukkan nilai residual stress arah radial stress arah radial dengan ketebalan awal *billet* 79 mm, dan garis warna biru muda menunjukkan nilai residual stress arah radial stress arah radial dengan ketebalan awal *billet* 79 mm, dan garis warna biru muda menunjukkan nilai residual stress arah radial stress arah radial dengan ketebalan awal *billet* 79 mm, dan garis warna biru muda menunjukkan nilai residual stress arah radial stress arah radial dengan ketebalan awal *billet* 80 mm yang didapat dari hasil simulasi forging.

Garis yang menunjukkan residual stress arah radial dengan ketebalan awal 79 mm dan 80 mm berbentuk garis yang solid, sedangkan garis yang menunjukkan residual stress arah radial dengan ketebalan awal yang lain berbentuk garis putus-putus untuk menunjukkan bahwa dengan ketebalan awal 79 mm dan 80 mm menghasilkan bentuk billet akhir setelah proses forging yang lebih baik dibanding dengan ketebalan awal lain dibawahnya.

Berdasarkan grafik diatas, nilai residual stress pada setiap peningkatan ketebalan mengalami seiring meningkatnva pembebanan walaupun berfluktuasi. Pada ketebalan awal 79 mm saat pembebanan minimum yaitu 180 MN, memiliki nilai residual stress paling rendah yaitu sebesar -294,33 MPa. Mulanya nilai residual stress naik pada pembebanan 190 MN, kemudian turun hingga pada pembebanan 210 MN, lalu naik kembali secara signifikan pada pembebanan maksimal yaitu 220 MN menjadi -71,857 MPa. Pada ketebalan 80 mm, nilai residual stress turun sedikit pada pembebanan 190 MN, lalu naik pada pembebanan 200 dan 210 MN menjadi -97,267 MPa, kemudian turun kembali pada pembebanan 220 MN menjadi -134,08 MN. Pada ketebalan 78 mm dan 77 mm, trendline residual stress menunjukkan kemiripan yang mulanya naik hingga pembebanan 200 MN, lalu turun pada pembebanan 210 MN, dan naik kembali pada pembebanan 220 MN. Berdasarkan grafik diatas, trendline dari setiap seri ketebalan dominan menunjukkan nilai radial residual stress yang cenderung meningkat seiring meningkatnya pembebanan.

Apabila meninjau dari konfigurasi variasi yang paling optimal, sesuai dengan pembahasan dari sub bab sebelumnya, maka ketebalan awal 79 mm dan 80 mm dengan pembebanan 220 MN adalah konfigurasi yang lebih baik dibanding dengan konfigurasi variasi yang lain. Berdasarkan grafik 4.3 nilai residual stress arah radial pada hub dengan konfigurasi ini menunjukkan nilai residual stress bersifat kompresi karena nilainya negatif. Dimana dengan ketebalan awal 79 mm saat pembebanan 220 MN nilai residual stress arah radial sebesar -71,857 MPa. Dengan ketebalan awal 80 mm saat pembebanan 220 MN nilai residual stress arah radial sebesar -134,08 MPa. Berdasarkan teori pada bab 2 tentang residual stress yang timbul pada roda kereta, nilai residual stress yang baik adalah bersifat kompresi karena dapat mencegah thermal atau fatigue crack dan menghambat pertumbuhan crack apabila berhasil terbentuk. Walaupun bagian yang paling rentan terjadi crack pada bagian roda adalah bagian yang kontak langsung dengan rel yaitu bagian tread pada rim, namun ada baiknya kalau pada setiap bagian roda, residual stress yang timbul adalah bersifat kompresi.

## 4.5 Residual Stress pada *Web* 4.5.1 Analisis Residual Stress Arah Axial pada *Web*



## Grafik 4. 4 Perbandingan axial residual stress pada *web* dengan variasi pembebanan

Grafik diatas menunjukkan perbandingan nilai residual stress arah axial pada roda dibagian *web* yang diwakilkan oleh *gridline* 5R/8 dengan pembebanan yang divariasikan yaitu 180 MN, 190 MN, 200 MN, 210 MN, dan 220 MN, dimana garis biru tua menunjukkan nilai residual stress arah axial dengan ketebalan awal *billet* 76 mm, garis warna jingga menunjukkan nilai residual stress arah axial dengan ketebalan awal *billet* 77 mm, garis warna abu menunjukkan nilai residual stress arah axial dengan ketebalan awal *billet* 78 mm, garis warna kuning menunjukkan nilai residual

stress arah axial dengan ketebalan awal *billet* 79 mm, dan garis warna biru muda menunjukkan nilai residual stress arah axial dengan ketebalan awal *billet* 80 mm yang didapat dari hasil simulasi forging.

Garis yang menunjukkan residual stress arah axial dengan ketebalan awal 79 mm dan 80 mm berbentuk garis yang solid, sedangkan garis yang menunjukkan residual stress arah axial dengan ketebalan awal yang lain berbentuk garis putus-putus untuk menunjukkan bahwa dengan ketebalan awal 79 mm dan 80 mm menghasilkan bentuk billet akhir setelah proses forging yang lebih baik dibanding dengan ketebalan awal lain dibawahnya.

Berdasarkan grafik 4.4, didapatkan nilai residual stress arah axial pada web cenderung menurun seiring meningkatnya pembebanan pada beberapa variasi ketebalan awal. Pada pembebanan minimum, ketebalan 76 mm, 77 mm, 79 mm, dan 80 mm, masing-masing memiliki residual stress sebesar-35,9 MPa, -61,716 MPa, 55, 982 MPa, -25,53 MPa, dan pada pembebanan maksimum menurun menjadi -50,9 MPa, -87,39 MPa, -20,05 MPa, -91,38 MPa. Nilai residual stressnya menurun walaupun pada pembebanan dibawah maksimum diatas minimum mengalami fluktuasi. Namun pada ketebalan 78 mm, residual stress justru meningkat dari saat pembebanan minimum sebesar -18,04 MPa hingga pembebanan maksimum sebesar -12,73 MPa. Berdasarkan grafik diatas, nilai axial residual stress pada *web* dari tiap seri ketebalan secara dominan menunjukkan penurunan *trendline* seiring meningkatnya pembebanan.

