

TUGAS AKHIR - TM184835

SIMULASI PENENTUAN UMUR CETAKAN PROSES *HOT FORGING* UNTUK PRODUK *FEMORAL STEM HIP ARTHROPLASTY*

FELIX RAJAIM B MUNTHE
NRP. 02111840000121

Dosen Pembimbing
Dinny Harnani, S.T., M.Sc.
NIP. 198905132019032013

Program Studi Teknik Mesin
Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2022



TUGAS AKHIR - TM184835

SIMULASI PENENTUAN UMUR CETAKAN PROSES *HOT FORGING* UNTUK PRODUK *FEMORAL STEM HIP ARTHROPLASTY*

Felix Rajaim B Munthe

NRP 02111840000121

Dosen Pembimbing

Dinny Harnani, S.T., M.Sc.

NIP 198905132019032013

Program Studi Teknik Mesin

Departemen Teknik Mesin

Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



FINAL PROJECT - TM184835

TOOL LIFE SIMULATION OF HOT FORGING DIE OF FEMORAL STEM HIP ARTHROPLASTY

Felix Rajaim B Munthe

NRP 02111840000121

Advisor

Dinny Harnani, S.T., M.Sc.

NIP 198905132019032013

Study Program of Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022

(This page is intentionally left blank)

LEMBAR PENGESAHAN

**SIMULASI PENENTUAN UMUR CETAKAN PROSES HOT FORGING UNTUK
PRODUK FEMORAL STEM HIP ARTHROPLASTY**

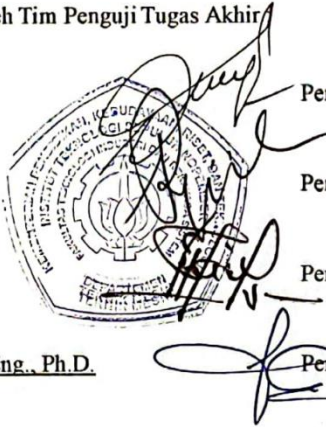
TUGAS AKHIR

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 :

Felix Rajaim B Munthe
NRP. 0211184000121

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir

1. **Dinny Harnany, S.T., M.Sc.**
NIP.198905132019032013
Pembimbing
 2. **Arif Wahjudi, S.T., M.T., Ph.D.**
NIP.195811061986011002
Penguji
 3. **Ir. Sampurno, M.T.**
NIP.196504041989031002
Penguji
 4. **M. Khoirul Effendi, S.T., M.Sc.Eng., Ph.D.**
NIP.198204142010121001
Penguji
- 

SURABAYA

Agustus, 2022

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

APPROVAL SHEET

TOOL LIFE SIMULATION OF HOT FORGING DIE OF FEMORAL STEM HIP ARTHROPLASTY FINAL PROJECT

Submitted to fulfill one of the requirements
for obtaining a degree Bachelor of Engineering at
Undergraduate Study Program of Mechanical Engineering
Department of Mechanical Engineering
Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

By : **Felix Rajaim B Munthe**
NRP. 02111840000121

Approved by Final Project Examiner Team :

1. **Dinny Harnany, S.T., M.Sc.**
NIP.198905132019032013
Advisor
2. **Arif Wahjudi, S.T., M.T., Ph.D.**
NIP.195811061986011002
Examiner
3. **Ir. Sampurno, M.T.**
NIP.196504041989031002
Examiner
4. **M. Khoirul Effendi, S.T., M.Sc.Eng., Ph.D.**
NIP.198204142010121001
Examiner

SURABAYA
August, 2022

(This page is intentionally left blank)

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama mahasiswa / NRP : Felix Rajaim B Munthe / 02111840000121
Departemen : Teknik Mesin
Dosen Pembimbing / NIP : Dinny Harnany, S.T., M.Sc. / 198905132019032013

dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “Simulasi Penentuan Umur Cetakan Proses *Hot Forging* untuk Produk *Femoral Stem Hip Arthroplasty*” adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 29 Juli 2022

Mengetahui

Dosen Pembimbing

(Dinny Harnany, S.T., M.Sc.)
NIP. 198905132019032013



Mahasiswa,

(Felix Rajaim B Munthe)
NRP.02111840000121

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

Name of student / NRP : Felix Rajaim B Munthe / 02111840000121
Department : Mechanical Engineering
Advisor / NIP : Dinny Hamany, S.T., M.Sc. / 198905132019032013

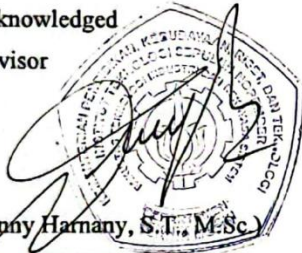
hereby declare that the Final Project with the title of "Tool Life Simulation of Hot Forging Die of Femoral Stem Hip Arthroplasty" is the result of my own work, is original, and is written by following the rules of scientific writing.

If in the future there is a discrepancy with this statement, then I am willing to accept sanctions in accordance with the provisions that apply at Institut Teknologi Sepuluh Nopember.


Surabaya, 29 July 2022

Acknowledged

Advisor


(Dinny Hamany, S.T., M.Sc.)
NIP. 198905132019032013

Student


(Felix Rajaim B Munthe)
NRP.02111840000121

(This page is intentionally left blank)

SIMULASI PENENTUAN UMUR CETAKAN PROSES HOT FORGING UNTUK PRODUK FEMORAL STEM HIP ARTHROPLASTY

Nama Mahasiswa/NRP : Felix Rajaim B Munthe
Jurusan : Teknik Mesin FT-IRS ITS
Dosen Pembimbing : Dinny Harnany, S.T., M.Sc.

ABSTRAK

Osteoarthritis (OA) merupakan salah satu penyakit sendi yang paling sering ditemui di Indonesia. Penyakit ini bersifat degeneratif dan terjadi karena adanya inflamasi kronis pada sendi dan tulang yang ada di sekitar daerah tersebut. Efek yang ditimbulkan dari penyakit ini adalah rasa nyeri pada sendi, kekakuan sendi dan kreptitasi pada tulang rawan sendi. Efek ini nantinya akan menyebabkan keterbatasan gerak, penurunan kekuatan dan ujungnya akan menyebabkan penurunan kualitas hidup. Di Indonesia sendiri, prevalensi penyakit sendi 7,3 % dengan prevalensi terbesar pada kelompok usia 35 – 44 tahun dengan prevalensi 6,3 %. Pengobatan yang paling sering dilakukan adalah dengan *hip arthroplasty*. Pada operasi ini tulang pinggul yang bermasalah diganti dengan *femoral head* dari material titanium atau *stainless steel*. Pembuatan implan ini umumnya dilakukan dengan metode *casting* dan *forging*. Akan tetapi berdasarkan sifat mekanik dan keunggulan lainnya, dipilih metode *forging*. Indonesia sendiri masih melakukan impor untuk komponen ini dan diharapkan dapat memproduksi sendiri. Untuk menekan biaya, sebelum dilakukan proses sungguhan diadakan simulasi menggunakan perangkat lunak untuk proses *forging* tersebut.

Pada penelitian ini, tahapan yang disimulasikan adalah tahap *last forging* dengan menggunakan material plat SS316L dan batang Ti6Al4V. Pertama-tama, dibuat benda *raw material* dengan SolidWorks sesuai dengan geometri yang sudah ditetapkan sebelumnya. Selanjutnya dilakukan simulasi *last forging* dengan menggunakan metode elemen hingga yaitu ANSYS Workbench LS-DYNA. Adapun beberapa tahapan dalam simulasi ini yaitu pendefinisian material, *setup* simulasi, *meshing* pada benda kerja *last forging*, penentuan parameter *forging* dan analisis hasil. Hasil yang didapat pada simulasi ini adalah deformasi total dan tegangan ekuivalen maksimal. Nantinya hasil ini akan dimasukkan kedalam persamaan *Archard Wear Equation*. Dari persamaan tersebut akan didapatkan *depth of wear* dan dapat kita gunakan untuk menentukan umur dari *die*

Dari penelitian ini didapatkan hasil berupa tegangan ekuivalen pada *die*, *total deformation* pada *workpiece*, dan *tool life die*. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa *tool life* yang didapatkan pada penempaan *workpiece* plat lebih tinggi dibanding dengan batangan, tetapi nilai ini berbanding terbalik dengan kenaikan ketebalan untuk *workpiece* plat dan diameter leher untuk batangan. Nilai *tool life* terbesar didapatkan pada penempaan *workpiece* plat dengan ketebalan 12 mm yaitu sebesar 5767 siklus dan nilai terkecil pada batangan dengan diameter 26 mm yaitu sebesar 3213

Kata Kunci : Hip Arthroplasty, Hot Forging, Femoral Stem, Stainless Steel 316L, Ti6Al4V

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

TOOL LIFE SIMULATION OF HOT FORGING DIE OR FEMORAL STEM HIP ARTHROPLASTY

Student Name/NRP : Felix Rajaim B Munthe
Department : Mechanical Engineering
Advisor : Dinny Harnany, S.T., M.Sc.

ABSTRACT

Osteoarthritis (OA) is one of the most common joint diseases in Indonesia. This disease is degenerative and occurs due to chronic inflammation of the joints and bones around the area. The effects of this disease are pain in the joints, joint stiffness and creptitation of the joint cartilage. This effect will later cause limitation of movement, decrease in strength and ultimately will cause a decrease in quality of life. In Indonesia alone, the prevalence of joint disease is 7.3% with the highest prevalence in the 35-44 year age group with a prevalence of 6.3%. The most common treatment is hip arthroplasty. In this operation the problematic hip bone is replaced with a titanium or stainless steel femoral head. These implants are generally made by casting and forging methods. However, based on the mechanical properties and other advantages, the forging method was chosen. Indonesia itself is still importing this component and is expected to produce its own. To reduce costs, before the actual process is carried out, a simulation is carried out using software for the forging process.

In this study, the stage that is simulated is the last forging stage using SS316L plate material and Ti6Al4V rods. First of all, a raw material object is created with SolidWorks according to a predefined geometry. Furthermore, the last forging simulation was carried out using the finite element method, namely ANSYS Workbench LS-DYNA. There are several stages in this simulation, namely material definition, simulation setup, meshing on the last forging workpiece, determination of forging parameters and analysis of results. The results obtained in this simulation are total deformation and maximum equivalent stress. Later these results will be entered into the Archard Wear Equation equation. From this equation we will get the depth of wear and we can use it to determine the age of the die

From this study, the results obtained in the form of equivalent stress on the die, total deformation on the workpiece, and tool life of the die. The results of this study indicate that the tool life obtained for forging plate workpieces is higher than for bars, but this value is inversely proportional to the increase in thickness for plate workpieces and neck diameter for bars. The largest tool life value was found in the forging of the workpiece plate with a thickness of 12 mm, which was 5767 cycles and the smallest value was in the bar with a diameter of 26 mm, which was 3213.

Keywords: *Hip Arthroplasty, Hot Forging, Femoral Stem, Stainless Steel 316L, Ti6Al4V*

(This page is intentionally left blank)

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah Bapa Yang Maha Kuasa, karena atas berkah dan izin-Nya Tugas Akhir ini dapat terselesaikan. Penulis sangat menyadari bahwa keberhasilan dalam penyelesaian Tugas Akhir ini tidak terlepas dari dukungan dan bantuan berbagai pihak. Melalui kesempatan yang baik ini, penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih dan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada pihak-pihak yang telah banyak membantu dan mendukung baik secara moril maupun materiil dalam proses penyelesaian Tugas Akhir ini, antara lain:

1. Ayahanda Ferdinan Munthe, Ibunda Eva Sembiring, Patrice, Farel dan keluarga yang senantiasa memberi dukungan dan doa hingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini.
2. Ibu Dinny Harnani, S.T., M.Sc. dan Bapak Fahmi Mubarak, S.T., M.Sc., Ph.D., selaku dosen pembimbing Tugas Akhir penulis yang selalu memberikan saran, arahan, motivasi, dan ilmunya yang sangat bermanfaat kepada penulis. Terima kasih atas dedikasi dan waktu yang telah diberikan.
3. Bapak Arif wahjudi, S.T., M.T., Ph.D., Bapak Ir. Sampurno, M.T., dan Bapak M. Khoirul Effendi, S.T., M.Sc.Eng., Ph.D. selaku dosen penguji Tugas Akhir penulis. Terima kasih atas waktu dan saran-saran yang telah diberikan.
4. Bapak Alif Wikarta, S.T., M.Sc., Ph.D., selaku dosen wali penulis yang banyak memberi dukungan dan kemudahan selama perkuliahan
5. Seluruh Bapak dan Ibu Dosen Teknik Mesin ITS yang telah mendidik penulis dalam mempelajari ilmu teknik mesin dan juga ilmu kehidupan yang sangat luas ini.
6. Shindyloken Juni Artha Tarigan sebagai partner dan sahabat yang telah menemani penulis sebelum dan dalam penyusunan tugas akhir, mendukung dan selalu memberi motivasi kepada penulis. Terimakasih untuk semua hal baik, doa dan hiburan yang diberikan kepada penulis
7. Rekan-rekan grup *P a r a B g s t* dan *Strike Squad* yang telah menemani penulis dalam mengarungi pengalaman-pengalaman seru selama kurang lebih 4 tahun terakhir. Terima kasih dan sampai jumpa di pertemuan seru selanjutnya.
8. Keluarga M61 yang telah memberi pengalaman dan pembelajaran berharga kepada penulis selama berkuliah di Teknik Mesin ITS yang sama-sama kita cintai.
9. Seluruh civitas akademika ITS yang baik dan ramah.
10. Seluruh pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam penyusunan Tugas Akhir ini, oleh karena itu saran dan masukan dari semua pihak sangat penulis harapkan. Penulis berharap semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat dan sumbangsih bagi perkembangan ilmu pengetahuan

Surabaya, Juli 2022



Penulis

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

| | |
|---|--------------|
| ABSTRAK | xiii |
| ABSTRACT | xv |
| KATA PENGANTAR | xvii |
| DAFTAR ISI | xviii |
| DAFTAR GAMBAR | xxi |
| DAFTAR TABEL | xxiii |
| BAB I PENDAHULUAN | 1 |
| 1.1 Latar Belakang | 1 |
| 1.2 Rumusan Masalah | 2 |
| 1.3 Tujuan Penelitian..... | 2 |
| 1.4 Batasan Masalah..... | 3 |
| 1.5 Manfaat Penelitian..... | 3 |
| BAB II TINJAUAN PUSTAKA | 5 |
| 2.1 Biomaterial Implan..... | 5 |
| 2.2 Stainless Steel..... | 7 |
| 2.2.1 <i>Austenitic Stainless Steel</i> 316L..... | 7 |
| 2.3 AISI H13 Tool Steel..... | 8 |
| 2.4 <i>Forging</i> | 9 |
| 2.4.1 <i>Cold Forging</i> | 9 |
| 2.4.2 <i>Warm Forging</i> | 9 |
| 2.4.3 <i>Hot Forging</i> | 9 |
| 2.4.4 <i>Closed Die Forging dan Open Die Forging</i> | 10 |
| 2.5 <i>Casting</i> dan <i>Forging</i> | 11 |
| 2.6 Parameter <i>Forging</i> | 13 |
| 2.7 Metode Elemen Hingga (MEH) atau <i>Finite Element Method</i> (FEM)..... | 13 |
| 2.8 Prosedur Umum Metode Elemen Hingga | 16 |
| 2.9 Verifikasi dan Validasi Metode Elemen Hingga..... | 16 |
| 2.9.1 Verifikasi Metode Elemen Hingga..... | 16 |
| 2.9.2 Validasi Metode Elemen Hingga | 17 |
| 2.10 Aplikasi Metode Elemen Hingga | 17 |
| 2.11 Teori Plastisitas Bahan | 18 |
| 2.12 Laju Keausan..... | 20 |
| 2.13 Penelitian Terdahulu..... | 22 |
| BAB III METODE PENELITIAN | 27 |
| 3.1 <i>Flowchart</i> Penelitian | 27 |
| 3.2 Observasi | 28 |
| 3.3 Permodelan..... | 28 |
| 3.3.1 Penentuan Data Awal | 29 |
| 3.3.2 Proses Desain | 31 |
| 3.3.3 Simulasi Last Forging | 34 |
| 3.3.4 Analisis Hasil | 41 |
| BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN | 43 |
| 4.1 Penentuan Parameter dan Dimensi Workpiece..... | 43 |
| 4.2 Analisis Keausan <i>Dies</i> padaa Proses <i>Hot Forging</i> | 45 |
| BAB V KESIMPULAN DAN SARAN | 55 |

| | |
|-----------------------------|-----------|
| 5.1 Kesimpulan | 55 |
| 5.2 Saran | 55 |
| DAFTAR PUSTAKA | 57 |

DAFTAR GAMBAR

| | |
|--|----|
| Gambar 1. 1 Total Hip Arthroplasty (Sivanskar, 2016) | 1 |
| Gambar 2. 1 Implan Semnetara yang digunakan pada operasi patah tulang (Jin, 2017)..... | 5 |
| Gambar 2. 2 Pengaplikasian biomaterial implan pinggul dan lutut (jin, 2017) | 6 |
| Gambar 2. 3 Komponen bagian total hip arthroplasty (Ambrosio, 2017)..... | 6 |
| Gambar 2. 4 Kurva beban perpindahan dari closed die hit forging dengan berbagai macam metode (Atlan, 2005)..... | 10 |
| Gambar 2. 5 Ilustrasi skematik <i>open die forging</i> (https://www.canforge.com/) | 11 |
| Gambar 2. 6 Ilustrasi skematik closed die forging (https://www.schulergroup.com)..... | 11 |
| Gambar 2. 7 (a) Domain dua dimensi umum pada permasalahan nilai batas $\Phi(x,y)$ (b) tiga titik elemen hingga yang didefinisikan di dalam domain (c) elemen tambahan yang menunjukkan sebuah bagian dari mesh elemen hingga pada domain (Hutton, 2004)..... | 15 |
| Gambar 2. 8 (a) <i>meshing</i> domain dengan batas melengkung yang dimodelkan dengan elemen kotak berjumlah 41 buah (b) <i>fine meshing</i> domain batas lengkung yang dimodelkan dengan elemen kotak berjumlah 192 buah. (Hutton, 2004) | 15 |
| Gambar 2. 9 Diagram Alir Penggunaan Metode Elemen Hingga Dalam Kasus Penempaan .. | 18 |
| Gambar 2. 10 Diagram Tegangan-Regangan Material Ulet (Sluzalec, 2003)..... | 20 |
| Gambar 2. 11 Grafik perpindahan <i>upper die</i> terhadap <i>effective</i> dengan variasi kecepatan dan koefisien gesek (Hojjat, 2015)..... | 22 |
| Gambar 2. 12 Distribusi Tegangan (a) dan suhu (b) pada <i>workpiece</i> (Hojjat, 2015)..... | 23 |
| Gambar 2. 13 Geometri keseluruhan dari proses <i>closed-die</i> (Prof. N.C Metha, 2013)..... | 23 |
| Gambar 2. 14 Vonmises dari benda kerja (Prof. N.C. Metha, 2013)..... | 23 |
| Gambar 2. 15 Grafik tegangan pada benda kerja terhadap koordinat dari titik pusat (Prof. N.C. Metha, 2013)..... | 24 |
| Gambar 2. 16 Simulasi pembuatan material (a) raw material, (b) pengurangan tinggi, (c) deformasi final, (d) flashing (M. Maarefdoust 2010)..... | 24 |
| Gambar 2. 17 Grafik perbandingan suhu terhadap regangan plastis efektif (kiri) dan grafik radius cirner terhadap tegangan efektif (kanan) (M. Maarefdoust, 2010)..... | 24 |
| Gambar 2. 18 Grafik perbandingan suhu terhadap regangan plastis efektif (kiri) dan grafik radius cirner terhadap tegangan efektif (kanan) (M. Maarefdoust, 2010)..... | 25 |
| Gambar 2. 19 Dimensi keseluruhan geometri pada proses <i>forming</i> (Prabhakar A, 2013)..... | 25 |
| Gambar 2. 20 Tegangan Von-Mises saat <i>forging</i> (Prabhakar A, 2013) | 26 |
| Gambar 2. 21 Proses Simulasi Penempaan Roda Kereta Api (Ardiansyah, 2021) | 26 |
| Gambar 3. 1 <i>Flowchart</i> Penelitian..... | 27 |
| Gambar 3. 2 Bagan Metode Penelitian..... | 28 |
| Gambar 3. 3 <i>Flowchart</i> Permodelan..... | 29 |
| Gambar 3. 4 Geometri <i>Femoral Stem</i> (a) tampak samping (b) tampak depan | 31 |
| Gambar 3. 5 Sketch <i>femoral stem</i> | 32 |
| Gambar 3. 6 Halaman kerja baru pada <i>Solidworks</i> | 32 |
| Gambar 3. 7 Tampak Atas dan Samping Permodelan <i>Raw Material Last Forging</i> untuk <i>workpiece</i> plat dengan ketebalan 12 mm..... | 33 |
| Gambar 3. 8 Tampak Atas dan Samping Permodelan <i>Raw Material Last Forging</i> untuk <i>workpiece</i> Batangan dengan diameter leher 24 mm..... | 33 |
| Gambar 3. 9 Sketsa cetakan <i>last-forging femoral stem</i> | 33 |

| | |
|---|----|
| Gambar 3. 10 Penentuan <i>engineering data</i> (a) <i>Upper & Lower Die</i> (b) <i>Workpiece</i> | 35 |
| Gambar 3. 11 Skema import material ke simulasi..... | 35 |
| Gambar 3. 12 Desain <i>die</i> dan <i>workpiece</i> pada proses <i>last forging</i> (a) tampak atas (b) tampak atas..... | 36 |
| Gambar 3. 13 Penentuan jenis hubungan (a) <i>frictional contact 1</i> (b) <i>frictional contact</i> Desain <i>die</i> dan <i>workpiece</i> pada proses <i>last forging</i> (a) tampak atas (b) tampak atas..... | 37 |
| Gambar 3. 14 <i>Meshing</i> pada simulasi <i>last-forging</i> (a) tampak depan (b) tampak belakang | 38 |
| Gambar 3. 15 Grafik Uji Konvergensi | 39 |
| Gambar 3. 16 Penentuan letak kecepatan awal | 39 |
| Gambar 3. 17 Penentuan kecepatan gerak <i>die</i> | 40 |
| Gambar 3. 18 Penentuan letak tumpuan (<i>fixed support</i>) | 40 |
| Gambar 3. 19 Pemberian <i>Displacement</i> | 41 |
| Gambar 3. 20 Pemberian <i>End Time</i> | 41 |
| Gambar 3. 21 Contoh hasil <i>last forging</i> | 41 |
| Gambar 4. 1 Proses Simulasi <i>hot forging femoral stem</i> | 43 |
| Gambar 4. 2 <i>workpiece</i> yang dicetak..... | 43 |
| Gambar 4. 3 Geometri benda kerja (a) Plat (b) Batangan | 45 |
| Gambar 4. 4 Distribusi Tegangan Pada <i>Dies</i> | 46 |
| Gambar 4. 5 Grafik Kenaikan Tegangan Equivalen Antar Material Plat terhadap Waktu | 46 |
| Gambar 4. 6 Diagram Perbandingan Tegangan Equivalen Antar Variasi Material | 47 |
| Gambar 4. 7 Deformasi yang terjadi pada <i>workpiece</i> | 48 |
| Gambar 4. 8 Grafik Kenaikan Deformasi Total Antar Material Plat terhadap Waktu..... | 48 |
| Gambar 4. 9 Diagram Perbandingan Deformasi Total antar Material | 49 |
| Gambar 4. 10 Tampak Atas dan Samping Permodelan <i>Raw Material Last Forging</i> untuk <i>workpiece</i> Batangan dengan diameter leher 24 mm..... | 52 |
| Gambar 4. 11 (a) <i>Tool Maker Microscope</i> (b) <i>Scanning Electron Microscope</i> (c) <i>Optical Microscope</i> | 54 |

DAFTAR TABEL

| | |
|--|----|
| Tabel 2. 1 Standar Sifat Mekanik SS Implant Quality (AST F138-13a) (ASTM,2013)..... | 8 |
| Tabel 2. 2 Komposisi Kimia SS Implant Quality (AST F138-13a) (ASTM,2013) | 8 |
| Tabel 2. 3 Properti Mekanik AISI H13 Tool Steel (Ardiansyah, 2021. Ding, 2011)..... | 8 |
| Tabel 2. 4 Hasil tegangan terhadap variasi ketebalan <i>plate</i> (Prabhakar, A, 2013)..... | 26 |
| Tabel 3. 1 Properti material SS316L pada Suhu 1000 ⁰ C (Ghusti Raka, 2020)..... | 29 |
| Tabel 3. 2 Properti Material Ti6Al4V padad Suhu 995 ⁰ C (Chen, 2012) | 30 |
| Tabel 3. 3 Properti Material AISI H13 <i>Tool Steel</i> (Ding, et al. 2011) | 30 |
| Tabel 3. 4 Uji Konvergensi <i>workpiece last forging</i> dengan ukuran <i>uniform</i> dan variasi ukuran elemen..... | 38 |
| Tabel 4. 1 Parameter pada Simulasi | 44 |
| Tabel 4. 2 Variasi <i>Workpiece</i> pada Simulasi..... | 44 |
| Tabel 4. 3 Tegangan Maksimal pada Variasi <i>Workpiece</i> | 47 |
| Tabel 4. 4 <i>Total Deformation</i> pada Variasi <i>Workpiece</i> | 49 |
| Tabel 4. 5 Variasi toleransi pada <i>dies</i> (ASM, 2015) | 51 |
| Tabel 4. 6 <i>Tool Life</i> pada Variasi <i>Workpiece</i> | 52 |

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Osteoarthritis (OA) menjadi salah satu penyakit sendi yang saat ini sering dijumpai di Indonesia. *Osteoarthritis* merupakan penyakit sendi yang sifatnya degenerative akibat adanya proses inflamasi kronis pada sendi dan tulang yang ada di sekitar daerah sendi tersebut. (PAPDI, 2018) Efek yang ditimbulkan penyakit ini adalah rasa nyeri pada sendi, kekakuan sendi dan krepitasi pada tulang sendi rawan. Adapun nyeri pada sendi ini nantinya akan menyebabkan keterbatasan gerak, penurunan kekuatan dan keseimbangan otot, dan dapat juga mengakibatkan kesulitan dan keterbatasan dalam beraktifitas yang nantinya berujung pada penurunan kualitas hidup penderitanya. Di Indonesia, prevalensi penyakit sendi tercatat sebesar 7,3%. Penyakit sendi di Indonesia sering dikaitkan dengan pertambahan usia atau sering disebut sebagai penyakit degenerative. Meskipun demikian, penyakit sendi ini telah terjadi pada masyarakat Indonesia pada rentang umur 15 – 24 tahun dengan angka prevalensi sekitar 1,3%. Angka prevalensi ini terus meningkat pada rentang usia 24 – 35 tahun yaitu sebesar 3,1% dan rentang usia 35 – 44 tahun yaitu sebesar 6,3 %. (Kemenkes, 2018) Bagian tubuh yang paling sering mengalami osteoarthritis yaitu lutut, panggul, tangan dan tulang belakang. Osteoarthritis panggul atau *hip osteoarthritis* terjadi pada sendi panggul (sendi *ball and socket*) dengan *femoral head* kondisi cekung yang dibentuk oleh *acetabulum* dan *labrum* dan disokong pula oleh *femoral stem*. Salah satu cara penyembuhan penyakit ini adalah perawatan bedah dengan mengganti pinggul total atau disebut dengan *hip arthroplasty*. *Hip arthroplasty* adalah salah satu prosedur bedah untuk mengganti sendi pinggul dengan *hip* buatan. (American Academy of Orthopaedic Surgeons, 2020)



Gambar 1. 1 Total Hip Arthroplasty (Sivanskar, 2016)

Implant *hip prosthesis* merupakan salah satu teknologi biomaterial yang fungsinya adalah mengembalikan fungsi pangkal paha yang patah dan meningkatkan mobilitas pada sendi. (Ambrosio, 2017) Pada umumnya material yang digunakan untuk pembuatan implant adalah biomaterial berbasis logam seperti *stainless steel* dan titanium. Implant *stainless steel* khususnya tipe 316L cukup sering digunakan dalam dunia ortopedik karena memiliki beberapa keuntungan misalnya lebih ekonomis dengan sifat mekanik bagus dan mudah di fabrikasi. Titanium juga cukup sering digunakan untuk prosthesis dengan kualitas premium karena sifatnya lebih ringan dan tidak terasa. *Stainless steel* 316L merupakan baja tahan karat austenitic dengan keunggulan sifat mekanik, ketahanan korosi dan biokompatibilitas yang tinggi dengan tubuh manusia. (Jones, 2017) Dalam “ASTM F138-13a untuk material implant “*Standard specification for Wrought 18Chromium-14Nickel-2.5Molybdenum Stainless Steel*

Bar and Wire for Surgical Implant (UNS S31673)“ dinyatakan bahwa didalam implant tulang 316L harus terdapat kandungan kromium tinggi dengan kandungan 16 – 18% dan kadar nikel 13 – 15%.

Pembuatan implant terutama dalam *femoral stem* pada *hip prosthesis* pada umumnya dibuat dengan metode pengecoran (*casting*) atau penempaan (*forging*). (Yusof dkk, 2015) Untuk metode *casting*, digunakan metode *investment casting*. *Forging* adalah proses deformasi dimana benda kerja diletakkan diantara 2 cetakan yang disebut *dies*, penekanan benda kerja dapat dilakukan dengan 2 metode yaitu tekanan kejut dan tekanan perlahan. Implant yang dibuat dengan penempaan memiliki sifat mekanik yang lebih baik daripada dengan metode cor. (Williams, 2017) Oleh karena itu, metode penempaan menjadi pilihan terbaik sehingga dapat menggantikan peran fungsi tulang asli. Saat ini, Indonesia masih melakukan impor untuk mencukupi kebutuhan terhadap *Hip Arthroplasty* ini.

Dalam proses desain produk, pada umumnya akan dilakukan simulasi menggunakan perangkat lunak terlebih dahulu sebagai studi awal sebelum masuk ke tahap pembuatan prototipe. Hal ini dilakukan untuk mengoptimalkan parameter saat pembuatan prototipe dan mengurangi *losses* material pada saat eksperimen. Simulasi THA dengan menggunakan *software* sudah pernah dilakukan oleh Muhammad Ghusti pada penelitiannya yang berjudul “Simulasi Pembuatan Femoral Stem Hip Arthroplasty Dengan Metode Hot Forging” dengan *software* ANSYS. Akan tetapi, penelitian yang dilakukan oleh Ghusti raka menggunakan *plugins explicit dynamics*. Kelemahan dari metode ini adalah *plugins* yang digunakan tidak spesifik untuk menggambarkan kondisi *real* pada saat eksperimen. Selain itu, tegangan von-mises yang dihasilkan pada benda kerja juga terlalu besar. Oleh karena itu pada penelitian kali ini digunakan metode lain yang lebih spesifik untuk kegiatan *forging* yaitu LS-Dyna.

Simulasi pemodelan *femoral stem* pada penelitian kali ini akan dilakukan dengan metode *finite element method* dengan menggunakan perangkat lunak ANSYS LS-Dyna menggunakan material plat *stainless steel 316L* dan batangan Ti6Al4V. Adapun model *femoral stem* yang digunakan pada penelitian ini adalah sesuai dengan ukuran anatomi orang Indonesia atau sering dikenal dengan ras Mongoloid. Untuk *workpiece* plat, *workpiece* akan digambar sesuai dengan bentuk dari *die last forging* dengan perangkat lunak Solidworks sesuai dengan target geometri yang diinginkan. Untuk *workpiece* batangan akan ditekuk pada proses *pre forging*. Kemudian, material akan melalui tahap *last forging*. Simulasi kali ini dilakukan dengan variasi parameter kecepatan pembebanan yaitu sebesar 300mm/s dengan variasi sebagai berikut. *Workpiece plat* menggunakan ketebalan 12, 13 dan 14 mm. untuk *workpiece* batangan menggunakan variasi diameter leher sebesar 24,25 dan 26 mm. Dari variasi tersebut, akan dilakukan analisis berdasarkan tegangan *von mises* pada *die*. Hal ini dilakukan untuk mengetahui *tool life* pada *die* pada saat penempaan *femoral stem*. Hasil dari simulasi *hot forging* hip prosthesis ini diharapkan dapat memberikan informasi dan dapat menjadi sumber referensi bagi manufaktur implant terutama manufaktur local mengenai umur *die forging* untuk membentuk *hip prosthesis* dengan mempertimbangkan jumlah tegangan yang terjadi pada benda kerja dan *die*

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah yang diangkat dalam Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana cara melakukan simulasi penentuan *tool life* pada *die last forging femoral stem hip arthroplasty* dengan *software* ANSYS LS DYNA ?
2. Berapa jumlah siklus maksimal yang bisa dilakukan sebelum *die* harus diganti ?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari dilaksanakannya Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Untuk mengetahui cara melakukan simulasi penentuan *tool life* pada *die last forging femoral stem hip arthroplasty* Dengan *software* ANSYS LS DYNA
2. Untuk mengetahui jumlah siklus maksimal yang bisa dilakukan sebelum *die* harus diganti

1.4 Batasan Masalah

Pada penelitian kali ini yang menjadi batasan antara lain :

1. Material bersifat homogen dan isotrop
2. Dimensi *femoral stem* yang akan dibentuk disesuaikan dengan ras mongoloid (Indonesia)
3. Kecepatan *die* sebelum menyentuh *workpiece* dianggap konstan untuk mempercepat konstan untuk mempercepat simulasi
4. Analisis yang dilakukan tidak memasukkan pengaruh perpindahan panas
5. Distribusi suhu merata pada benda kerja
6. Material pada *last forging* adalah hasil dari percobaan *pre forging*