Apabila meninjau dari konfigurasi variasi yang paling optimal, sesuai dengan pembahasan dari sub bab sebelumnya, maka ketebalan awal 79 mm dan 80 mm dengan pembebanan 220 MN adalah konfigurasi yang lebih baik dibanding dengan konfigurasi variasi yang lain. Berdasarkan grafik 4.4 nilai residual

stress arah axial pada web dengan konfigurasi ini menunjukkan nilai residual stress bersifat kompresi karena nilainya negatif. Dimana dengan ketebalan awal 79 mm saat pembebanan 220 MN nilai residual stress arah axial sebesar -20,049 MPa. Dengan ketebalan awal 80 mm saat pembebanan 220 MN nilai residual stress arah axial sebesar -91,382 MPa. Berdasarkan teori pada bab 2 tentang residual stress yang timbul pada roda kereta, nilai residual stress yang baik adalah bersifat kompresi karena dapat mencegah thermal atau fatigue crack dan menghambat pertumbuhan crack apabila berhasil terbentuk. Walaupun bagian yang paling rentan terjadi crack pada bagian roda adalah bagian yang kontak langsung dengan rel yaitu bagian tread pada rim, namun ada baiknya kalau pada setiap bagian roda, residual stress yang timbul adalah bersifat kompresi.


# 4.5.2 Analisis Residual Stress Arah Circumferential pada *Web*

# Grafik 4. 5 Perbandingan circumferential residual stress pada *web* dengan variasi pembebanan

Grafik diatas menunjukkan perbandingan nilai residual stress arah circumferential pada roda dibagian *web* yang diwakilkan oleh *gridline* 5R/8 dengan pembebanan yang divariasikan yaitu 180 MN, 190 MN, 200 MN, 210 MN, dan 220 MN, dimana garis biru tua menunjukkan nilai residual stress arah circumferential dengan ketebalan awal *billet* 76 mm, garis warna jingga menunjukkan nilai residual stress arah circumferential dengan ketebalan awal *billet* 77 mm, garis warna abu menunjukkan

nilai residual stress arah circumferential dengan ketebalan awal *billet* 78 mm, garis warna kuning menunjukkan nilai residual stress arah circumferential dengan ketebalan awal *billet* 79 mm, dan garis warna biru muda menunjukkan nilai residual stress arah circumferential dengan ketebalan awal *billet* 80 mm yang didapat dari hasil simulasi forging.

Garis yang menunjukkan residual stress arah circumferential dengan ketebalan awal 79 mm dan 80 mm berbentuk garis yang solid, sedangkan garis yang menunjukkan residual stress arah circumferential dengan ketebalan awal yang lain berbentuk garis putus-putus untuk menunjukkan bahwa dengan ketebalan awal 79 mm dan 80 mm menghasilkan bentuk billet akhir setelah proses forging yang lebih baik dibanding dengan ketebalan awal lain dibawahnya.

Berdasarkan grafik diatas, nilai residual stress pada ketebalan 79 mm adalah yang terendah dibanding dengan ketebalan lainnya. Saat pembebanan minimum yaitu 180 MN residual stressnya sebesar -811,84 MPa dan pada pembebanan maksimum yaitu 220 MN sebesar -805,61 MPa, nilainya meningkat, namun residual stressnya terendah saat pembebanan 200 MN sebesar -961,59 MN. Nilai residual stress pada ketebalan 76 mm, 77 mm dan 80 mm memiliki kemiripan trendline yang cenderung menurun seiring meningkatnya pembebanan walaupun tidak signifikan. Pada ketebalan 78 mm, nilai residual stress juga menunjukkan penurunan walaupun berfluktuasi seiring meningkatnya pembebanan. Berdasarkan grafik diatas. circumferential residual stress pada web dari tiap seri ketebalan trendline menunjukkan penurunan seiring meningkatnya pembebanan.

Apabila meninjau dari konfigurasi variasi yang paling optimal, sesuai dengan pembahasan dari sub bab sebelumnya,

maka ketebalan awal 79 mm dan 80 mm dengan pembebanan 220 MN adalah konfigurasi yang lebih baik dibanding dengan konfigurasi variasi yang lain. Berdasarkan grafik 4.5 nilai residual stress arah cicrcumferential pada web dengan konfigurasi ini menunjukkan nilai residual stress bersifat kompresi karena nilainya negatif. Dimana dengan ketebalan awal 79 mm saat pembebanan 220 MN nilai residual stress arah circumferential sebesar -805,61 MPa. Dengan ketebalan awal 80 mm saat pembebanan 220 MN nilai residual stress arah circumferential sebesar -356,39 MPa. Berdasarkan teori pada bab 2 tentang residual stress yang timbul pada roda kereta, nilai residual stress yang baik adalah bersifat kompresi karena dapat mencegah thermal atau fatigue crack dapat

kompresi karena dapat mencegah thermal atau fatigue crack dan menghambat pertumbuhan crack apabila berhasil terbentuk. Walaupun bagian yang paling rentan terjadi crack pada bagian roda adalah bagian yang kontak langsung dengan rel yaitu bagian tread pada rim, namun ada baiknya kalau pada setiap bagian roda, residual stress yang timbul adalah bersifat kompresi.



4.5.3 Analisis Residual Stress Arah Radial pada Web

Grafik 4. 6 Perbandingan radial residual stress pada *web* dengan variasi pembebanan

Grafik diatas menunjukkan perbandingan nilai residual stress arah radial pada roda dibagian *web* yang diwakilkan oleh *gridline* 5R/8 dengan pembebanan yang divariasikan yaitu 180 MN, 190 MN, 200 MN, 210 MN, dan 220 MN, dimana garis biru tua menunjukkan nilai residual stress arah radial dengan ketebalan awal *billet* 76 mm, garis warna jingga menunjukkan nilai residual stress arah radial dengan ketebalan awal *billet* 77 mm, garis warna abu menunjukkan nilai residual stress arah radial dengan ketebalan

awal *billet* 78 mm, garis warna kuning menunjukkan nilai residual stress arah radial dengan ketebalan awal *billet* 79 mm, dan garis warna biru muda menunjukkan nilai residual stress arah radial dengan ketebalan awal *billet* 80 mm yang didapat dari hasil simulasi forging.

Garis yang menunjukkan residual stress arah radial dengan ketebalan awal 79 mm dan 80 mm berbentuk garis yang solid, sedangkan garis yang menunjukkan residual stress arah radial dengan ketebalan awal yang lain berbentuk garis putus-putus untuk menunjukkan bahwa dengan ketebalan awal 79 mm dan 80 mm menghasilkan bentuk billet akhir setelah proses forging yang lebih baik dibanding dengan ketebalan awal lain dibawahnya.