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dilakukannya Tugas Akhir ini adalah :

1. Sebagai referensi analisa *tool life forging* pada *die femoral stem* dengan material SS316L sesuai ukuran anatomi orang Indonesia (ras mongoloid)
2. Sebagai media penelitian dan pengembangan ilmu pengetahuan khususnya pada bidang Kesehatan khususnya pada implant tulang pinggul
3. Meningkatkan kemampuan mahasiswa dalam penggunaan *software* desain maupun simulasi

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

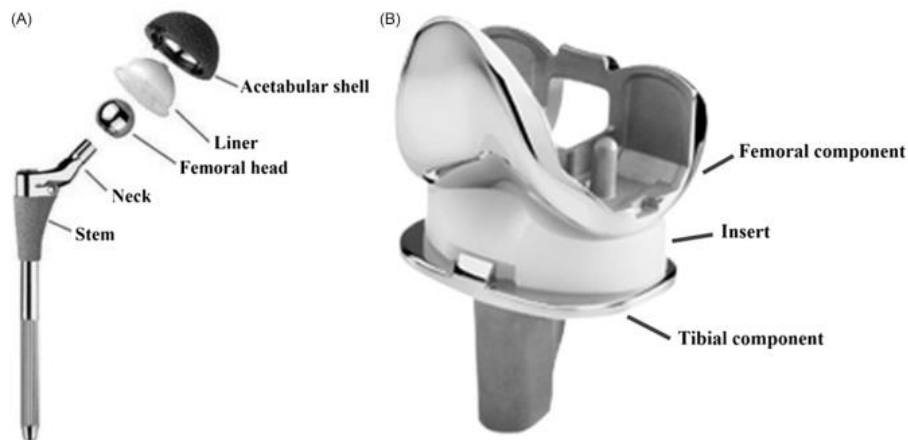
2.1 Biomaterial Implan

Biomaterial dapat diartikan sebagai material yang digunakan dan diterapkan untuk aplikasi medis. Biomaterial berfungsi sebagai material yang ramah jika digunakan sebagai katup jantung, atau bioaktif jika dibuat menjadi produk lain seperti implant pinggul. (Tathe, 2010). Istilah biomaterial mengacu pada biokompatibilitas. (Chen, 2015) Adapun Biokompatibilitas berarti kemampuan material untuk berinteraksi dengan tubuh tanpa adanya reaksi beracun bagi tubuh manusia. (Cahyanto, 2009) Biokompatibilitas dari material dapat berarti aman secara kimia dari material yang digunakan/ditanamkan, seperti bebas dari korosi paduan dan ion logam yang mengandung zat berbahaya. Biokompatibilitas juga dapat melihat dampak fisik yang selaras dari bahan apa yang ditanamkan pada jaringan disekitarnya dampak fisik ini dapat meliputi sifat mekanik dari material terhadap organ misalkan tulang di sekitarnya. dalam konsep ini, biokompatibilitas dari biomaterial implan dari logam dapat ditentukan secara langsung oleh ketahanan korosi dan efek biologis yang ditimbulkan dari ion logam yang digunakan. (Chen, 2015) Adapun contoh dari aplikasi biomaterial yang digunakan pada dunia Kesehatan yaitu plat penyambung tulang. (Cahyanto, 2009)



Gambar 2. 1 Implan Semnetara yang digunakan pada operasi patah tulang (Jin, 2017)

Dilihat dari umur penggunaannya implan tulang terbagi menjadi dua jenis yaitu implan sementara dan implan permanen implan sementara biasanya dapat membantu menyembuhkan tulang dengan waktu yang sementara. di di contoh dari impor sementara yaitu plates, screw , pins, wires dan nails. Contoh implan sementara dapat kita lihat dari gambar 2.1. berbeda dengan implan sementara implan permanen diharapkan untuk dapat berperan membantu pergerakan manusia dalam waktu yang lama dan dibuat untuk tidak diganti. implan permainan ini biasanya dapat dibuat dari berbagai macam material contoh material tersebut adalah baja, keramik atau polimer. Contoh dari implant permanen adalah implant yang digunakan pada persendian. Persendian di sini bisa termasuk pinggul, lutut, engkel dan bahu. Secara khusus prosthesis pada sendi pinggul dan lutut mengalami perkembangan yang cukup pesat dan cukup sering digunakan pada dunia medis dalam beberapa tahun terakhir. Namun dikarenakan adanya bentuk yang cukup rumit dan akhiran beban yang sulit dianalisa membuat proses ini sulit untuk dirancang Adapun pergantian total pada pinggul terdiri dari batang, kepala femoral, liner dan asetabular cup. Liner melindungi dari kerusakan aus dan cup memberikan perlindungan bagi tulang induk. Contoh aplikasi penerapan biomaterial pada implan tulang yang patah dengan ilustrasinya ditunjukkan pada gambar 2.2



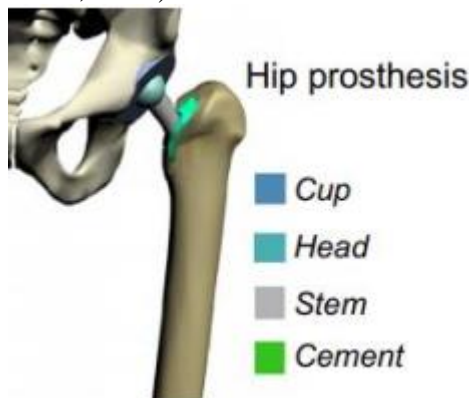
Gambar 2. 2 Pengaplikasian biomaterial implan pinggul dan lutut (jin, 2017)

Agar material implant aman dan sesuai dengan waktu yang ditentukan, implant logam harus memiliki beberapa kriteria dan karakteristik berikut yaitu (Chen, 2015) :

1. Biokompatibilitas yang baik
2. Tahan terhadap korosi
3. Sifat mekanik yang cocok
4. Ketahanan aus yang tinggi

Hip Arthroplasty (femoral stem)

Hip arthroplasty adalah suatu pendekatan operasi yang paling umum dan yang paling banyak digunakan dan yang fungsinya adalah untuk mengembalikan fungsi biomekanik pinggul yang rusak. Praktik operasi ini sering pula disebut dengan penggantian pinggul total atau *total hip arthroplasty*. Dalam operasi ini tulang dan tulang rawan yang telah rusak akan dipotong dan diganti dengan komponen prostetik dari implan. Adapun prostesis pada dasarnya terdiri atas komponen femoral dalam hubungannya dengan cangkir asetabular atau *acetabular cup*. Bagian seperti bentuk leher dan kepala komponen femoral femoralis membentuk batang dan mereka dapat dipisahkan bersama melalui permukaan yang meruncing. Komponen femoral dan asetabular ini bisa sdiberi perlakuan *cemented* atau *non-cemented*. *Cemented prosthesis* ditunjukkan Ketika jaringan yang terdapat masalah tidak memenuhi persyaratan kesesuaian struktur yang sehat. (Ambrosio, 2017)



Gambar 2. 3 Komponen bagian total hip arthroplasty (Ambrosio, 2017)

Femoral Stem (Prosthetic Stem)

Batang prostetik adalah komponen pinggul yang bergabung dengan tulang paha. Berdasarkan gambar 2.3, batang akan disesuaikan dengan jalur meduler melewati epiphysis tulang paha. Nantinya batang utama akan menggantikan *cancellous bone*, menempati bagian dari, menempati bagian *medullary canal*, dan nantinya akan menggantikan bagian dari jaringan *femoral head*. Bagian *femoral stem* bisa termasuk dalam material sintesis dan mengambil peran biomekanik dalam pergantian tulang paha alami. Saat ini, satu-satunya metode pendekatan pemulihan sendi manuasia adalah dengan pemasangan batang pahah kedalam kanal. Dalam pembuatan implant, logam *stainless steel*, kobalt-kromium, dan Ti6Al4V telah banyak digunakan sebagai bahan dasar pembuatan batang paha. Pemilihan material logam bergantung pada nilai kekuatan Lelah dari logam (*fatigue*). (Ambrosio, 2017)

2.2 Stainless Steel

Stainless steel merupakan baja paduan yang memiliki unsur kromium sekurang-kurangnya 12%. Beberapa jenis *stainless steel* memiliki kandungan nikel dan ada juga yang tidak. Baja jenis ini banyak digunakan sebagai bahan baku implant. *Stainless steel* umumnya digunakan pada kondisi kerja yang membutuhkan ketahanan korosi dan panas tinggi. Selain kromium dan nikel biasanya *stainless steel* juga ditambahkan unsur lain misalnya molybdenum, tembaga, titanium dan niobium dengan tujuan meningkatkan ketahanan korosi dan memperbaiki struktur mikro dan sifat mekanik. (Dutta, 2018)

Kelebihan yang dimiliki oleh baja tahan karat ialah material tersebut mempunyai keuletan yang sangat tinggi, harga yang terjangkau dan relative mudah dibuat daripada paduan lain dalam implant orthopedi. Berdasarkan karakteristik struktur mikronya, *stainless steel* dapat dibedakan menjadi empat jenis antara lain austenitic, ferritic, martensitic dan dupleks (Dutta, 2018) dari keempat jenis tersebut, *stainless steel* jenis austenitik adalah yang paling banyak digunakan karena ketahanannya terhadap korosi yang cukup tinggi, sifat mekanik yang sangat baik, kemampuan las yang baik dan biaya perawatannya rendah. (Davis, 1994)

2.2.1 Austenitic Stainless Steel 316L

Baja *stainless austenitic* adalah jenis *stainless steel* dengan kandungan berat kromium sebesar 18-25% dan terdapat pula kandungan nikel sebesar 8-20%. (Chen, 2015) Kandungan nikel pada *austenitic stainless steel* dimaksudkan agar fasa *austenite* stabil hingga suhu ruang. Kandungan krom memberikan nilai ketahanan korosi pada *stainless steel*, dimana fungsinya adalah menaikkan nilai kestabilan oksida pada permukaan. Hal ini membuat *austenitic stainless steel* memiliki sifat tahan korosi dan kekuatan yang baik sehingga dapat diaplikasikan sebagai material implant. (Talha, 2013)

Struktur kristal yang dimiliki oleh *austenitic stainless steel* adalah FCC. Struktur kristal ini memungkinkan *austenitic stainless steel* untuk diberi perlakuan *rolling* dalam keadaan dingin hingga reduksi sebesar 90%. (Maburi, 2012) Struktur kristal FCC bersifat tangguh dan ulet sehingga tidak mengalami kehilangan kekuatan pada temperature tinggi dibandingkan dengan logam lain yang punya struktur kristal BCC. (Davis, 1994) Selain itu, *austenitic stainless steel* memiliki kemampuan deformasi yang sangat tinggi. *Austenitic stainless steel* juga bersifat diamagnetik. (Talha, 2013) Untuk meningkatkan nilai kekerasan, *austenitic stainless steel* biasanya diberi perlakuan *cold-working*.

Austenitic stainless steel banyak digunakan sebagai material implant. Umumnya, jenis *stainless steel* yang banyak digunakan untuk pembuatan implant tulang adalah tipe 316L. SS 316 L merupakan salah satu biomaterial untuk pembuatan implant tulang, dimana komposisi material tersebut yaitu kandungan kromium dan nikel yang tinggi dengan kandungan karbon yang rendah. Kandungan molybdenum menambah ketahanan korosi pada SS 316 L.

(Fernandez-Abia, 2013) Kandungan material yang digunakan sudah sesuai dengan “*ASTM F138-13a “Standard Specification for Wrought 18 Chromium-14Nikel-2.5Molybdenum Stainless Steel Bar and Wire for Surgical Implant(UNS 231673)”*” yang akan ditampilkan pada table 2.1 dan 2.2

Tabel 2.1 Standar Sifat Mekanik SS Implant Quality (AST F138-13a) (ASTM,2013)

| <i>Condition</i> | <i>Annealed</i> |
|--|-----------------|
| <i>Ultimate Tensile Strength (MPa)</i> | 490 |
| <i>Yield Strength (MPa)</i> | 190 |
| <i>Elongation (%)</i> | 40 |
| <i>Reduction in Area (%)</i> | 50 |

Tabel 2.2 Komposisi Kimia SS Implant Quality (AST F138-13a) (ASTM,2013)

| <i>Element</i> | <i>% Composition (mass)</i> |
|-------------------|-----------------------------|
| <i>Carbon</i> | 0.03 max |
| <i>Manganese</i> | 2 max |
| <i>Phosphorus</i> | 0.025 max |
| <i>Sulfur</i> | 0.01 max |
| <i>Silicon</i> | 0.75 max |
| <i>Chromium</i> | 17 to 19 |
| <i>Nickel</i> | 13 to 15 |
| <i>Molybdenum</i> | 2.25 to 3 |
| <i>Nitrogen</i> | 0.1 max |
| <i>Copper</i> | 0.5 max |
| <i>Iron</i> | <i>Balance</i> |

2.3 AISI H13 Tool Steel

AISI H13 adalah baja perkakas dengan *hardenability* yang tinggi, *thermal fatigue* yang baik, dan dapat mempertahankan ketangguhan dan kekuatan pada suhu tinggi. Kemampuannya untuk dikeraskan dan ketangguhannya yang tinggi membuat H13 digunakan untuk membuat mandrel, *die*, *die holder*, blok, mold plastik dan banyak lagi. Pada penelitian ini juga digunakan *die* dengan material tersebut. Properti mekanik dari H-13 *tool steel* dapat dilihat pada tabel dibawah

Tabel 2.3 Properti Mekanik AISI H13 Tool Steel (Ardiansyah, 2021. Ding, 2011)

| <i>Properti</i> | <i>Satuan</i> | <i>Nilai</i> |
|------------------------------|-------------------|--------------|
| <i>Density</i> | Kg/m ³ | 7800 |
| <i>Specific Heat</i> | J/Kg.C | 460 |
| <i>Shear Modulus</i> | MPa | 81000 |
| <i>Tensile Strength</i> | MPa | 1590 |
| <i>Yield Strength</i> | MPa | 1450 |
| <i>Modulus of Elasticity</i> | GPa | 210 |
| <i>Bulk Modulus</i> | GPa | 160 |
| <i>Poissons Ratio</i> | - | 0,3 |
| <i>Hardness</i> | HRC | 45 |

Penelitian kali ini menggunakan material *die* dari AISI H13 *tool steel*. Hal ini dilakukan karena sifat dari AISI H13 yang kuat dan *hardenability* tinggi. Kondisi real di lapangan juga menggunakan material yang sama yaitu AISI H13 *tool steel*

2.4 Forging

Proses *forging* merupakan proses pembentukan material logam atau bahan paduan dengan menerapkan penekanan die terhadap benda kerja. Proses *forging* berdasarkan suhu awal benda kerja dibagi menjadi 3 kelompok yaitu *cold forging*, *warm forging*, dan *hot forging*.

Cold forging dilakukan pada benda kerja dengan suhu sekitar suhu kamar. Untuk penerapannya biasa diaplikasikan pada material karbon dan baja paduan standar. *Warm forging* dilakukan pada rentang suhu diatas suhu kamar hingga tepat dibawah suhu rekristalisasi dari material yang akan ditempa. Biasanya suhu penempaan adalah diangka 800 hingga 1800 F. *Warm forging* memiliki kelebihan yaitu beban kerja mesin yang berkurang, beban tekan yang berkurang dan meningkatnya keuletan baja apabila dibandingkan dengan *cold forging*. Untuk *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. (Battin, 2009)

2.4.1 Cold Forging

Cold forging dapat diartikan sebagai pembentukan atau penempaan material dalam jumlah besar yang dilakukan pada suhu ruang. Terdapat tipe khusus dari *cold forging* yaitu *cold extrusion* dimana material dingin akan mengalir secara plastis akibat gaya tekan menjadi berbagai macam bentuk. (Altan, 2005)

Cold forging merupakan proses yang dilakukan di bawah suhu rekristalisasi atau pada suhu ruang dan tanpa adanya pemanasan sebelum prosesnya. Proses ini juga memiliki keunggulan kapasitas produksi yang tinggi, toleransi dan permukaan yang baik, dan kekuatan tarik yang lebih baik. *Cold forging* dapat dilakukan pada material logam yang menunjukkan keuletan pada suhu ruang. Kelompok material ini biasanya terdiri dari baja dan paduan aluminium. Akan tetapi, paduan tembaga, seng dan titanium bisa di *cold forging* untuk tujuan tertentu. (Altan, 2005)

2.4.2 Warm Forging

Jika kita ingin membuat suatu bentuk rumit dari material dengan kandungan karbon yang tinggi, tegangan tempunya terlalu tinggi dan keuletan materialnya rendah. Oleh karena itu, jika kita menggunakan *cold forging*, akan terjadi memperpendek umur alat. Karena itu, pada kebanyakan kasus, digunakan *warm forging* dimana proses *forging* dilakukan dibawah temperature rekristalisasi. (Altan, 2005)

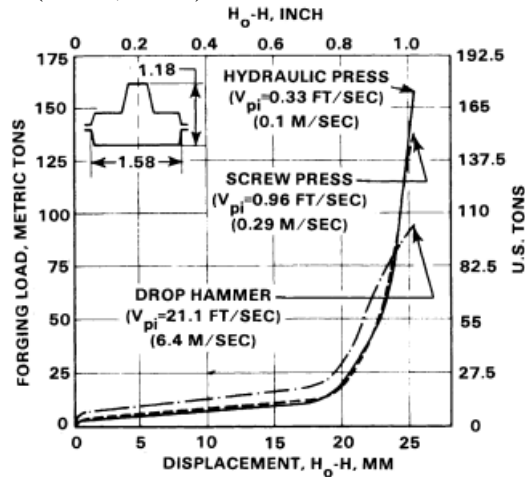
Sebagai contoh, pada *warm forging* material baja dipanaskan pada suhu antara suhu ruang dan suhu *hot forging*. Rentang suhu untuk *warm forging* biasanya adalah 1110 °F sampai 1650 °F atau 600 C sampai 900C. Terdapat pengecualian untuk material *austenitic stainless steel* yaitu penempaan dilakukan pada suhu 200 C sampai 300 C. Proses *warm forging* memiliki beberapa kelebihan antara lain berkurangnya *flow stress*, lebih ulet, pengurangan *strain hardening*, lebih Tangguh, akurasi yang lebih baik dan meningkatnya property dari material hasil *warm forging*. (Altan, 2005)

2.4.3 Hot Forging

Hot forging merupakan proses penempaan paling banyak dalam proses manufaktur. Dalam *hot forging*, penempaan dilakukan dengan suhu kerja diatas suhu rekristalisasi logam yang artinya pada suhu tersebut terbentuk butiran baru dalam logam. Suhu tinggi ini

dimaksudkan untuk menghindari *strain hardening* pada logam selama masa deformasi. (Battin, 2009)

Pada perlakuan *hot forging*, waktu kontak benda kerja dan cetakan adalah factor penentu yang cukup signifikan yang juga mempengaruhi kondisi suhu. Ada beberapa cara untuk melakukan *hot forging* misalnya *hydraulic press*, *screw press* dan *drop hammer*. Pada gambar 2.4 ditampilkan kurva beban-perpindahan pada material baja yang diberi perlakuan *hot forging* dengan peralatan yang berbeda. (Altan, 2005)



Gambar 2. 4 Kurva beban perpindahan dari closed die hit forging dengan berbagai macam metode (Altan, 2005)

Adapun keuntungan dari *hot forging* adalah :

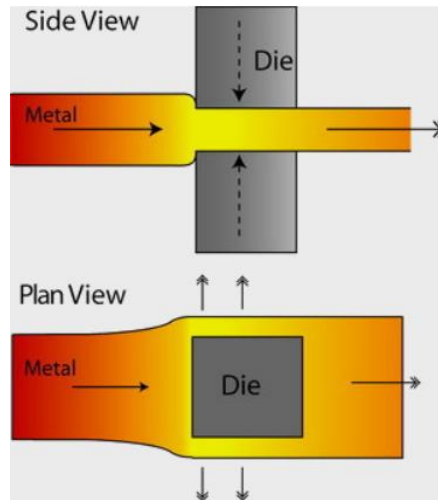
- Laju regangan tinggi dan membuat aliran logam mudah
- Gaya mesin lebih kecil
- Dimungkinkan rekristalisasi dan pemulihan

Kerugian yang didapat dari *hot forging* adalah :

- Sulitnya pelumasan pada suhu tinggi
- Terjadi oksidasi pada benda kerja
- Hasil permukaan yang buruk
- Toleransi kurang tepat
- Ada kemungkinan pembengkokan material selama proses pendinginan. (Battin, 2009)

2.4.4 Closed Die Forging dan Open Die Forging

Berdasarkan desain cetakannya, terdapat 2 jenis forging yaitu *open-die forging* dan *closed-die forging*. *Open die forging* dapat diartikan sebagai pembentukan logam dimana material ditekan diantara cetakan rata dimana berbagai deformasi kompresif dimanipulasi. Dapat pula diasumsikan pada *open die forging* material diberi tekanan pada satu sumbu utama dan penyebaran ke dua sumbu lainnya tidak dibatasi. Pada umumnya, cetakan untuk *cold forging* berukuran kecil jika dibandingkan dengan ukuran keseluruhan dari proses *forging*. (Bombac, 2008)



Gambar 2. 5 Ilustrasi skematik open die forging (<https://www.canforge.com/>)

Pada *open-die forging* di gambar 2. 5, die diberi gaya tekan dari punch yang terletak didalam rongga. Jenis penempaan seperti ini terbatas untuk bentuk sederhana dan ukurannya besar. (Bombac, 2008)

Akan tetapi, *open die forging* memiliki keterbatasan pada geometri dan akurasi produk. Oleh karena itu untuk membuat geometri yang kompleks dan akurat digunakan metode lain yaitu *closed die forging*. Beberapa *part* yang kompleks bahkan hanya bisa diproduksi dengan menggunakan *closed die forging* (Altan, 2005)



Gambar 2. 6 Ilustrasi skematik closed die forging (<https://www.schulergroup.com>)

Dalam *closed die forging* pada gambar 2. 6, *punch* pada metode *closed die forging* akan memberi gaya tekan pada material dan membentuk suatu geometri yang sesuai dengan cetaknya. Keuntungan dari metode ini adalah kemampuannya untuk membuat material yang rumit dengan toleransi yang kecil sekalipun. Oleh karena itu, untuk pembuatan implant medis biasanya menggunakan metode *closed die forging*. Setelah melalui proses ini, akan dilanjutkan dengan proses *finishing* (Chandrasekaran, 2010)

2.5 Casting dan Forging

Pengecoran merupakan proses manufaktur dimana logam cair mengalir karena gravitasi menuju cetakan dan nantinya dia akan membeku mengikuti bentuk dari cetakan tersebut. Proses *casting* terdiri dari beberapa langkah yaitu pelelehan logam, penuangan kedalam cetakan dan menunggu logam cair membeku. Keunggulan dari proses *casting* antara lain (Kamel, 2020)

- Bisa menciptakan geometri kompleks

- Bisa menciptakan bentuk internal dan eksternal
- Bisa membuat bentuk besar
- Produksi massal

Akan tetapi dibalik keunggulannya, terdapat pula kelemahan yang menjadikan *casting* kurang cocok digunakan antara lain

- Sifat mekanik yang terbatas
- Akurasi dan kualitas permukaan yang kurang baik
- Masalah lingkungan

Untuk metode penempaan atau *forging* biasanya digunakan untuk komponen yang penting. *Workpiece* dengan bentuk *billet* baja dipanaskan dan ditempatkan diantara cetakan atas dan bawah. *Billet* ini kemudian diberi tekanan ekstrem dan dibentuk sesuai profil cetakan secara paksa. Aliran dari butiran material bersifat terarah dan diorientasikan untuk meningkatkan keuletan dan ketahanan benturan. Pada penempaan, tidak ada ujung butir yang ter ekspos sehingga membuat produk hasil *forging* memiliki porositas permukaan yang lebih tinggi, umur dan kekuatan *fatigue* yang baik dan keuletan yang lebih tinggi daripada produk hasil pengecoran. Keunggulan produk hasil *forging* antara lain

- Menghasilkan butiran dan karakteristik aliran yang seragam dan dapat di prediksi. Hal ini meningkatkan kekuatan produk
- Menghilangkan rongga gas didalam prosuk yang berpotensi melemahkan bagian logam, memberi keseragaman komposisi kimia dan meningkatkan kekuatan structural
- Memastikan orientasi aliran butir yang yang tepat dan berdampak pada ketahanan *fatigue*, dan peningkata ketahanan benturan. (Kamel, 2020)

Secara singkat, dapat dikatakan bahwa proses penempaan memberi tambahan kekuatan dan ketangguhan dari *billet* aslinya. Akan tetapi perlu diingat bahwa apabila dibandingkan dengan metode pengecoran, investasi, *running cost* dan *maintenance cost* dari peralatan *forging* jauh lebih mahal. Oleh karena itu, untuk mendapatkan harga produk yang lebih ekonomis, kegiatan produksi dengan teknik tempa harus dilakukan dengan waktu yang lebih singkat dan frekuensi yang lebih banyak. Meski demikian, mengingat keunggulannya, untuk produksi dengan jumlah yang besar (*mass production*) , penempaan merupakan metode yang paling hemat biaya. (Battin, 2009)

Bila dibandingkan, produk hasil cor dan tempa, keduanya memiliki perbandingan seperti :

- Material yang ditempa memiliki kekuatan tarik lebih tinggi dari material yang di cor sebesar 26%. Karenanya kita mendapat material yang lebih kuat namun tetap ringan
- Material yang ditempa memiliki kekuatan *fatigue* lebih tinggi daripada material yang di cor sebesar 37%. Itu berarti produk hasil tempa akan bertahan lebih lama.
- Besi tuang (*cast iron*) nilai kekuatann luluh nya adalah 66% dari besi tempa. Adapun kekuatan luluh merupakan indicator ketahanan produk sebelum nantinya berubah bentuk
- Ketika diberi gaya tarik, Material yang di tempa *area reduction* sebesar 58% sedangkan material yang di cor hanya 6%. Ini artinya deformasi sebelum gagal pada material yang ditempa jauh lebih besar daripada material cor. (Williams, 2007)

2.6 Parameter Forging

Pada proses *forging*, bahan berubah bentuk secara plastic dan mengalami gesekan. Dua deformasi menghasilkan panas dalam proses pembentukan logam. Besarnya energi mekanik pada proses penempaan yang diubah menjadi panas hamper mencapai 90-95%. Di pabrik penempaan berkecepatan tinggi seperti mesin pres (Tekan) Mekanik, tekan ulir dan palu, energi panas ini dianggap sebagai fenomena penting. Selama proses penempaan, ada beberapa bagian dari energi panas yang dihasilkan berubah menjadi energi yang membuat logam dan alat-alat bersentuhan dengan logam ini berubah bentuk. Namun, sebagian energi panas tetap bertahanan di bagian yang berubah bentuk. Kondisi pelumasan, masa pakai Alat, struktur dan sifat bahan tempa dipengaruhi oleh suhu yang dihasilkan selama proses penempaan.

Dengan berkembangnya analisis elemen hingga Proses analitik menghasilkan energi panas, yang merupakan efek dari kecepatan Kompresi, waktu kontak, dan perpindahan panas selama pencetakan Logam dapat disimulasikan secara wajar di komputer. Parameter seperti benda kerja (bahan) dan koefisien perpindahan Panas permukaan, koefisien konveksi panas, emisivitas, Dikenal untuk perhitungan perpindahan panas akurat.

Dalam pembentukan logam, perpindahan panas paling bergantung pada parameter dibawah ini

- a. Suhu awal benda kerja
- b. Suhu awal cetakan
- c. Energi panas inelastic
- d. Energi panas akibat gesekan beda kerja atau permukaan cetakan
- e. Kontak konduktansi
- f. Koefisien konveksi

Dalam proses pembentukan logam suhu rata-rata sesaat dalam deformasi benda kerja dapat dihitung dengan persamaan,

$$T = T_w + T_d + T_f - T_t - T_r - T_c \dots \dots \dots (1)$$

Dimana,

- Tw= suhu awal benda kerja
- Td = kenaikan suhu karena deformasi inelastic
- Tf = kenaikan suhu karena gesekan
- Tt = penurunan suhu karena konduktansi kontak
- Tr = penurunan suhu akibat radiasi termal
- Tc = penurunan suhu karena konveksi (Altan, 2005)

2.7 Metode Elemen Hingga (MEH) atau *Finite Element Method* (FEM)

Metode elemen hingga yang sering disebut FEM adalah metode numerik yang berguna untuk mendapatkan solusi yang mendekati permasalahan fisik. Pada awalnya, FEM dikembangkan untuk mempelajari tegangan pada struktur pesawat terbang yang kompleks, akan tetapi saat ini penggunaan FEM sudah meluas dan diterapkan ke berbagai bidang mekanika seperti mekanika fluida dan perpindahan panas. Karena kemampuannya untuk menyelesaikan permasalahan yang kompleks, FEM memiliki peran penting pada bidang ke teknikan. (Seshu, 2012)

Kita harus menyadari bahwa hasil yang diberikan oleh FEM adalah pendekatan. Ini artinya dia bukanlah cara yang paling baik untuk menyelesaikan suatu permasalahan Teknik. Metode terbaik untuk menyelesaikan permasalahan tersebut adalah dengan persamaan diferensial dari metode analisi. Akan tetapi, beberapa permasalahan terlalu kompleks untuk diselesaikan dengan metode analisis atau bahkan tidak ada metode analisis untuk menyelesaikannya. Sebagai contoh jika ingin menghitung gaya hambatan pada badan pesawat

dengan aliran *viscous*. Jika ingin menggunakan metode analitikal, bentuk badan pesawat itu harus dibuat model matematikanya dan diperlukan kondisi batas untuk geometri tersebut. Bahkan meskipun bentuknya umum, persamaan diferensialnya mungkin non-linier sehingga tidak ada metode analitikal untuk menyelesaikan model tersebut. Oleh karena itu perlu dilakukan metode numerik untuk menyelesaikan permasalahan tersebut. (Seshu, 2012)

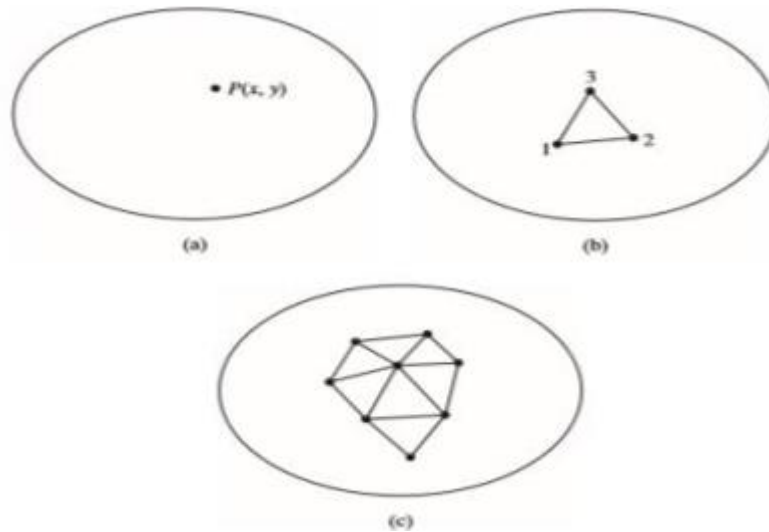
Ada beberapa metode untuk mendapatkan solusi numerik dari suatu permasalahan diferensial. Jika persamaannya adalah orde 1, kita dapat menggunakan beberapa metode seperti Euler, Runge-Kutta, atau metode *multi step* seperti Adam-Bashforth dan Adam-Moulten. Jika persamaannya adalah orde tinggi, kita bisa mengubah ke orde 1 terlebih dahulu kemudian diselesaikan dengan metode orde 1. Ada beberapa Teknik yang sering digunakan untuk menyelesaikan persamaan diferensial parsial antara lain (Seshu, 2012)

1. *Finite Difference Method* (FDM)
2. *Finite Volume Method* (FVM)
3. *Finite Element Method* (FEM)
4. *Boundary Element Method* (BEM)
5. *Spectral Method*
6. *Perturbation Method*

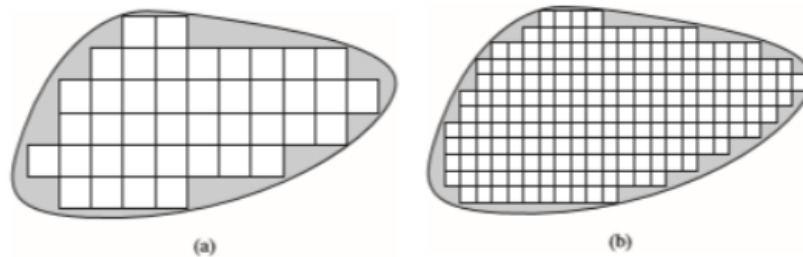
Dalam metode elemen hingga, masalah nilai batas Seringkali dinyatakan oleh struktur fisik. Misalnya, ada sejumlah bahan dengan sifat fisik tertentu. Volume mewakili domain dari Masalah nilai batas yang harus dipecahkan. Secara sederhana, kita nyatakan asumsi dua dimensi dalam sebuah kasus, dimana variabel batas (x, y) akan ditentukan. Titik P (x, y), seperti persamaan fisis berikut diketahui dapat terpenuhi dengan tepat di setiap titik. Karena hal ini, anda mendapatkan solusi matematis pada setiap titik tersebut. Solusinya matematisnya adalah persamaan aljabar variabel tetap. Namun pada kenyataannya domain Secara geometris itu bisa sangat rumit. karena itu, Keakuratan solusi aljabar tertutup sangat rendah. Oleh karena itu, solusi perkiraan didasarkan pada metode numerik dan Analisis teknis seringkali membutuhkan komputasi digital Untuk masalah yang kompleks. Dan analisis Metode elemen hingga atau metode elemen hingga adalah metode yang umum digunakan .Anda bisa mendapatkan solusi perkiraan yang sangat akurat dan akurat Baik (Hutton, 2004)

Proses interpolasi domain fisik pada metode elemen hingga dapat dinyatakan dengan istilah *meshing*. Metode elemen hingga dapat membagi struktur menjadi kecil. Struktur ini sifatnya terbatas, terdefinisi dengan baik, dan sub strukturnya elastic. Hasil dari rangkaian elemen tersebut kita kenal dengan nama *mesh* elemen hingga yang dapat dilihat pada gambar 2.7 dan 2.8.