Berdasarkan grafik diatas, nilai residual stress cenderung mengalami penurunan seiring meningkatnya pembebanan pada setiap ketebalan awal kecuali 76 mm dan 79 mm. Pada ketebalan 80 mm, residual stress bernilai positif (tarik), namun trendline mengalami penurunan dan pada pembebanan maksimum nilai residual stressnya menjadi -11,52 MPa. Berdasarkan grafik diatas dapat diketahui bahwa ketebalan 80 mm memiliki nilai residual stress paling tinggi dan ketebalan 79 mm paling rendah. Pada ketebalan 79 mm nilai residual stress berfluktuasi pada pembebanan 180 MN hingga 200 MN, kemudian mengalami peningkatan hingga pembebanan 220 MN. Pada ketebalan 76 mm trendline mengalami kenaikan terus menerus hingga pembebanan 210 MN, lalu turun pada pembebanan 220 menjadi -69,159 MPa. pada ketebalan 77 mm dan 78 mm, trendline menunjukkan kemiripan dimana residual nilai stress menurun hingga pembebanan 200 MN, lalu naik hingga pembebanan 220 MPa menjadi -210,06 MPa dan -263,31 MPa masing-masing.

Apabila meninjau dari konfigurasi variasi yang paling optimal, sesuai dengan pembahasan dari sub bab sebelumnya,

maka ketebalan awal 79 mm dan 80 mm dengan pembebanan 220 MN adalah konfigurasi yang lebih baik dibanding dengan konfigurasi variasi yang lain. Berdasarkan grafik 4.6 nilai residual stress arah radial pada web dengan konfigurasi ini menunjukkan nilai residual stress bersifat kompresi karena nilainya negatif. Dimana dengan ketebalan awal 79 mm saat pembebanan 220 MN nilai residual stress arah radial sebesar -437,87 MPa. Dengan ketebalan awal 80 mm saat pembebanan 220 MN nilai residual stress arah radial sebesar -11,52 MPa. Berdasarkan teori pada bab 2 tentang residual stress yang timbul pada roda kereta, nilai residual stress yang baik adalah bersifat kompresi karena dapat

mencegah thermal atau fatigue crack dan menghambat pertumbuhan crack apabila berhasil terbentuk. Walaupun bagian yang paling rentan terjadi crack pada bagian roda adalah bagian yang kontak langsung dengan rel yaitu bagian tread pada rim, namun ada baiknya kalau pada setiap bagian roda, residual stress yang timbul adalah bersifat kompresi.



# 4.6 Residual Stress pada Rim4.6.1 Analisis Residual Stress Arah Axial pada Rim

**Grafik 4. 7** Perbandingan axial residual stress pada rim dengan variasi pembebanan

Grafik diatas menunjukkan perbandingan nilai residual stress arah axial pada roda dibagian rim yang diwakilkan oleh *gridline* 7R/8 dengan pembebanan yang divariasikan yaitu 180 MN, 190 MN, 200 MN, 210 MN, dan 220 MN, dimana garis biru tua menunjukkan nilai residual stress arah axial dengan ketebalan awal *billet* 76 mm, garis warna jingga menunjukkan nilai residual

stress arah axial dengan ketebalan awal *billet* 77 mm, garis warna abu menunjukkan nilai residual stress arah axial dengan ketebalan awal *billet* 78 mm, garis warna kuning menunjukkan nilai residual stress arah axial dengan ketebalan awal *billet* 79 mm, dan garis warna biru muda menunjukkan nilai residual stress arah axial dengan ketebalan awal *billet* 80 mm yang didapat dari hasil simulasi forging.

Garis yang menunjukkan residual stress arah axial dengan ketebalan awal 79 mm dan 80 mm berbentuk garis yang solid, sedangkan garis yang menunjukkan residual stress arah axial dengan ketebalan awal yang lain berbentuk garis putus-putus untuk menunjukkan bahwa dengan ketebalan awal 79 mm dan 80 mm menghasilkan bentuk billet akhir setelah proses forging yang lebih baik dibanding dengan ketebalan awal lain dibawahnya.

Pada ketebalan 77 mm dan 76 mm nilai residual stressnya fluktuatif seiring meningkatnya pembebanan. Pada ketebalan 78 mm, nilai residual stress tidak berubah secara signifikan seiring meningkatnya pembebanan. Pada ketebalan 79 mm, nilai residual stressnya turun seiring meningkatnya pembebanan, namun naik saat pembebanan maksimal yaitu 220 MN dari -161,29 MPa menjadi -103,9 MPa. Berdasarkan grafik, dapat dilihat bahwa pada ketebalan awal 80 mm memiliki residual stress yang lebih rendah dibanding dengan ketebalan lainnya pada setiap pembebanan, walaupun pada pembebanan 200 MN hingga 220 MN nilainya meningkat dari -225,84 MPa menjadi -218,48 MPa. Berdasarkan grafik diatas, trendline axial residual stress pada rim dari tiap seri meningkatnya ketebalan menunjukkan penurunan seiring pembebanan.

Apabila meninjau dari konfigurasi variasi yang paling optimal, sesuai dengan pembahasan dari sub bab sebelumnya, maka ketebalan awal 79 mm dan 80 mm dengan pembebanan 220 MN adalah konfigurasi yang lebih baik dibanding dengan konfigurasi variasi yang lain. Berdasarkan grafik 4.7 nilai residual stress arah axial pada rim dengan konfigurasi ini menunjukkan nilai residual stress bersifat kompresi karena nilainya negatif. Dimana dengan ketebalan awal 79 mm saat pembebanan 220 MN nilai residual stress arah axial sebesar -103,9 MPa. Dengan ketebalan awal 80 mm saat pembebanan 220 MN nilai residual stress arah axial sebesar -218,48 MPa. Berdasarkan teori pada bab 2 tentang residual stress yang timbul pada roda kereta, nilai residual stress yang baik adalah bersifat kompresi karena dapat thermal atau fatigue crack dan menghambat mencegah pertumbuhan crack apabila berhasil terbentuk. Walaupun bagian yang paling rentan terjadi crack pada bagian roda adalah bagian yang kontak langsung dengan rel yaitu bagian tread pada rim, namun ada baiknya kalau pada setiap bagian roda, residual stress yang timbul adalah bersifat kompresi.



# 4.6.2 Analisis Residual Stress Arah Circumferential pada Rim

Grafik 4. 8 Perbandingan circumferential residual stress pada rim dengan variasi pembebanan

Grafik diatas menunjukkan perbandingan nilai residual stress arah circumferential pada roda dibagian rim yang diwakilkan oleh *gridline* 7R/8 dengan pembebanan yang divariasikan yaitu 180 MN, 190 MN, 200 MN, 210 MN, dan 220 MN, dimana garis biru tua menunjukkan nilai residual stress arah circumferential dengan ketebalan awal *billet* 76 mm, garis warna jingga menunjukkan nilai residual stress arah circumferential ketebalan awal *billet* 77 mm, garis warna abu menunjukkan nilai residual

stress arah circumferential ketebalan awal *billet* 78 mm, garis warna kuning menunjukkan nilai residual stress arah circumferential ketebalan awal *billet* 79 mm, dan garis warna biru muda menunjukkan nilai residual stress arah circumferential ketebalan awal *billet* 80 mm yang didapat dari hasil simulasi forging.