Umumnya, elemen yang digunakan pada proses *meshing* bentuknya adalah garis lurus dan sangat tidak mungkin bisa memenuhi seluruh domain fisis dalam *mesh* tersebut jika batasan domain bentuknya melengkung. Ilustrasi ini dapat kita lihat pada gambar 2.8a dimana sebuah domain dengan batasan melengkung diberi *meshing* menggunakan elemen berbentuk persegi. Pada gambar 2.8b dilakukan *meshing* yang lebih halus untuk tipe domain yang sama. Semakin halus *meshing*, semakin baik pula akurasi pendekatan yang dihasilkan. Apabila hasil pendekatan interpolasi yang dihasilkan sudah memenuhi permintaan matematis yang pasti, solusi dari metode elemen hingga terhadap permasalahan tersebut sudah dikatakan konvergen terhadap solusi eksak kasusnya



Gambar 2. 7 (a) domain dua dimensi umum pada permasalahan nilai batas $\phi(x,y)$ (b) tiga titik elemen hingga yang didefinisikan didalam domain (c) elemen tambahan yang menunjukkan sebuah bagian dari *mesh* elemen hingga pada domain (Hutton, 2004)



Gambar 2. 8 (a) *meshing* domain dengan batas melengkung yang dimodelkan dengan elemen kotak berjumlah 41 buah (b) *fine meshing* domain batas lengkung yang dimodelkan dengan elemen kotak berjumlah 192 buah. (Hutton, 2004)

Setelah dilakukan dilakukan, hal tersebut menjadi masalah sederhana dalam menggunakan perpindahan dalam menentukan regangan dan tegangan dalam persamaan konstitutif melalui elastisitas. Nilai *input* merupakan hal yang penting bagi permodelan elemen hingga. Ini penting karena nilai *input* menentukan akurasi model yang meliputi sifat material dari bagian yang berbeda dalam struktur, kondisi batas, beban eksternal pada struktur, akurasi *mesh*, dan jenis elemen yang digunakan. Ada banyak cara untuk mendefinisikan element dan itu tergantung pada kondisi geometri dan pembebanan struktur, mulai unsur garis sederhana satu dimensi dan unsur solid tiga dimensi. Jenis elemen yang paling cocok untuk permasalahan 3 dimensi adalah elemen padat 3 dimensi. Macam-macam elemen padat antara lain *wedge*, *brick*, dan elemen *tetrahedral*. Adapun elemen tetrahedral memiliki kemampuan adaptasi geometris yang cukup baik dan cocok untuk melakukan *meshing* secara otomatis sedangkan elemen *wedge* dan *brick* lebih cocok untuk *meshing* secara manual. (Logan, 2012)

Analisa structural meliputi Analisa tegangan, getaran, dan beban tekuk atau yang sering dikenala dengan nama *buckling*. Untuk permasalahan non-struktural meliputi beberapa hal diantaranya perpindahan panas, aliran cairan, distribusi listrik dan potensi magnetic. Penggunaan FEM dapat mempermudah operator dalam mendeteksi dan mengevaluasi tegangan, getaean dan suhu hasil desain sebelum memutuskan untuk membuat prototipe. Dengan penerapan metode elemen hingga, tingkat cacat prototipe tersebut dapat di reduksi secara signifikan. Selain itu, terdapat pula manfaat lain dari metode elemen hingga diantaranya:

- Mampu memodelkan geometri yang tidak beraturan dengan mudah

- Dapat menganalisa pengaruh dinamis
- Menangani kondisi batas yang banyak dan beragam (Logan, 2012)

2.8 Prosedur Umum Metode Elemen Hingga

Terdapat tiga tahap prosedur umum pada analisis elemen hingga yaitu tahap *pre-processing*, *solution* dan *post-processing*. Beberapa tahap tersebut adalah

a. *Pre-processing*

- Mendefinisikan tipe elemen yang akan digunakan
- Mendefinisikan domain geometri permasalahan
- Mendefinisikan sifat material elemen
- Mendefinisikan batas fisis
- Mendefinisikan hubungan antar elemen
- Mendefinisikan sifat geometris elemen
- Mendefinisikan pembebanan

b. *Solution*

- Komputasi nilai yang tidak diketahui dari variabel permasalahan nilai batas
- Komputasi nilai yang di substitusikan untuk mendapatkan variabel tambahan seperti gaya reaksi, tegangan elemen dan aliran panas

c. *Post-processing*

- Perangkat lunak akan mengurutkan, mencetak, dan menempatkan hasil pilihan dari solusi elemen hingga (Hutton, 2004)

2.9 Verifikasi dan Validasi Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga adalah salah satu metode numerik untuk menyelesaikan model matematika dari system atau struktur dimana menggunakan metode analisis tidak memungkinkan. Metode elemen hingga dapat dikatakan sebagai metode formulasi dengan variasi menggunakan prinsip energi potensial minimum dimana nilai yang tidak diketahui dilakukan pendekatan dengan fungsi polynomial. nilai ini bisa berbeda tergantung dari system yang dipilih. Metode elemen hingga bisa diterapkan pada beberapa bidang mekanika misalnya mekanika struktur, mekanika fluida, akustik, elektromagnetik, dll. Pada mekanika struktur, biasanya nilai yang dicari adalah perpindahan dan tegangan pada system.

Perlu diketahui bahwa elemen hingga hanya memberi solusi berupa pendekatan numerik untuk menemukan solusi suatu persamaan diferensiasi parsial. Oleh karena itu masih terdapat beberapa error dan ketidakpastian sehingga kita perlu melakukan verifikasi dan validasi. (Srinivas, 2020)

2.9.1 Verifikasi Metode Elemen Hingga

Tindakan verifikasi dapat diartikan sebagai Langkah pembuktian apakah simulasi melalui perangkat lunak computer bisa menyelesaikan persamaan atau tidak. Dikutip dari pernyataan Law dan Kelton (1991), system permodelan dapat dikatakan valid apabila perbedaan yang dihasilkan antara simulasi yang dibuat dengan kondisi nyata atau eksperimen menunjukkan hasil yang tidak signifikan. Karenanya, verifikasi dapat diartikan sebagai proses sebuah proses dimana model simulasi konseptual diterjemahkan kedalam bahasa pemrograman secara jelas. Verifikasi simulasi secara sederhana dapat dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi dengan hasil lain yang memiliki permasalahan dan system metode elemen hingga yang serupa. (Logan, 2012)

2.9.2 Validasi Metode Elemen Hingga

Validasi merupakan sebuah proses penentuan apakah model konseptual simulasi benar-benar merepresentasikan system nyata yang akan dimodelkan secara akurat. Proses validasi dilakukan dengan cara membandingkan dan memeriksa apakah model sudah mewakili kondisi nyata atau eksperimen. Suatu permodelan dapat dikatakan sudah valid apabila perbedaan model dengan kondisi nyata tidak menunjukkan nilai yang signifikan baik secara karakteristik maupun perilakunya. (Logan, 2012)

2.10 Aplikasi Metode Elemen Hingga

Kegiatan produksi pembentukan logam adalah proses manufaktur yang penggunaannya luas karena hasilnya presisi dan limbah yang dihasilkan sedikit. Selain itu, proses ini juga meningkatkan sifat mekanik benda kerja. Akan tetapi, langkah membentuk desain baru merupakan pekerjaan yang cukup rumit dan membutuhkan banyak percobaan dan penyesuaian demi mencapai kondisi produksi memuaskan. Penggunaan metode “*trial and error*” secara konvensional sudah banyak diterapkan pada proses pembentukan logam. Akan tetapi pendekatan ini memakan biaya yang banyak dan memakan waktu yang cukup lama.

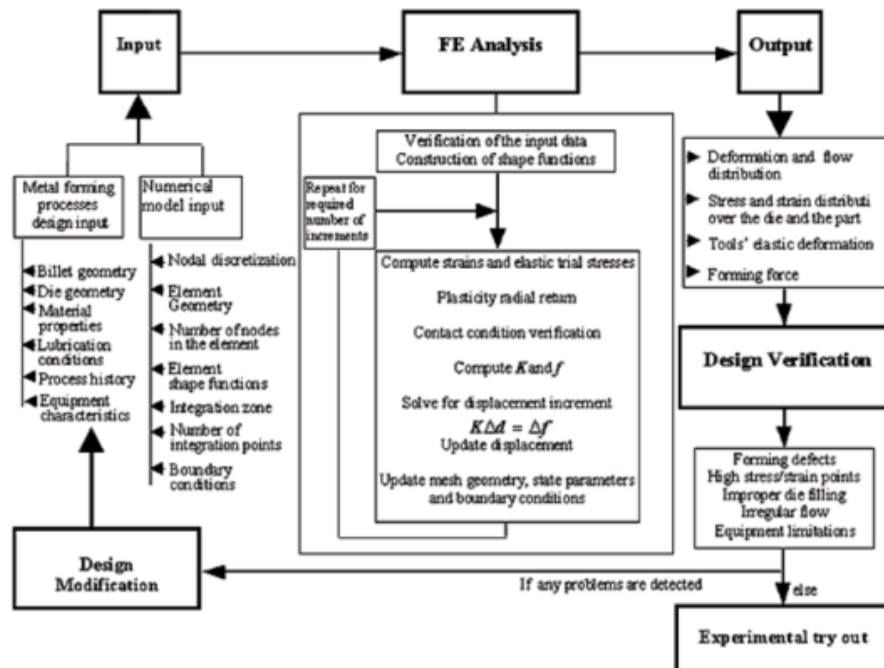
Pendekatan dengan simulasi computer sudah lama menjadi solusi yang dapat diterima dalam industry pembentukan logam dari tahun 1980-an. Analisis pembuatan logam dapat dilakukan dengan menggunakan tiga skala permodelan. (Koop et al., n.d.) Skala pertama dalam pembuatan logam adalah dengan metode analitik yang hanya bisa memprediksi beban prosesnya. Analisis dalam skala local biasa digunakan untuk memprediksi variable termo-mekanis seperti regangan, laju regangan dan suhu

Dengan adanya penegembangann skala besar dalam bidang mekanika perhitungan, metode numerik telah banyak digunakan sebagai salah satu alternatif efektifitas dalam biaya untuk melakukan permodelan local. Permodelan dalam skala mikro dilakukan untuk menghitung pembaharuan atau progress mikri-struktural selama proses pembentukan. Hal ini dilakukan karena metode analisis global hanya berlaku untuk situasi yang sederhana dan metode permodelan mikro masih tergolong baru dan hanya bisa memberikan hasil untuk kondisi tertentu. Karena itu, metode permodelan local adalah jenis pendekatan yang paling populer. Diantara metode lain, (FEM) adalah metode yang paling banyak digunakan dalam analisis pembentukan logam karena metode tersebut mampu untuk membuat model geometri alat dan bagian yang cukup rumit dalam proses pembentukannya.

Pada gambar 2.8 ditunjukkan bagaimana analisis elemen hingga dapat digunakan dalam kegiatan desain pembuatan logam. Metode ini dipilih karena kemampuannya untuk memberikan informasi terperinci untuk membentuk komponen desainer yang meliputi kekuatan, prediksi cacat, pola aliran dan konsentrasi tegangan pada cetakan (*die*). Sebagai contoh, *output* dari regangan dapat menampilkan luas konsentrasi ragangan yang berfungsi untuk mengidentifikasi kemungkinan kegagalan awal pada alat atau memprediksi masalah kemampuan bentuk. Oleh karena itu, desain pembuatan komponen dapat di modifikasi untuk meningkatkan masa pakai alat atau meningkatkan kondisi kemampuan bentuk dan desain baru sebelum barunya dapat diperiksa dengan simulasi elemen hingga sampai berulang kali sebelum pengujian kondisi nyata atau eksperimen.

Ada banyak aspek manufaktur yang bisa di analisis dari hasil simulasi. Aspek tersebut bisa berupa aliran tidak teratur yang bisa menyebabkan cacat internal produk. Selain itu, masalah pengisian cetakan juga bisa diprediksi oleh pola deformasi dan hasil tegangan atau regangan. Kita dapat juga memverifikasi deformasi elastis alat yang harus dikendalikan untuk mempertahankan toleransi yang diinginkan dengan menggunakan metode elemen hingga. Kita

dapat memeriksa konvergensi solusi dari metode ini dengan mengurangi Langkah waktu (*time step*) dan meningkatkan jumlah node dari model analisis. (Roque, 2000)



Gambar 2. 9 Diagram alir penggunaan metode elemen hingga dalam kasus penempaan (Roque, 2000)

2.11 Teori Plastisitas Bahan

Dalam memilih material, ada beberapa aspek yang perlu diperhatikan. Aspek tersebut bisa berupa bentuk *bar*, dan sifat mekanik material yang terdiri dari kekuatan, keuletan, pertambahan Panjang, masa jenis dan kekuatan luluh.

Sifat mekanik material adalah kemampuan bahan untuk menahan gaya atau tegangan eksternal yang dapat diukur secara kuantitatif. Pada saat menahan beban, struktur molekul berada dalam kondisi seimbang. Gaya luar terjadi ketika ada gaya tarik dan tekan yang dapat diwujudkan dalam uji penarikan, penekanan, pemotongan, penempaan, prnggulungan, dan pembengkokan yang akan mengakibatkan material mengalami tegangagn dan berubah bentuk. Jika beban ditingkatkan melewati nilai luluh (*yield strength*) yang dimiliki material, material akan mengalami aliran deformasi dimana dia tidak akan kembali ke bentuk semula atau dengan kata lain mengalami deformasi permanen. Ini dinamakan plastisitas bahan. Dalam melakukan analisis aliran plastis, Langkah pertama yang harus dilakukan adalah menentukan kriterial luluh (*yield criteria*). peningkatan pembebanan melebihi kekuaan luluh (*yield strength*) dan menyebabkan deformasi permanen pada material disebut dengan plastisitas. (Mondelson, 1983). Kebanyakan karakteristik material dipengaruhi oleh suhu. Diagram tegangan-regangan pada material diperoleh pada suhu tertentu berdasarkan percobaan. Suhu yang tinggi berpengaruh terhadap pengurangan kekakuan material sedangkan suhu yang rendah meningkatkan kekakuan dan kekuatan material. Sebadgai pembanding, karakteristik material baja tahan karat berbeda dengan baja karbon. Hal ini terjadi karena kandungan paduannya yang tinggi. Pada suhu kamar, baja tahan karat memberikan respon tegangan-regangan yang lebih baik dari baja karbon jika dilihat dari titik luluh yang telah ditentukan bersamaan dengan rasio tegangan luluh terhadap luluh yang lebih tinggi. Jika dilihat pada suhu tinggi, baja tahan karat menunjukkan keuletan dan kekuatan yang lebih baik daripada baja karbon. (Gardner, 2010)

Pada proses pembentukan, ada beberapa variable yang menunjukkan seberapa besar gaya untuk merubah bentuk material yaitu :

a. Tegangan

Tegangan merupakan besaran yang dihasilkan dari pengukuran gaya (F) yang timbul per satuan luas (A). Akan tetapi, untuk tegangan normal biasanya besaran ini diperoleh dari hasil uji tarik dengan *output* gaya dan elongasi. Karakteristik deformasi benda bergantung pada ukuran specimen. Untuk meminimalisasi factor geometri, gaya dan elongasi di normalisasi terhadap parameter yaitu *engineering stress* dan *engineering strain*. *Engineering strain* dapat dinyatakan dengan persamaan berikut (Callister, 2014)

$$\sigma = \frac{F_n}{A_0} \dots\dots\dots (2)$$

Berbeda dengan tegangan normal, tegangan geser merupakan tegangan tangensial yang bekerja sejajar dengan permukaan bidang. Nilai tegangan geser dapat dinyatakan dengan (Callister, 2014)

$$\tau = \frac{F_t}{A} \dots\dots\dots (3)$$

Tegangan normal dianggap positif jika menimbulkan suatu tarikan (*tensile*) dan dianggap negative jika menimbulkan penekanan (*compression*).

b. Regangan

Ketika kita melakukan uji tarik maka benda akan mengalami perubahan panjang. Perubahan panjang ini disebut *engineering strain*. *Engineering strain* adalah rasio antara perpindahan panjang material dengan panjang awal. Secara matematis, *engineering strain* dapat dinyatakan dengan persamaan dibawah (Callister, 2014)

$$\epsilon = \frac{l_i - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \dots\dots\dots (4)$$

Perubahan laju regangan terhadap waktu disebut *strain rate* atau laju regangan. *Strain rate* merupakan laju deformasi benda ketika mendapat beban sesuai dengan kecepatan yang diterima benda. Adapun hubungan dari *strain rate* terhadap *flow stress* adalah semakin tinggi *strain rate* maka semakin besar pula *flow stress*. *Strain rate* dapat dirumuskan sebagai (Singer, 1995)

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} \dots\dots\dots (5)$$

c. Hubungan Tegangan-Regangan

Dalam mekanika Teknik, dibahas pengaruh gaya luar terhadap system kerja dengan adanya gaya reaksi atau gaya dalam beserta deformasinya. Fungsi gaya tersebut adalah meneruskan gaya luar yang bekerja. Dalam proses pembentukan, sangat penting untuk memanfaatkan sifat plastisitas material saat diberi gaya eksternal. Pada awal pembebanan, gaya terus meningkat dan material akan mengalami sifat elastis kemudian sifat plastis. Dengan memanfaatkan sifat plastis tersebut, proses akan tercapai pembentukan material dan bentuknya akan sesuai dengan yang diinginkan pengguna. (Battin, 2009)

Perubahan regangan plastis bergantung pada riwayat pembebanan. Riwayat pembebanan tersebut dapat berupa suhu, tegangan, laju regangan, dan variable internal yang dapat berupa

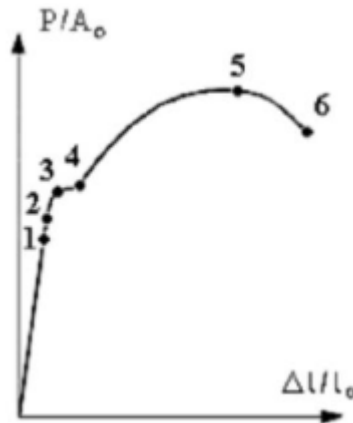
kekuatan luluh (*yield*), tegangan, dan kerusakan. Pada kurva 2.9 kita bisa melihat hubungan tegangan nominal-regangan dari material ulet. Titik pada kurva dapat mengindikasikan karakteristik titik berikut :

- 1 : *Proportional limit*
- 2 : *Elastic Limit*
- 3 : *Yield point*
- 3-4 : *Platform of ideal plasticity*
- 4-5 : *Plastic hardening*
- 5 : *Necking point*
- 6 : *Rupture point* (Sluzalec, 2003)

Persamaan kurva untuk tegangan-regangan dalam bentuk eksponensial adalah sebagai berikut :

$$\sigma = K \epsilon^n \dots\dots\dots (6)$$

Dimana : $K =$ *Strenght coefficient*
 $n =$ *Hardening exponent* (Z. Marcianak, 2002)



Gambar 2. 10 Diagram Tegangan-Regangan Material Ulet (Sluzalec, 2003)

2.12 Laju Keausan

Keausan adalah hilangnya material secara bertahap dari permukaan benda karena kontak dinamis dengan benda *solid, fluid* atau partikel. Keausan dapat dikategorikan menjadi 4 jenis yaitu

- a. *Adhesive wear*
Keausan jenis ini terjadi jika 2 permukaan relatif bergeser satu sama lain. Bagian dari satu permukaan terkikis perlahan dan menempel pada permukaan lain.
- b. *Abrasive wear*
Keausan jenis ini terjadi jika terdapat pengeluaran material dari permukaan yang lebih lunak karena adanya interaksi dengan permukaan yang lebih keras atau interaksi dengan partikel yang lebih keras (2 benda) dan interaksi dengan partikel keras, lepas dan terperangkap di antara 2 permukaan (3 benda)
- c. *Fatigue wear*
Keausan jenis in terjadi jika terbentuk retakan kecil di atas atau bawah permukaan cetakan kemudian pecah menjadi kecil, sehingga meninggalkan lubang kecil di permukaan cetakan.
- d. *Corrosive wear*

Keausan jenis ini terjadi ketika film permukaan (oksidasi) dihilangkan sebagai akibat dari adanya pergeseran relatif antara cetakan dan benda kerja dalam lingkungan yang korosif

Untuk menganalisis volume dapat dilakukan pendekatan dengan hukum *Archard's Law of Wear* sebagai berikut,

$$W = K \frac{F_N}{H} \dots\dots\dots (7)$$

Dimana **W** adalah *volume of wear per sliding distance* (mm³/mm). **K** adalah *dimensionless wear coefficient*. **F_N** adalah gaya normal (N). dan **H** adalah tingkat kekerasan *die* (Pa).

Untuk *depth of wear* atau kedalaman keausan dapat dilakukan pendekatan dengan persamaan

$$\Delta d = k (P \cdot U \cdot \Delta t) \dots\dots\dots (8)$$

Dimana Δd adalah *depth of wear (mm)*, *k* adalah *dimensionless wear coefficient* (Pa⁻¹), *P* adalah *contact pressure* (Pa), *U* adalah *Sliding velocity* (mm/s). dan Δt adalah kenaikan waktu.

Dalam penelitian Siamak Abachi et al yang berjudul *Wear Analysis of Hot Forging Die*, dan penelitian R. Iamtanomchai dan S. Bland yang berjudul *Study of Wear and Life Enhancement of Hot Forging Dies Using Finite Element Analysis* persamaan penentuan kedalaman keausan dapat dinyatakan dengan

$$\Delta d = \frac{K P \Delta L}{H} \dots\dots\dots (9)$$

Dimana Δd adalah *depth of wear* atau kedalaman keausan (dalam mm), *K* adalah koefisien *wear*, *P* adalah normal stress pada *dies*, ΔL adalah *sliding distance*, dan *H* adalah tingkat kekerasan dari material *dies*. Nilai *K* atau koefisien *wear* didekatkan dengan nilai yang didapat dari eksperimen. Nilai *K* didapatkan dari eksperimen oleh Bay pada tahun 2002 seperti yang ditunjukkan pada table dibawah ini

Tabel 2.4 Koefisien Keausan pada Kondisi Tertentu

| Surface Condition | Like metallic pairs | Unlike metallic pairs |
|-----------------------|--|--|
| Clean | 5 x 10 ⁻³ | 2 x 10 ⁻⁴ |
| Poor Lubrication | 2 x 10 ⁻⁴ | 2 x 10 ⁻⁴ |
| Average Lubrication | 2 x 10 ⁻⁵ | 2 x 10 ⁻⁵ |
| Excellent Lubrication | 2 x 10 ⁻⁶ do 10 ⁻⁷ | 2 x 10 ⁻⁶ do 10 ⁻⁷ |

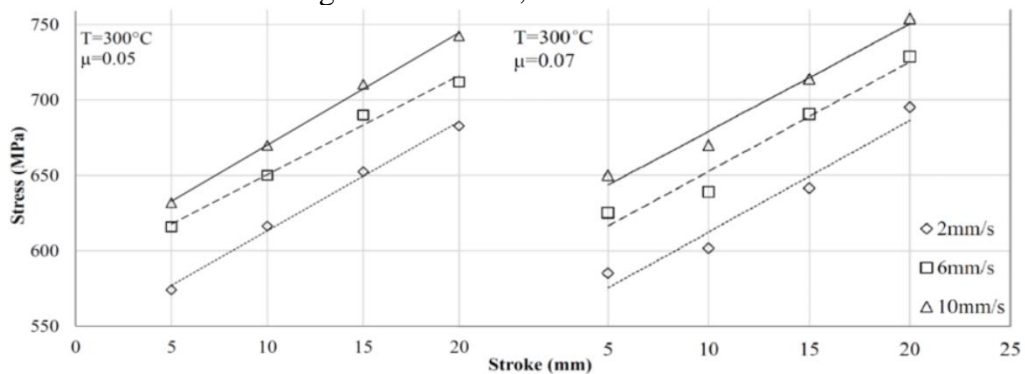
Menurut penelitian Kubec et al pada tahun 2016, selain *Archard*, terdapat juga metode lain dalam penentuan keausan *dies* yaitu Usui's Model. Model pengukuran keausan Usui dinyatakan dengan persamaan dibawah ini

$$W = \int a \cdot p \cdot V \cdot e^{\frac{-b}{T}} dt$$

Dimana W adalah laju keausan, p adalah *contact / interface pressure* v adalah *sliding velocity*, T adalah *interface temperature*, a dan b adalah konstanta yang didapat dari proses kalibrasi, dan dt adalah terhadap waktu. Persamaan Usui ini sebenarnya cukup baik tapi lebih cocok digunakan untuk proses yang kontinu karena adanya *sliding velocity*. Proses yang kontinu tersebut bisa berupa *metal cutting* dan *milling* dimana difusi memberikan kontribusi yang cukup besar dalam keausan. Oleh karena itu, penulis memilih untuk menggunakan persamaan *Archard* karena lebih sesuai dengan proses pada penelitian yang tidak kontinu yaitu *forging*.

2.13 Penelitian Terdahulu

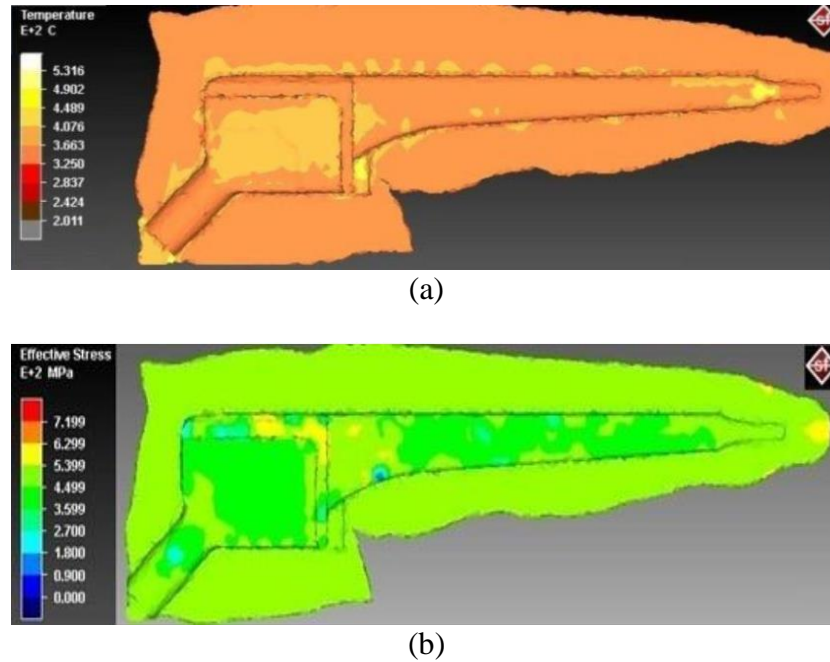
Sebelumnya, telah dilakukan penelitian mengenai analisa pembuatan *hip prosthesis* dengan metode penempaan panas (*hot forging*) yang dilakukan oleh Hojjat Ghahramanzadeh Asl, Sinan Sezek, dan Akgun Alsaran di tahun 2015. Penelitian ini disimulasikan dengan metode elemen hingga (*finite element method*). Penelitian dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak MSC SIMUFACT 10. Sebagai workpiece dalam pembuatan *hip prosthesis*, digunakan material paduan titanium (Ti6Al4V). Analisis pada percobaan ini menggunakan beberapa factor yaitu kecepatan cetakan atas (*upper die punch*), suhu awal specimen dan koefisien gesek. Untuk tahapan produksi terbagi dua jenis yaitu *preforming* dan *last forming*. Tahapan *preforming* dilakukan dengan kecepatan *punch* sebesar 2mm/s, suhu sebesar 300C dan koefisien gesek sebesar 0,05. Kegunaan tahap *preforming* hanya untuk membentuk benda kerja agar agar bisa diproses dengan geometri yang lebih baik pada tahapan selanjutnya. Pada tahap ini kecacatan material dianggap tidak berubah. Selanjutnya pada tahap *last forming*, dilakukan penempaan material dengan variasi kecepatan *punch* sebesar 2, 6, dan 10mm/detik, suhu sebesar 300C dan 500C, dan koefisien gesek sebesar 0,05 dan 0,07. Berdasarkan penelitian tersebut, pertambahan kecepatan *punch die* dan koefisien gesek berdampak pada peningkatan tegangan. Pada suhu 300C, tegangan maksima bernilai 750 MPa dengan kecepatan *upper die* sebesar 10mm/detik dan koefisien gesek sebesar 0,07.



Gambar 2. 11 Grafik perpindahan *upper die* terhadap *effective* dengan variasi kecepatan dan koefisien gesek (Hojjat, 2015)

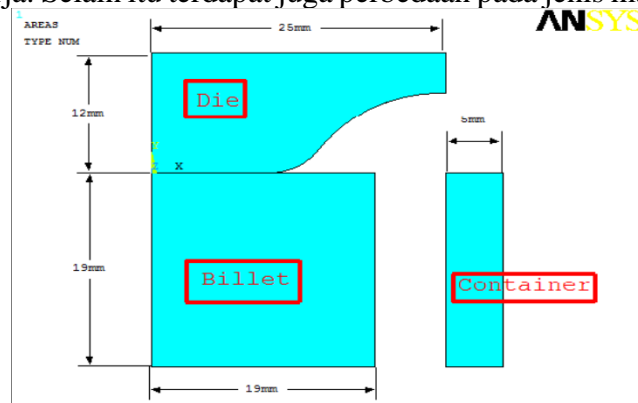
Hasil akhir penelitian menunjukkan bahwa parameter yang paling untuk proses *last forming* adalah adalah suhu penempaan di 500C, koefisien gesek di 0,05, dan kecepatan *punch* sebesar 2mm/detik. Pada penelitian tersebut dinyatakan bahwa tegangan tertinggi terjadi pada ujung *hip prosthesis*. Hal ini disebabkan oleh tingginya tegangan konsentrasi pada daerah tersebut. Selain itu, ditunjukkan pula peningkatan tegangan selama proses penempaan dan bergerak ke arah cetakan. Terjadi pula perubahan suhu pada ujung dan bagian tepi pada material *hip prosthesis*. Selain itu, peningkatan kecepatan *punch*, *friction coefficient*, dan *stroke* juga meningkatkan suhu. (Hojjat, 2015) Berdasarkan itu, penulis melakukan penelitian yaitu

membuat *hip prosthesis* dengan menggunakan material berbeda yaitu SS316L dengan suhu tetap. Pada penelitian kali ini, digunakan metode simulasi dengan perangkat lunak ANSYS. Selain itu variable yang digunakan pada *last forming* adalah koefisien gesek dan gaya pembebanan.

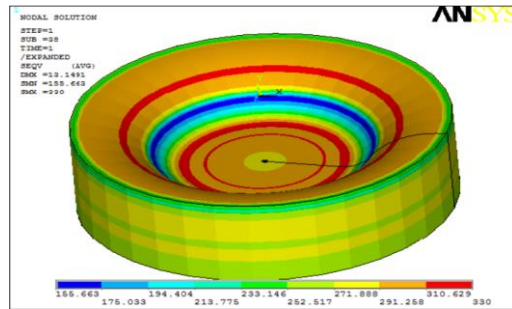


Gambar 2. 12 Distribusi Tegangan (a) dan suhu (b) pada *workpiece* (Hojjat, 2015)

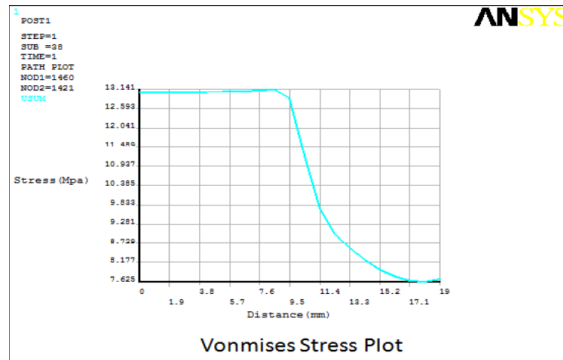
Penelitian selanjutnya berjudul “Metal Forming Analysis” ini dilakukan oleh Prof. N. C. Metha, Viral V. Shiyani dan Jemish R. Nasir pada tahun 2013. Penelitian ini dilakukan dengan pendekatan simulasi *forming*. Penelitian ini menggunakan *die*, *billet* dan *container*. Material billet menggunakan material aluminium AlMgSI dengan 10% partikel SiC. Die akan menekan billet hingga pada permukaan billet menyentuh container. Kontak antara permukaan die dan billet dan billet dan container menggunakan koefisien gesek sebesar 0,1. Dari penelitian ini didapat kesimpulan yaitu tegangan von mises maksimum pada billet adalah sebesar 330MPa. Pada penelitian penulis digunakan juga *software* ANSYS. Perbedaannya adalah geometri cetakan dan benda kerja. Selain itu terdapat juga perbedaan pada jenis material yang digunakan.