Garis yang menunjukkan residual stress arah circumferential dengan ketebalan awal 79 mm dan 80 mm berbentuk garis yang solid, sedangkan garis yang menunjukkan residual stress arah circumferential dengan ketebalan awal yang lain berbentuk garis putus-putus untuk menunjukkan bahwa dengan ketebalan awal 79 mm dan 80 mm menghasilkan bentuk billet akhir setelah proses forging yang lebih baik dibanding dengan ketebalan awal lain dibawahnya.

Berdasarkan grafik diatas, didapatkan nilai residual stress pada ketebalan 76 mm, dan 77 mm yang cenderung lebih tinggi dibanding pada ketebalan 78 mm, 79 mm, dan 80 mm. Pada ketebalan 80 mm, nilai residual stress mulanya turun ketika dibebani 190 MN sebesar -652,9 MPa, namun meningkat seiring meningkatnya pembebanan hingga pada beban maksimum menjadi -495,72 MPa. pada ketebalan 79 mm, residual stress mulanya naik secara drastis pada pembebanan 190 MN, namun kemudian turun seiring meningkatnya pembebanan menjadi -641.91 MN pada pembebanan maksimum yaitu 220 MN. Pada ketebalan 78 mm, nilai residual stress juga mulanya turun hingga pada pembebanan 210 MN sebesar -640,72 MPa, namun mengalami peningkatan ketika beban maksimum menjadi -526,5 MPa. Berdasarkan grafik diatas, nilai circumferential residual stress pada seri ketebalan 76 mm, 77 mm, dan 80 mm menunjukkan trendline yang meningkat seiring meningkatnya pembebanan, sedangkan pada seri ketebalan 78 mm dan 79 mm menunjukkan penurunan trendline seiring meningkatnya pembebanan.

Apabila meninjau dari konfigurasi variasi yang paling optimal, sesuai dengan pembahasan dari sub bab sebelumnya, maka ketebalan awal 79 mm dan 80 mm dengan pembebanan 220 MN adalah konfigurasi yang lebih baik dibanding dengan konfigurasi variasi yang lain. Berdasarkan grafik 4.8 nilai residual stress arah circumferential pada rim dengan konfigurasi ini menunjukkan nilai residual stress bersifat kompresi karena nilainya negatif. Dimana dengan ketebalan awal 79 mm saat pembebanan 220 MN nilai residual stress arah circumferential sebesar -641,91 MPa. Dengan ketebalan awal 80 mm saat pembebanan 220 MN nilai residual stress arah circumferential sebesar -495,72 MPa. Berdasarkan teori pada bab 2 tentang residual stress yang timbul pada roda kereta, nilai residual stress yang baik adalah bersifat kompresi karena dapat mencegah thermal atau fatigue crack dan menghambat pertumbuhan crack apabila berhasil terbentuk. Walaupun bagian yang paling rentan terjadi crack pada bagian roda adalah bagian yang kontak langsung dengan rel yaitu bagian tread pada rim, namun ada baiknya kalau pada setiap bagian roda, residual stress yang timbul adalah bersifat kompresi.



4.6.3 Analisis Residual Stress Arah Radial pada Rim

Grafik 4. 9 Perbandingan radial residual stress pada rim dengan variasi pembebanan

Grafik diatas menunjukkan perbandingan nilai residual stress arah radial pada roda dibagian *rim* yang diwakilkan oleh *gridline* 7R/8 dengan pembebanan yang divariasikan yaitu 180 MN, 190 MN, 200 MN, 210 MN, dan 220 MN, dimana garis biru tua menunjukkan nilai residual stress arah radial dengan ketebalan awal *billet* 76 mm, garis warna jingga menunjukkan menunjukkan nilai residual stress arah radial dengan ketebalan awal *billet* 77 mm, garis warna abu menunjukkan nilai residual stress arah radial

dengan ketebalan awal *billet* 78 mm, garis warna kuning menunjukkan nilai residual stress arah radial dengan ketebalan awal *billet* 79 mm, dan garis warna biru muda menunjukkan nilai residual stress arah radial dengan ketebalan awal *billet* 80 mm yang didapat dari hasil simulasi forging.

Garis yang menunjukkan residual stress arah radial dengan ketebalan awal 79 mm dan 80 mm berbentuk garis yang solid, sedangkan garis yang menunjukkan residual stress arah radial dengan ketebalan awal yang lain berbentuk garis putus-putus untuk menunjukkan bahwa dengan ketebalan awal 79 mm dan 80 mm menghasilkan bentuk billet akhir setelah proses forging yang lebih baik dibanding dengan ketebalan awal lain dibawahnya.

Pada ketebalan 76 mm dan 80 mm nilai residual stress tidak berbeda jauh dan memiliki kemiripan trendline yang pada awalnya mengalami peningkatan hingga sebesar -141,43 MPa dan -117,82 MPa pada beban 200 MN dan 210 MN, lalu turun hingga pembebanan maksimum yaitu 220 MN menjadi -185,64 MPa dan -214,94 MPa masing-masing. Pada ketebalan 77 mm nilai residual stress selalu menurun seiring meningkatnya pembebanan, pada beban 180 MN residual stressnya sebesar -274,44 MPa dan pada pembebanan 220 MN mencapai -362,28 MPa. pada ketebalan 78 mm, nilai residual stress cenderung meningkat walaupun sempat terjadi penurunan pada beban 200 MN. Pada ketebalan 79 mm, nilai residual stress berfluktuasi pada pembebanan 190 MN dan 200 MN, lalu mengalami peningkatan sampai pada pembebanan 220 MN. Pada pembebanan 180 MN, residual stress untuk 78 mm dan 79 mm sebesar -335,42 MPa dan -335,42, kemudian pada pembebanan 220 MN nilainya naik menjadi -214 MPa dan -255,67 MPa masing-masing. Berdasarkan grafik diatas, nilai radial residual stress pada seri ketebalan 76 mm, 78 mm, dan 79 mm menunjukkan trendline yang meningkat seiring meningkatnya pembebanan, sedangkan pada seri ketebalan 77 mm dan 80 mm menunjukkan penurunan trendline seiring meningkatnya pembebanan.