Gambar 2. 13 Geometri keseluruhan dari proses *closed-die* (Prof. N.C Metha, 2013)

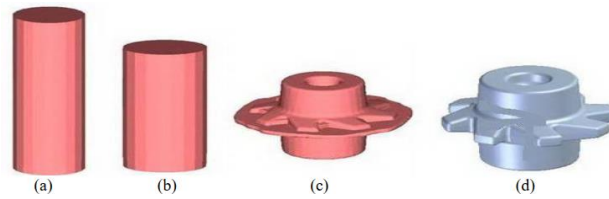


Gambar 2. 14 Vonmises dari benda kerja (Prof. N.C. Metha, 2013)

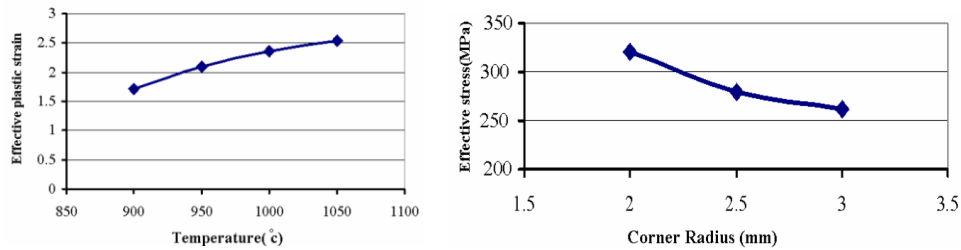


Gambar 2. 15 Grafik tegangan pada benda kerja terhadap koordinat dari titik pusat (Prof. N.C. Metha, 2013)

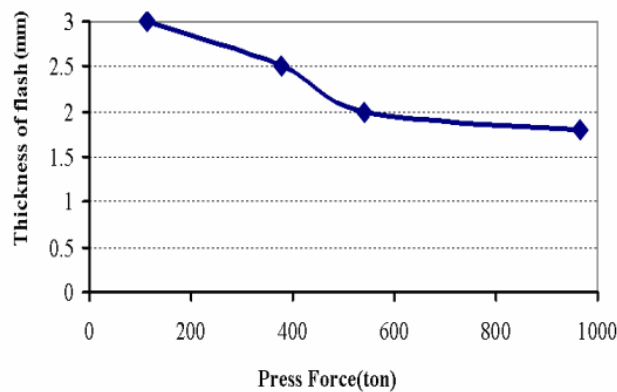
Penelitian selanjutnya adalah mengenai Analisa simulasi 3 dimensi proses *closed die forging* pembuatan *locking gear* skala industry. Adapun paramemnter yang memengaruhi seperti suhu, geometri cetakan dan ukuran billet *preforming*. Pada penelitian ini simulasi memengaruhi suhu billet pada regangan plastis efektif, radius dari ujung cetakan pada tegangan dalam billet dan ketebalan *flash* dengan gaya yang diperlukan. Model tiga dimensi pada penelitan ini dibuat dengan menggunakan perangkat lunak Solid Edge. Untuk simulasi dan analisis penempaan menggunakan Super Forge. Adapun proses ini membutuhkan 2 tahapan yaitu *preforming* yaitu mengurangi tinggi dari benda kerja dan *final forming*. Pada proses, variasi tinggi billet adalah 75 mm dan 45 mm. Pada tahap *preform*, suhu benda kerja adalah 900C, 950C, dan 1050C. Kesimpulan yang didapat adalah suhu yang digunakan bernilai 1050C karena pada suhu tersebut material memiliki regangan plastis efektif paling tinggi dibanding suhu lain. Pada gambar 2. 16 disajikan grafik.dalam pemilihan radius. Kesimpulan yang didapat adalah menggunakan material dengan radius 3 karena tegangan von misses yang dihasilkan paling kecil. Pada gambar 2.16 ditunjukkan grafik perbandingan radius ujung dengan tegangann efektif. Selain itu, terdapat pula variasi ketebalan flash dengan ketabalan 1,8 , 2 , 2.5, dan 3 mm. Kesimpulan yang didapat adalah gaya tekan meningkat seiring dengan terbentuknya *flash*. Selain itu, ketebalan *flash* yang menigkat terhadap tekanan maka akan meningkatkan potensi kerusakan cetakan. Selain itu *flash* yang terlalu tebal akan membuat material sisa yang banyak dan meningkatkan biaya produksi. Dengan mempertimbangkan jumlah produksi benda kerja, tebal *flash* optimum yang digunakan adalah 3mm. Gambar 2.17 menunjukkan grafik perbandingan gaya tekan dan dan ketebalan *flash*. (M. Maarefdoust 2010)



Gambar 2. 16 Simulasi pembuatan material (a) raw material, (b) pengurangan tinggi, (c) deformasi final, (d) flashing (M. Maarefdoust 2010)

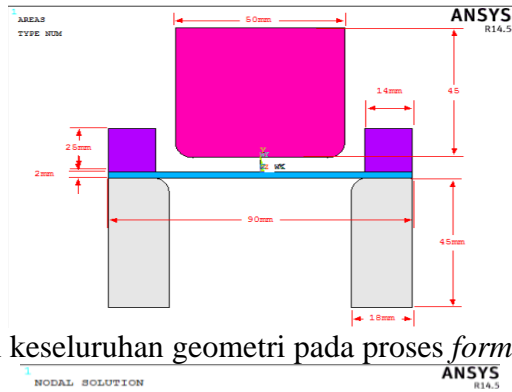


Gambar 2. 17 Grafik perbandingan suhu terhadap regangan plastis efektif (kiri) dan grafik radius cirner terhadap tegangan efektif (kanan) (M. Maarefdoust, 2010)

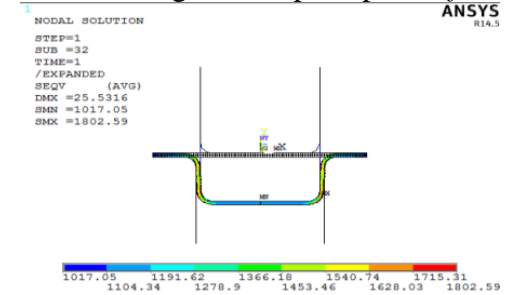


Gambar 2. 18 Pengaruh gaya terhadap ketebalan *flash* (M. Maarefdoust, 2010)

Penelitian berikutnya adalah yang dilakukan oleh Prabhakar A., Dr, Mohamed Haneef, dan Shabir Ahmed R.M pada tahun 2013. Penelitian ini berjudul *Sheet metal forming analysis with spring-back deformation on U-Bends in Isotropic plates*. Adapun pada penelitian ini dilakukan dengan *die* dan *workpiece* berupa logam lembabran dengan variasi ukuran ketebalan sebesar 2 – 3.5 mm. Susunan dan geometri percobaan kali ini ditunjukkan pada gambar 2. 17. Property material tersebut adalah young's modulus bernilai 200GPa, *density* bernilai 7800 kg/m³, *yield stress* bernilai Mpa, dan *plastic modulus* bernilai 3000 MPa. Jumlah meshing material pada penelitian berjumlah 1580 elemen dengan nodes berjumlah 1693. Hal yang dihitung pada penelitian kali ini adalah tegangan *equivalent* (von-misses), tegangan *residual*, *contact pressure*, dan regangan plastis *equivalent* dengan variasi ketebalan dan kedalaman deformasi *sheet metal* yang disebabkan oleh penempaan oleh *die*. Dari penelitiannya, didapat kesimpulan yaitu semakin tebal *plate* maka semakin tinggi pula tegangan von-misses, *contact pressure*, *residual stress*, dan regangan plastis nya. Kesimpula lain yang didapat yaitu semakin dalam deformasi pada *sheet metal* dengan kata lain perbindahan *die* dalam menempa benda semakin tinggi, maka meningkat pula tegangan von-misses, *contact pressure*, *residual stress* pada material spserti yang ditunjukkan pada tabel 2. 3 (Prabhakar, A. 2013). Pada penelitian ini, analisis pengaruh perpindahan *upper die* terhadap tegangan akan dilakukan dengan kelauran hasil dari benda yang berbeda dari penelitian terdahulu.



Gambar 2. 19 Dimensi keseluruhan geometri pada proses *forming* (Prabhakar A, 2013)

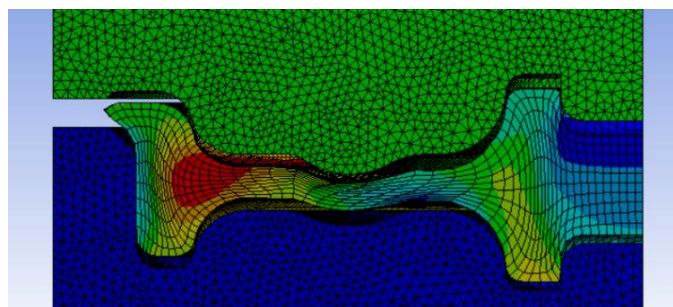


Gambar 2. 20 Tegangan Von-Misses saat *forming* (Prabhakar A, 2013)

Tabel 2.3 Hasil tagangan terhadap variasi ketebalan *plate* (Prabhakar, A, 2013)

| <i>Thickness of Plate</i> | <i>Spring Back</i> | <i>Spring Back Percentage</i> | <i>Vonmises' Stress (MPa)</i> | <i>Contact Pressure (MPa)</i> | <i>Residual Stress (MPa)</i> | <i>Plastic Strain</i> |
|---------------------------|--------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------|-----------------------|
| 2 | 0.3629 | 1.421 | 1802 | 614 | 524 | 0.516 |
| 2.5 | 0.3637 | 1.425 | 1840 | 766 | 594 | 0.5428 |
| 3 | 0.3528 | 1.382 | 1851 | 698 | 610 | 0.5415 |
| 3.5 | 0.348 | 1.36 | 1897 | 839 | 718 | 0.5643 |

Penelitian selanjutnya adalah penelitian dari Septian Kurnia Ardiansyah pada tahun 2021 yang berjudul “Proses *Hot Forging* Untuk Produksi Roda Kereta Api dengan Metode elemen Hingga. Pada penelitiannya, Septian mencari laju keausan untuk *die* roda kereta api dengan hukum *Archard Law of Wear*. *Die* pada penelitian ini menggunakan bahan dari AISI H13 *tool steel* dan untuk benda kerjanya menggunakan material AISI 1045. Penelitian ini menghasilkan laju keausan *dies* dan juga deformasi *dies* setelah 10.000 siklus yaitu 26 mm untuk penempaan roda kereta api. Penelitian yang dilakukan oleh penulis juga akan menggunakan perhitungan keausan yang sama dengan penelitian Septian Kurnia Ardiansyah

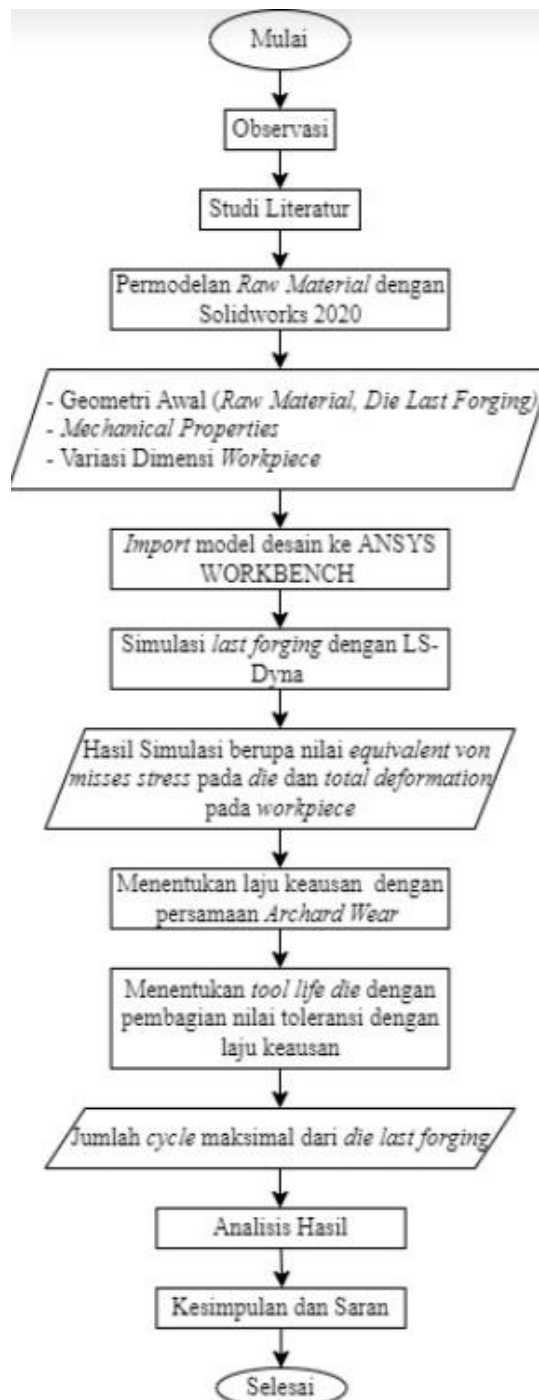


Gambar 2. 21 Proses Simulasi Penempaan Roda Kereta Api (Ardiansyah, 2021)

BAB III METODE PENELITIAN

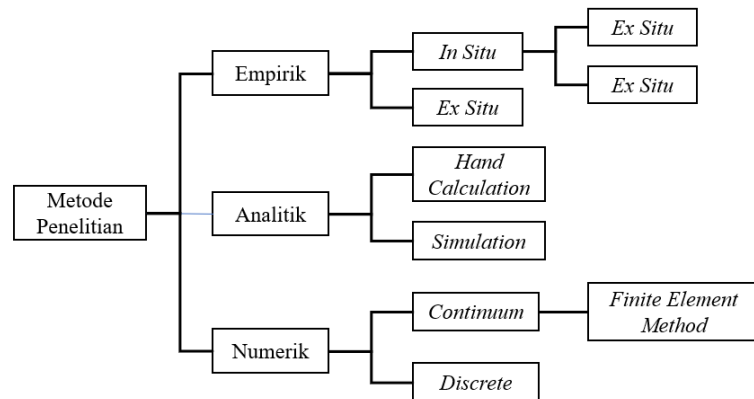
3.1 Flowchart Penelitian

Beberapa langkah yang akan dilakukan pada penelitian kali ini secara singkat dapat digambarkan melalui diagram alir penelitian. Dibawah ini disajikan diagram alir penelitian. Berikut ini adalah diagram alir penelitian yang akan dilakukan.



Gambar 3. 1 Flowchart Penelitian

Dalam proses penelitian bidang teknik, ada tiga metode yang dapat digunakan. Pada gambar 3.2 disajikan berbagai macam metode penelitian. Setelah mengetahui macam metode tersebut, maka dalam Analisa penelitian ini akan menggunakan Metode Penelitian Numerik berupa *Finite Element Method (FEM)* atau Metode Elemen Hingga. Pada penelitian kali ini, material tergolong kompleks sehingga analisis tidak memungkinkan untuk dilakukan dengan perhitungan manual. Analisa pada penelitian kali ini menggunakan perangkat lunak ANSYS WORKBENCH.



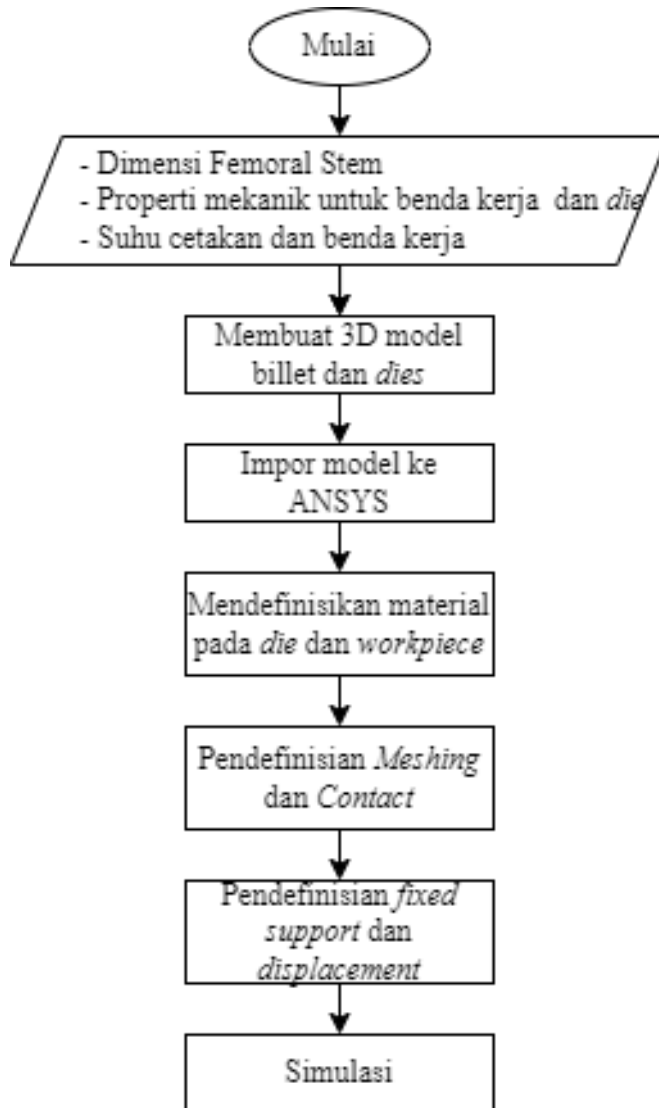
Gambar 3. 2 Bagan Metode Penelitian

3.2 Observasi

Observasi adalah Langkah awal dalam sebuah penelitian untuk dapat menentukan ruang lingkup dan batasan permasalahan yang akan dibuat didalam penelitian. Dalam penelitian kali ini, observasi dilakukan dalam pembuatan *femoral stem* dengan proses *hot forging* dimana observasi meliputi ukuran , jenis dan volume *femoral stem*

3.3 Permodelan

Pada penelitian kali ini, dilakukan membuat objek penelitian dilengkapi dimensi dan spesifikasi tertentu untuk membuat produknya. Sebelum melakukan permodelan, ada beberapa data pendukung yang harus dicari. Data-data tersebut adalah dimensi *femoral stem* pada ras mongoloid, dan material implant dengan biokompatibilitas dan sifat mekanik yang baik. Setelah itu, data yang tadi didapat akan disesuaikan dan digunakan sebagai input dalam proses simulasi. Tahapan selanjutnya dalam penelitian adalah membuat model dimensi *femoral stem* yang sudah ditentukan dengan program CAD dimana *software* desain yang digunakan adalah *Solidworks*. Dari model prosthesis yang telah dibuat, dapat dibuat cetakan *preforging* dan *last forging* yang dapat juga disebut dengan *die*. Berikut ini merupakan diagram alir yang menggambarkan tahapan penelitian hingga simulasi



Gambar 3. 3 Flowchart Permodelan

3.3.1 Penentuan Data Awal

Data awal yang digunakan adalah berupa dimensi *femoral stem*, data material specimen, data kecepatan dan beban penekanan. Dimensi dari *femoral stem* dapat dilihat pada gambar 3.6. sebagai bahan *workpiece* digunakan material *stainless steel* 316 L. Sifat mekanik SS pada suhu 1000⁰C dapat dilihat pada table 3.1. sebagai bahan pembuatan *die* digunakan material AISI H13. Sifat mekanik dari AISI H13 dapat dilihat pada table 3.2.