Apabila meninjau dari konfigurasi variasi yang paling optimal, sesuai dengan pembahasan dari sub bab sebelumnya, maka ketebalan awal 79 mm dan 80 mm dengan pembebanan 220 MN adalah konfigurasi yang lebih baik dibanding dengan konfigurasi variasi yang lain. Berdasarkan grafik 4.9 nilai residual stress arah radial pada rim dengan konfigurasi ini menunjukkan nilai residual stress bersifat kompresi karena nilainya negatif. Dimana dengan ketebalan awal 79 mm saat pembebanan 220 MN nilai residual stress arah radial sebesar -255,67 MPa. Dengan ketebalan awal 80 mm saat pembebanan 220 MN nilai residual stress arah radial sebesar -214,94 MPa. Berdasarkan teori pada bab 2 tentang residual stress yang timbul pada roda kereta, nilai residual stress yang baik adalah bersifat kompresi karena dapat mencegah thermal atau fatigue crack dan menghambat pertumbuhan crack apabila berhasil terbentuk. Walaupun bagian vang paling rentan terjadi crack pada bagian roda adalah bagian yang kontak langsung dengan rel yaitu bagian tread pada rim, namun ada baiknya kalau pada setiap bagian roda, residual stress yang timbul adalah bersifat kompresi.

### 4.7 Distribusi Residual Stress pada Roda Hasil Proses Forging

Berikut adalah distribusi residual stress pada body roda kereta hasil proses forging dengan ketebalan awal billet sebesar 79 mm dan 80 mm ketika diberi pembebanan 220 MN. Di mana konfigurasi variasi ini adalah yang paling optimal dibanding dengan konfigurasi variasi yang lain yang didapatkan oleh peneliti dari simulasi.



#### 4.7.1 Distribusi Residual Stress Arah Axial

**Gambar 4. 7** Distribusi axial residual stress pada roda kereta hasil proses forging dengan ketebalan awal billet 79 mm

Gambar diatas menunjukkan distribusi residual stress arah axial pada roda yang baru dibentuk dengan metode forging dengan ketebalan awal billet sebesar 79 mm yang diberi pembebanan 220 MN. Warna pada body roda kereta merepresentasikan nilai tegangan, di mana nilainya tertera dalam range pada bagian kiri gambar. Axial residual stress ( normal stress z axis) yang timbul pada roda dibagian tapak (tread) berwarna kuning, secara nominal bersifat tarik (positif) dalam rentang -32,072 MPa sampai 187,59 MPa. Bagian tapak ini, adalah bagian roda kereta yang dalam kondisi operasionalnya berkontak langsung dengan rel. bagian tapak ini seringkali mengalami aus dan bahkan kegagalan yang diakibatkan oleh fatigue crack dan thermal crack. Untuk mengurangi resiko kegagalan pada bagian tapak ini, perlu adanya heat treatment yang berfungsi menginduksi residual stress bersifat kompresi pada permukaan tapak. Di mana sesuai dasar teori pada bab 2, residual stress bersifat kompresi ini mampu meningkatkan kekuatan roda serta mencegah timbulnya crack dan mencegah peluasan crack apabila berhasil muncul. Axial residual stress pada bagian web dan hub secara dominan juga menunjukkan warna kuning yang bersifat tarik (positif) dalam rentang nilai yang sama seperti pada bagian tapak.



**Gambar 4. 8** Distribusi axial residual stress pada roda kereta hasil proses forging dengan ketebalan awal billet 80 mm

Gambar diatas menunjukkan distribusi residual stress arah axial pada roda yang baru dibentuk dengan metode forging dengan ketebalan awal billet sebesar 80 mm yang diberi pembebanan 220 MN. . Warna pada body roda kereta merepresentasikan nilai tegangan, di mana nilainya tertera dalam range pada bagian kiri gambar. Axial residual stress yang timbul pada roda bagian tapak (tread) berwarna kuning dan hijau kekuningan, secara nominal bersifat tarik (positif) dalam rentang 49,13 MPa sampai 209,1 MPa. Sedangkan pada bagian dalam rim berwarna hijau dan biru, secara nominal bersifat kompresi (negatif) dalam rentang -110,84 sampai -270,82 MPa. Pada bagian web dominan berwarna hijau namun pada hub dominan kuning. Karena pada bagian tapak residual stress bersifat tarik, maka roda ini perlu diproses heat treatment untuk menginduksi residual stress yang diinginkan yaitu residual stress yang bersifat kompresi.



4.7.2 Distribusi Residual Stress Arah Circumferential

**Gambar 4.9** Distribusi circumferential residual stress pada roda kereta hasil proses forging dengan ketebalan awal billet 79 mm

Gambar diatas menunjukkan distribusi residual stress arah circumferential pada roda yang baru dibentuk dengan metode forging dengan ketebalan awal billet sebesar 79 mm yang diberi pembebanan 220 MN. . Warna pada body roda kereta merepresentasikan nilai tegangan, di mana nilainya tertera dalam range pada bagian kiri gambar. Circumferential residual stress yang timbul pada bagian tapak (tread) berwarna hijau, secara nominal bersifat kompresi (negatif) dalam rentang -164,87 MPa sampai -362,44 MPa. Sedangkan didalam rim dominan berwarna biru kehijauan, secara nominal bersifat kompresi (negatif) dalam rentang -362,44 MPa sampai -560,01 MPa. Pada bagian web juga dominan berwarna biru kehijauan, namun pada bagian hub berwarna kuning, secara nominal bersifat tarik (positif) dalam rentang 32,708 MPa sampai 230,28 MPa. Walaupun pada bagian hub ini circumferential residual stress yang timbul bersifat tarik, namun pada bagian dari roda yang paling krusial yaitu bagian tapak, residual stress yang timbul adalah bersifat kompresi.



**Gambar 4. 10** Distribusi circumferential residual stress pada roda kereta hasil proses forging dengan ketebalan awal billet 80 mm

Gambar diatas menunjukkan distribusi residual stress arah circumferential pada roda yang baru dibentuk dengan metode forging dengan ketebalan awal billet sebesar 80 mm yang diberi pembebanan 220 MN. . Warna pada body roda kereta merepresentasikan nilai tegangan, di mana nilainya tertera dalam range pada bagian kiri gambar. Circumferential residual stress yang timbul pada bagian tapak (tread) dan rim dominan berwarna biru kehijauan, secara nominal besifat kompresi (negatif) dalam rentang -58,683 MPa sampai -262,99 MPa. Pada bagian web terdapat banyak warna kuning hingga jingga, secara nominal bersifat tarik (positif) dalam rentang 349,93 MPa sampai 554,24 MPa. Pada bagian hub secara dominan berwarna hijau dan bersifat kompresi dalam rentang -58,683 MPa sampai 145,62 MPa.

#### 4.7.3 Distribusi Residual Stress Arah Radial



**Gambar 4. 11** Distribusi radial residual stress pada roda kereta hasil proses forging dengan ketebalan awal billet 79 mm

Gambar diatas menunjukkan distribusi residual stress arah radial pada roda yang baru dibentuk dengan metode forging dengan ketebalan awal billet sebesar 79 mm yang diberi pembebanan 220 MN. . Warna pada body roda kereta merepresentasikan nilai tegangan, di mana nilainya tertera dalam range pada bagian kiri gambar. Radial residual stress pada bagian tapak (tread) berwarna kuning, secara nominal bersifat kompresi dan tarik dalam rentang -130,99 MPa sampai 79,592 MPa. Pada bagian web bervariasi dari warna biru sampai merah. Pada bagian hub dominan berwarna kuning, secara nominal bersifat tarik (positif) dalam rentang 79,592 MPa sampai 290,17 MPa.



**Gambar 4. 12** Distribusi radial residual stress pada roda kereta hasil proses forging dengan ketebalan awal billet 80 mm

Gambar diatas menunjukkan distribusi residual stress arah radial pada roda yang baru dibentuk dengan metode forging dengan ketebalan awal billet sebesar 80 mm yang diberi pembebanan 220 MN. . Warna pada body roda kereta merepresentasikan nilai tegangan, di mana nilainya tertera dalam range pada bagian kiri gambar. Radial residual stress pada bagian tapak dominan berwarna hijau, secara nominal bersifat kompresi (negatif) dalam rentang -56,963 MPa sampai -240,67 MPa. pada bagian web bervariasi dari warna biru sampai jingga. Pada bagian hub berwarna hijau kekuningan, secara nominal bersifat kompresi dan tarik dalam rentang -56,963 MPa sampai 126,74 MPa.

### 4.8 Superposisi Tegangan Normal Preform dan Final Forging

Kekurangan daripada analisis residual stress yang telah dilakukan oleh peneliti pada sub bab sebelumnya adalah residual stress yang dihasilkan dari stage preform tidak ikut teranalisis pada stage final forging karena residual stress yang dihasilkan pada stage pre-form tidak ikut terekspor ke dalam stage final forging. Ketika geometri hasil preform diekspor, maka kondisi tegangan menjadi 0 atau geometri terbaca menjadi pemodelan yang baru. Untuk mengatasi hal ini, upaya yang bisa dilakukan untuk mengikutsertakan tegangan yang dihasilkan dari stage pre-form pada analisis di stage final forging adalah dengan superposisi tegangan kemudian dijumlahkan secara manual. Namun, superposisi ini bisa dilakukan apabila bentuk element dari preforming tidak berubah ketika diekspor ke dalam stage final forging. Sehingga nilai residual stress bisa diamati melalui node yang sama pada kedua stage yang telah ditentukan posisi dan nomer nodenya. Kenyataannya dalam pemodelan final forging, terjadi remeshing sehingga bentuk mesh dan elemennya berubah. Maka dari itu superposisi tegangan stage preform dan final forging vang terbaca dari node-node tidak bisa dilakukan.

Contoh dari superposisi tegangan yang hanya bisa dilakukan dalam pemodelan ini adalah superposisi pada node yang berada di pojok geometri. Karena pada bagian pojok geometri ini pada stage pre-form dan final forging adalah posisi yang sama dan akan dibaca sebagai node yang sama juga.



Gambar 4. 13 Node stage pre-forming sebelum dan sesudah simulasi



Gambar 4. 14 Node stage final-forging sebelum dan sesudah simulasi

Normal stress arah radial (sumbu x) stage pre-formingg + normal stress arah radial stage final forging = -297,02 MPa + 88,635 MPa = -208,385 MPa

Halaman ini sengaja dikosongkan

### BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Kesimpulan dari penelitian ini adalah sebagai berikut

Setelah dilakukan simulasi proses forging roda kereta dengan variasi ketebalan awal billet dan besar pembebanan, didapatkan konfigurasi variasi yang menghasilkan bentuk roda paling baik dibanding konfigurasi lain, yaitu forging dengan ketebalan awal billet 79 mm dan 80 mm dengan pembebanan 220 MN. Residual stress yang dihasilkan pada roda kereta dengan ketebalan awal 79 mm ini ternyata dalam kondisi kompresi (menguntungkan) pada tiap bagian inti roda yaitu hub, web, dan rim. Tetapi terdapat residual stress arah radial pada bagian hub yang tergolong rendah vaitu sebesar -71,857 MPa. Namun hal ini masih dapat diterima karena residual stress bersifat kompresi yang sangat dibutuhkan adalah dibagian rim. Karena bagian rim khususnya tread, adalah bagian yang kontak langsung dengan rel. Sedangkan residual stress yang dihasilkan pada roda kereta dengan ketebalan awal 80 mm juga dalam kondisi kompresi pada ketiga bagian inti roda. Tetapi terdapat residual stress arah radial pada bagian web yang tergolong rendah yaitu sebesar -11,52 MPa. Namun hal ini masih dapat diterima karena residual stress bersifat kompresi yang sangat dibutuhkan adalah dibagian rim. Karena bagian rim khususnya tread, adalah bagian yang kontak langsung dengan rel.

#### 5.2 Saran

Setelah melakukan penelitian, terdapat beberapa saran dari penulis agar penelitian berikutnya menjadi lebih baik lagi seperti berikut

1. Pelu modifikasi cetakan *pre-forming* yang lebih baik lagi.

- 2. Perlu dilakukan simulasi menggunakan komputer dengan spesifikasi lebih tinggi sehingga ukuran mesh bisa lebih kecil lagi.
- 3. Selain verifikasi proses, selanjutnya perlu dilakukan validasi hasil simulasi dengan hasil eksperimen.
- 4. Perlu dilakukan simulasi proses forging menggunakan software yang dapat memodelkan multi-stage.

#### DAFTAR PUSTAKA

ASM Handbook Forming and Forging (9th ed.). (1988).

- Association of American Railroads. (2007). Manual of Standards and Recommended Practices - Section G, Wheels and Axles, Specification M107/208, "Wheels, Carbon Steels,.
- Canonsburg, A. D. (2016). Development and research of a finite element model of a fast-flowing nonlinear process of crimping a terminal using the ANSYS® Explicit Dynamics product. Privolzhsky Scientific Bulletin, 15317(12-2 (64)), 724–746.

Chakrabarty, J. (2006). Theory of Plasticity.

- Duan, C., Yu, H., Cai, Y., & Li, Y. (2010). Finite element simulation and experiment of chip formation during high speed cutting of hardened steel. *Applied Mechanics and Materials*, 29–32(5), 1838–1843. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.29-32.1838
- Gangopadhyay, T., Ohdar, R. K., Pratihar, D. K., & Basak, I. (2011). Three-dimensional finite element analysis of multi-stage hot forming of railway wheels. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 53(1–4), 301–312. https://doi.org/10.1007/s00170-010-2810-4
- Hibbeler, R. C. (2011). *Mechanics of Materials* (Eight Edit). Pearson Prentice Hall.
- Hutton, D. V. (2004). Fundamentals of Finite Element Analysis. he McGraw-Hill Companies.
- Kang, Y., & Jeon, J. (2018). Finite element analysis of the impact of liner thickness and hydrodynamic limit on the

penetration depth of a shaped charge warhead. *Journal of Mechanical Science and Technology*, *32*(12), 5797– 5805. https://doi.org/10.1007/s12206-018-1127-3

- Koop, R., Cho, M.-L., & Souza, M. M. de. (n.d.). Multi-level simulation of metal-forming processes. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/srin.198801624
- Logan, D. L. (2012). A First Course in the Finite Element Method (T. Altieri (Ed.); Fifth Edit). Global Engineering: Christopher M. Shortt.
- Mengenal Istilah Bogie pada Kereta Api (Bag.1). (n.d.). Retrieved April 24, 2020, from https://www.inka.co.id/berita/58
- Meyers, M. A. (1994a). Experimental Techniques: Methods to Produce Dynamic Deformation. In *Dynamic Behavior of Materials* (p. 296).
- Meyers, M. A. (1994b). Plastic Deformation at High Strain Rates. In *Dynamic Behavior of Materials* (p. 323).
- Milošević, M., Miltenović, A., Banić, M., & Tomić, M. (2017). Determination of residual stress in the rail wheel during quenching process by FEM simulation. *Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering*, 15(3), 413–425. https://doi.org/10.22190/FUME170206029M
- Necaticora, O. (2004). Friction Analysis in Cold Forging. December, 93.
- Oh, S. I. (1982). Finite element analysis of metal forming proc esses with arbitrarily shaped dies s.i. oh. 24(8), 479–493.
- Orlova, A., & Boronenko, Y. (2006). The Anatomy of Railway Vehicle Running Gear. In *Handbook of Railway Vehicle Dynamic* (p. 39).

Queen City Forging Co. (n.d.).

Railroad, F. (1999). *Residual Stresses in Railroad Commuter Car Wheels*. 1–4.

Raines, T. (2013). Forging Vs. Casting : Wich is Better?

- Roque, C. M. O. L., & Button, S. T. (2000). Application of the finite element method in cold forging processes. *Revista Brasileira de Ciencias Mecanicas/Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences*, 22(2), 189– 202. https://doi.org/10.1590/S0100-73862000000200005
- Standard, E. (2018). EUROPEAN STANDARD EUROPÄISCHE NORM.
- Steelforging. (2017). *How Does Steel Forging Increase Strength*. http://www.steelforging.org/how-does-steelforging-increase-strength/
- Steelforging. (2018). *Hot Forging Process and Its Applications*. http://www.steelforging.org/hot-forgingprocess-and-its-applications/
- Williams, J., & Fatemi, A. (2007). Fatigue performance of forged steel and ductile cast iron crankshafts. SAE Technical Papers, 1–32. https://doi.org/10.4271/2007-01-1001

# Tabel Ketebalan hasil simulasi pre-forming dan final forging

| Initial           |              | Thickness in Pre-forming (mm) |       |        |              | Thickness in Final Forging (mm) |       |        |
|-------------------|--------------|-------------------------------|-------|--------|--------------|---------------------------------|-------|--------|
| Thickness<br>(mm) | Load<br>(MN) | HUB                           | WEB   | RIM    | Load<br>(MN) | HUB                             | WEB   | RIM    |
| 76                | 250          | 118,6                         | 35,04 | 116,17 | 180          | 158,39                          | 24,41 | 134,16 |
|                   |              |                               |       |        | 190          | 159,64                          | 23,83 | 134,2  |
|                   |              |                               |       |        | 200          | 161,22                          | 23,48 | 134,3  |
|                   |              |                               |       |        | 210          | 162,53                          | 23,23 | 134,32 |
|                   |              |                               |       |        | 220          | 163,89                          | 23    | 134,35 |
| 77                |              | 121,13                        | 35,6  | 117,68 | 180          | 166,96                          | 24,21 | 132,94 |
|                   |              |                               |       |        | 190          | 169,04                          | 23,7  | 132,96 |
|                   |              |                               |       |        | 200          | 170,9                           | 23,25 | 132,98 |
|                   |              |                               |       |        | 210          | 171,9                           | 22,97 | 132,99 |
|                   |              |                               |       |        | 220          | 172                             | 22,7  | 133    |
|                   |              | 125,07                        | 35,04 | 119,54 | 180          | 171,47                          | 24,1  | 134,37 |
| 78                |              |                               |       |        | 190          | 172,14                          | 23,87 | 134,37 |
|                   |              |                               |       |        | 200          | 172,33                          | 23,56 | 134,41 |
|                   |              |                               |       |        | 210          | 172,61                          | 23,22 | 134,46 |
|                   |              |                               |       |        | 220          | 172,8                           | 22,9  | 134,5  |
| 79                |              | 124,88                        | 36    | 119,24 | 180          | 166,14                          | 26,88 | 135,24 |
|                   |              |                               |       |        | 190          | 168                             | 26,52 | 135,46 |
|                   |              |                               |       |        | 200          | 170                             | 26,38 | 135,47 |
|                   |              |                               |       |        | 210          | 172,53                          | 26,2  | 135,5  |
|                   |              |                               |       |        | 220          | 172,8                           | 25,69 | 135,92 |
| 80                |              | 129,15                        | 35,79 | 123,8  | 180          | 173,76                          | 24,98 | 136,26 |
|                   |              |                               |       |        | 190          | 174,05                          | 24,82 | 136,38 |
|                   |              |                               |       |        | 200          | 174,19                          | 24,58 | 136,43 |
|                   |              |                               |       |        | 210          | 174,4                           | 24,36 | 136,49 |
|                   |              |                               |       |        | 220          | 174,58                          | 24    | 136,54 |

| Initial           | Laad | AXIAL (Z AXIS) |         |         |  |
|-------------------|------|----------------|---------|---------|--|
| Thickness<br>(mm) | (MN) | 2r/8           | 5r/8    | 7r/8    |  |
|                   | 180  | -95,807        | -35,293 | -99,565 |  |
|                   | 190  | -37,749        | -58,825 | -29,335 |  |
| 76                | 200  | -24,314        | 12,965  | -75,66  |  |
|                   | 210  | -196,92        | 2,8305  | -40,653 |  |
|                   | 220  | -223,49        | -50,091 | -78,322 |  |
|                   | 180  | -562,24        | -61,716 | -5,1724 |  |
|                   | 190  | -189,32        | -83,925 | -43,837 |  |
| 77                | 200  | -184,4         | -85,573 | -53,188 |  |
|                   | 210  | -363,17        | -85,195 | -29,572 |  |
|                   | 220  | -218,38        | -87,386 | -76,707 |  |
|                   | 180  | -262,67        | -18,039 | -31,742 |  |
|                   | 190  | -144,13        | 41,083  | -34,642 |  |
| 78                | 200  | -322,1         | -7,0542 | -43,282 |  |
|                   | 210  | -155,11        | -5,6922 | -48,777 |  |
|                   | 220  | -127,42        | -12,731 | -42,998 |  |
|                   | 180  | -285,76        | 55,982  | -26,153 |  |
|                   | 190  | -151,74        | 2,8587  | -67,042 |  |
| 79                | 200  | -271,24        | 31,757  | -157,44 |  |
|                   | 210  | -210,85        | -8,9756 | -161,29 |  |
|                   | 220  | -343,43        | -20,049 | -103,9  |  |
|                   | 180  | -252,68        | -25,527 | -179,68 |  |
|                   | 190  | -227,08        | -64,817 | -192,5  |  |
| 80                | 200  | -216,43        | -76,604 | -225,84 |  |
|                   | 210  | -213,56        | -106,51 | -222,99 |  |
|                   | 220  | -220,78        | -91,382 | -218,48 |  |

### **Tabel Residual Stress Arah Axial**

| Initial           | Lead | CIRCUMFERENTIAL (Y AXIS ) |         |         |  |
|-------------------|------|---------------------------|---------|---------|--|
| Thickness<br>(mm) | (MN) | 2r/8                      | 5r/8    | 7r/8    |  |
|                   | 180  | -174,99                   | -262,2  | -149,79 |  |
|                   | 190  | -264,31                   | -218,07 | -165,81 |  |
| 76                | 200  | -170,03                   | -243,93 | -180,48 |  |
|                   | 210  | -273,85                   | -277,6  | -139,59 |  |
|                   | 220  | -196,45                   | -472,06 | -125,53 |  |
|                   | 180  | -380,66                   | -206,37 | -250,99 |  |
|                   | 190  | -194,25                   | -274,5  | -92,484 |  |
| 77                | 200  | -268,21                   | -303,16 | -125,46 |  |
|                   | 210  | -568,54                   | -336,85 | -166,87 |  |
|                   | 220  | -371,28                   | -325,41 | -183,42 |  |
|                   | 180  | -292,85                   | -390,79 | -301,14 |  |
|                   | 190  | -307,86                   | -573,17 | -589,58 |  |
| 78                | 200  | -413,83                   | -554,67 | -588,92 |  |
|                   | 210  | -331,12                   | -668,85 | -640,72 |  |
|                   | 220  | -440,56                   | -526,53 | -506,07 |  |
|                   | 180  | -268,12                   | -811,84 | -613,22 |  |
|                   | 190  | -204,65                   | -403,5  | -321,95 |  |
| 79                | 200  | -341,67                   | -961,59 | -531,9  |  |
|                   | 210  | -301,69                   | -932,13 | -594,75 |  |
|                   | 220  | -232,56                   | -805,61 | -641,91 |  |
|                   | 180  | -294,3                    | -197,19 | -567,68 |  |
|                   | 190  | -411,37                   | -329,13 | -652,9  |  |
| 80                | 200  | -435,9                    | -328,15 | -635,74 |  |
|                   | 210  | -398,59                   | -385,21 | -554,91 |  |
|                   | 220  | -509,45                   | -356,39 | -495,72 |  |

**Tabel Residual Stress Arah Circumferential** 

#### RADIAL (X AXIS) Initial Load Thickness (MN) 2r/8 5r/8 7r/8 (mm) -98,743 -170,57 180 -179,16 -50,352 190 -131,83 -168,63 -33,973 -46,482 76 200 -149,63 210 -49,265 -6,1862 -141,43 -81,046 220 -69,159 -185,64 180 -205,02 -68,087 -274,44 -78,749 -292,61 190 -117,62 77 200 -82,708 -187,78 -318,05 210 -177,48 -99,45 -343,75 220 -46,544 -120,06 -362,28 180 -95,458 -145,8 -335,42 190 -85,45 -310,7 -428,34 78 200 -69,279 -374,76 -452,85 -274,47 210 -130,57 -253,69 -90,431 220 -263,31 -214,12 180 -294,33 -506,34 -387,1 -114,46 190 -207,82 -226,81 79 200 -156,6 -535,3 -338,01 210 -266,01 -508,97 -321,28 220 -71,857 -437,87 -255,67 180 -217,29 74,153 -143,39 190 -222,03 42,473 -141,39 80 -160,59 46,31 -117,82 200 -97,267 29,643 -188,86 210 220 -134,08 -11,52 -214,94

#### **Tabel Residual Stress Arah Radial**

#### **BIODATA PENULIS**



Zulfan Muhammad Farruqi dilahirkan di Bontang, 17 Juli 1998. Merupakan anak kedua dari 2 bersaudara. Riwayat pendidikan penulis diawali dari TK YPPSB Sangatta, Kutai Timur pada tahun 2002 - 2004, dan SD YPPSB Sangatta, Kutai Timur pada tahun 2004 – 2010. Setelah itu penulis melanjutkan studi ke SMP pada tahun 2010 - 2013 dan SMA pada tahun 2013 – 2016 di Pondok Pesantren Salafy

Terpadu Ar-Risalah Lirboyo Kota Kediri, di mana penulis tidak hanya belajar ilmu formal tetapi juga ilmu agama. Kemudian melanjutkan ke jenjang perkuliahan strata satu (S1) di Teknik Mesin Institut Teknologi Departemen Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya. Penulis aktif dalam kegiatan akademik maupun organisasi selama perkuliahan. Dalam organisasi kemahasiswaan, penulis aktif menjadi staff di Divisi Roda Dua Lembaga Bengkel Mahasiswa Mesin (LBMM) pada tahun 2017 dan pada tahun berikutnya di 2018 diamanahi menjadi Kabiro Pengabdian Masyarakat Divisi Roda Dua Lembaga Bengkel Mahasiswa Mesin (LBMM) Departemen Teknik Mesin ITS. Penulis mempunyai motto hidup "Sayangilah kedua orang tua jika ingin hidup bahagia" yang membuat penulis selalu bersemangat dan terus ingat bahwa untuk sampai pada titik ini tidak akan lepas dari doa kedua orang tua. Untuk semua informasi dan masukan kritik atau saran terkait tugas akhir ini dapat menghubungi penulis melalui email zulfanfarruqi@gmail.com.