Tabel 3.1 Properti material SS316L pada Suhu 1000⁰C (Ghusti Raka, 2020)

| Istilah | Satuan | Nilai |
|--------------------------------------|--------------------------------------|--------|
| <i>Density</i> | kg/m ³ | 7507 |
| <i>Specific Heat</i> | J/(kg.K) | 721.49 |
| <i>Shear Modulus</i> | MPa | 5185 |
| <i>Johnson and Cook Constitutive</i> | <i>Initial Yield Stress (A)</i> | MPa |
| | <i>Strain Hardening Constant (B)</i> | MPa |
| | | 305 |
| | | 1161 |

| | | | |
|--|--|------|-------|
| <i>Equation Parameters</i> | <i>Strain Hardening Exponent (n)</i> | - | 0.61 |
| | <i>Thermal Softening Coefficient (m)</i> | - | 0.517 |
| | <i>Strain Rate Constant (C)</i> | - | 0.01 |
| | <i>Melting Temperature (T_m)</i> | °C | 1399 |
| | <i>Reference Strain Rate</i> | /sec | 1 |
| <i>Mie-Gruneisen Equation of State</i> | <i>Gruneisen Coefficient</i> | - | 1.93 |
| | <i>Parameter C1</i> | m/s | 4940 |
| | <i>Parameter S1</i> | - | 1.49 |
| | <i>Parameter Quadratic S2</i> | s/m | 0 |
| <i>Johnson and Cook Damage</i> | <i>Damage Constant D1</i> | - | 0.05 |
| | <i>Damage Constant D2</i> | - | 3.44 |
| | <i>Damage Constant D3</i> | - | 2.12 |
| | <i>Damage Constant D4</i> | - | 0.002 |
| | <i>Damage Constant D5</i> | - | 0.1 |

Tabel 3.2 Properti Material Ti6Al4V (Chen, 2012)

| Istilah | Satuan | Nilai | |
|--|--|--------------|-------|
| <i>Density</i> | kg/m ³ | 4282 | |
| <i>Specific Heat</i> | J/(kg.K) | 0,75397 | |
| <i>Shear Modulus</i> | MPa | | |
| <i>Johnson and Cook Constitutive Equation Parameters</i> | <i>Initial Yield Stress (A)</i> | MPa | 888,5 |
| | <i>Strain Hardening Constant (B)</i> | MPa | 600 |
| | <i>Strain Hardening Exponent (n)</i> | - | 0,21 |
| | <i>Thermal Softening Coefficient (m)</i> | - | 1,012 |
| | <i>Strain Rate Constant (C)</i> | - | 0,007 |
| | <i>Melting Temperature (T_m)</i> | °C | 1660 |
| | <i>Reference Strain Rate</i> | /sec | 1 |
| <i>Mie-Gruneisen Equation of State</i> | <i>Gruneisen Coefficient</i> | - | 1,23 |
| | <i>Parameter C1</i> | m/s | 5130 |
| | <i>Parameter S1</i> | - | 1,028 |
| | <i>Parameter Quadratic S2</i> | s/m | 0 |

Tabel 3.3 Properti Material AISI H13 *Tool Steel* (Ding, et al. 2011)

| Istilah | Satuan | Nilai |
|----------------------|-------------------|--------------|
| <i>Density</i> | kg/m ³ | 7800 |
| <i>Specific Heat</i> | J/(kg.K) | 460 |

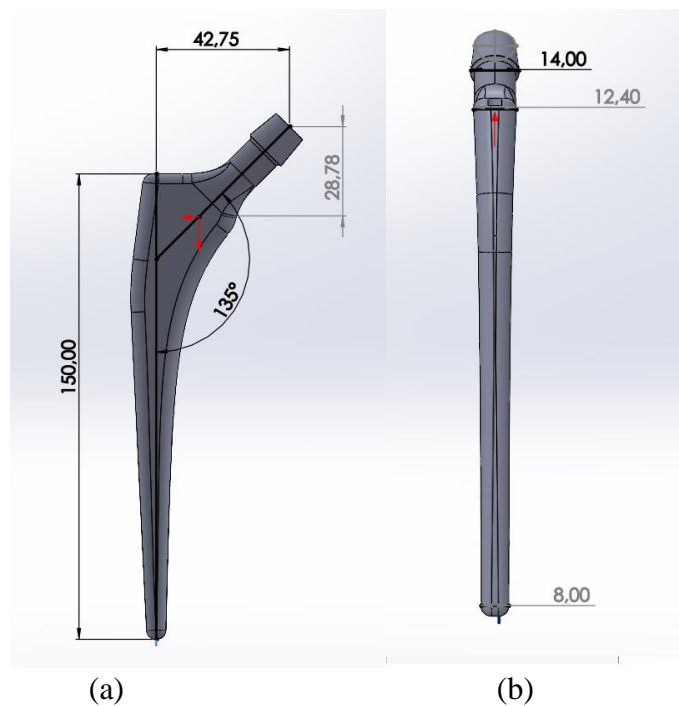
| | | | |
|--|--|------|-------|
| | Shear Modulus | GPa | 81 |
| Johnson and Cook Constitutive Equation Parameters | Initial Yield Stress (A) | MPa | 810 |
| | Strain Hardening Constant (B) | MPa | 286,8 |
| | Strain Hardening Exponent (n) | - | 0.278 |
| | Thermal Softening Coefficient (m) | - | 1,18 |
| | Strain Rate Constant (C) | - | 0.028 |
| | Melting Temperature (T_m) | °C | 1427 |
| | Reference Strain Rate | /sec | 1 |
| Johnson and Cook Damage | Damage Constant D1 | - | -0,8 |
| | Damage Constant D2 | - | 2,1 |
| | Damage Constant D3 | - | -0,5 |
| | Damage Constant D4 | - | 0.002 |
| | Damage Constant D5 | - | 0.61 |

3.3.2 Proses Desain

Adapun proses desain model menggunakan perangkat lunak *Solidworks* untuk mempermudah perancangan desain yang cukup rumit. File tersebut nantinya akan di import kedalam *software* ANSYS. File desain nantinya akan berformat STEP. Langkah-langkah dalam pembuatan model forging adalah sebagai berikut

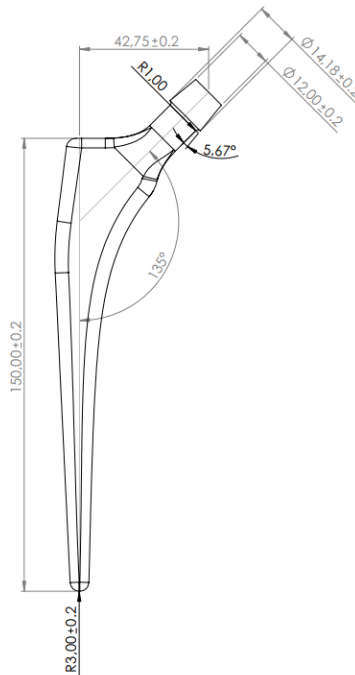
1. Mengukur Dimensi Femoral Stem

Sebagai acuan dalam menentukan target benda kerja *last forging*, perlu dilakukan pengukuran pada *femoral stem* Adapun geometri *femoral stem* yang diinginkan adalah seperti gambar dibawah ini



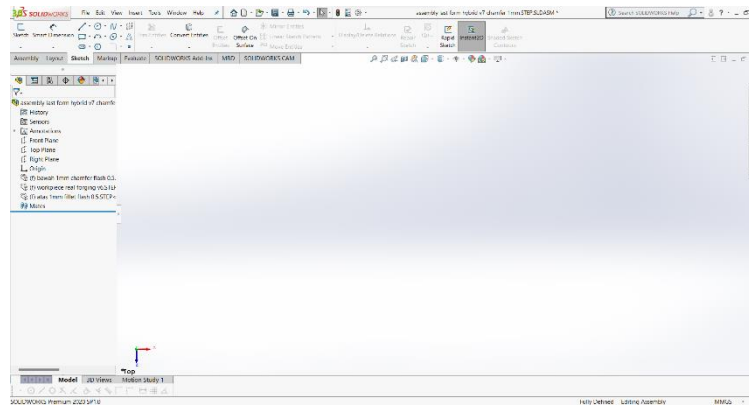
Gambar 3. 4 Geometri *Femoral Stem* (a) tampak samping (b) tampak depan

Adapun dimensi yang diinginkan dari *femoral stem* yaitu *length* sebesar 150 mm, *offset* sebesar 42,74 mm dengan *CCD (centrum-collum-diaphysis angle)* dengan ukuran 135° dan dengan volume 23251.72 mm^3



Gambar 3. 5 Sketch *femoral stem*

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

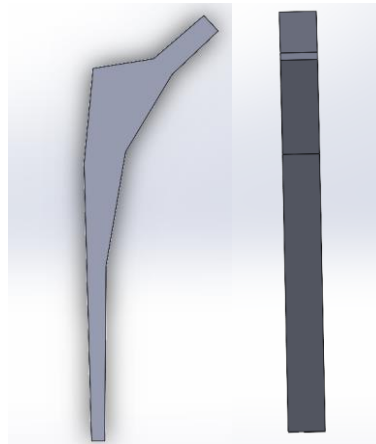


Gambar 3. 6 Halaman kerja baru pada *Solidworks*

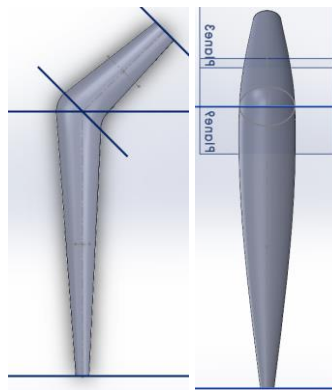
3. **Desain Raw Material**

Ukuran *workpiece* diberikan nilai toleransi. Hal ini dimaksudkan memaksimalkan pengisian cetakan oleh material. Berdasarkan geometri dari *femoral stem*, ditentukan geometri dari *raw material* seperti gambar dibawah *Workpiece* menggunakan material plat *stainless steel 316L* dan batangan *Ti6Al4V*. Untuk plat *workpiece* dibuat dengan memotong plat sesuai dengan target geometri *last forging*. Untuk material Batangan, *workpiece* akan di cetak menggunakan *die preforming*. Cetakan diberi *counterlock* pada ujungnya agar memberi posisi lebih stabil pada benda dan *upper die*. Selain *counterlock*, diberikan juga jalur dengan kedalaman tertentu agar benda kerja lebih stabil saat diberi gaya oleh *upper*

die. Berikut ini adalah desain dari *raw material* yang diharapkan yaitu dengan dimensi seperti dibawah ini



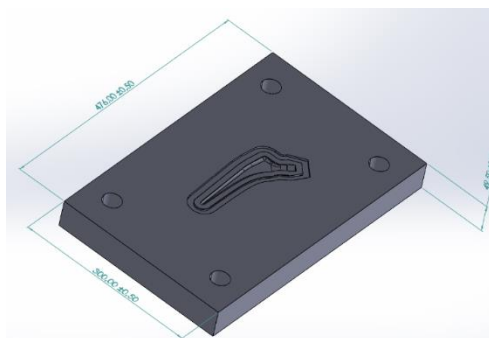
Gambar 3. 7 Tampak Atas dan Samping Permodelan *Raw Material Last Forging* untuk *workpiece* plat dengan ketebalan 12 mm



Gambar 3. 8 Tampak Atas dan Samping Permodelan *Raw Material Last Forging* untuk *workpiece* Batangan dengan diameter leher 24 mm

4. Membuat *upper dies* dan *lower die (last forging)*

Pembuatan 3D *dies* berdasarkan desain *femoral stem* sesuai dengan ukuran yang telah dijelaskan pada bagian sebelumnya. Pembuatan *die* dilakukan dengan membagi melintang dua bagian yang terpisah di tengah. Setelah tahap desain selesai, file akan disimpan dalam format .STEP dan nantinya di import pada *software* ANSYS.



Gambar 3. 9 Sketsa cetakan *last-forging femoral stem*

3.3.3 Simulasi Last Forging

Pada penelitian ini, kita menggunakan *subtool LS-DYNA ANSYS Workbench*. Simulasi pembuatan *femoral stem* dibagi menjadi dua tahapan yaitu tahap *pre-forging* dan *last forging*. Akan tetapi, pada penelitian penulis dari penelitian sebelumnya. Sebelum melakukan simulasi, dilakukan proses *setup* pada program supaya hasil simulasi lebih akurat. Tahapan dalam melakukan simulasi *last forging* antara lain

1. Mendefinisikan *engineering data*

Engineering data merupakan fitur yang berfungsi untuk memilih dan mengatur jenis material yang akan digunakan pada simulasi. Pada *last forging*, material yang digunakan untuk *die* dan *lower* adalah AISI H13 Tool Steel dan untuk benda kerja menggunakan SS316L Pada suhu 1000°C dan Ti6Al4V pada suhu 995°C. Tiga material akan ditambahkan sebagai material baru dengan menambah beberapa property seperti table dibawah ini. Pada *engineering data*, material benda kerja diharapkan tidak pecah atau mengalami kegagalan akan tetapi sudah berdeformasi.

(a)

| Outline of Schematic B2: Engineering Data | | | | | |
|---|------------------------------|---|---|--------|---|
| | A | B | C | D | E |
| 1 | Contents of Engineering Data | | | Source | Description |
| 2 | Material | | | | |
| 3 | H13 | | | | |
| 4 | H13_Revisi | | | | |
| 5 | SS 1000 | | | | |
| 6 | Structural Steel | | | | Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1 |
| 7 | Ti6Al4V 995 C | | | | |

| Properties of Outline Row 4: H13_Revisi | | | | | |
|---|---|---------------------|-----------------------------------|---|-------------------------------------|
| | A | B | C | D | E |
| 1 | Property | Value | Unit | | |
| 2 | Material Field Variables | Table | | | |
| 3 | Density | 7800 | kg m ⁻³ | | |
| 4 | Isotropic Elasticity | | | | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 5 | Derive from | Young's Modulus ... | | | |
| 6 | Young's Modulus | 210 | GPa | | |
| 7 | Poisson's Ratio | 0,3 | | | |
| 8 | Bulk Modulus | 1,75E+11 | Pa | | |
| 9 | Shear Modulus | 8,0769E+10 | Pa | | |
| 10 | Specific Heat Constant Pressure, C _p | 0,46 | J g ⁻¹ K ⁻¹ | | |
| 11 | Johnson Cook Strength | | | | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 12 | Strain Rate Correction | First-Order | | | |
| 13 | Initial Yield Stress | 8,106E+08 | Pa | | |
| 14 | Hardening Constant | 2,868E+08 | Pa | | |
| 15 | Hardening Exponent | 0,278 | | | |
| 16 | Strain Rate Constant | 0,028 | Pa | | |
| 17 | Thermal Softening Exponent | 1,18 | | | |
| 18 | Melting Temperature | 1427 | C | | |
| 19 | Reference Strain Rate (/sec) | 1 | | | |
| 20 | Shear Modulus | 81 | GPa | | |
| 21 | Johnson Cook Failure | | | | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 22 | Damage Constant D1 | -0,8 | | | |
| 23 | Damage Constant D2 | 2,1 | | | |
| 24 | Damage Constant D3 | -0,5 | | | |
| 25 | Damage Constant D4 | 0,0002 | | | |
| 26 | Damage Constant D5 | 0,61 | | | |
| 27 | Melting Temperature | 1427 | C | | |
| 28 | Reference Strain Rate (/sec) | 1 | | | |

(b)

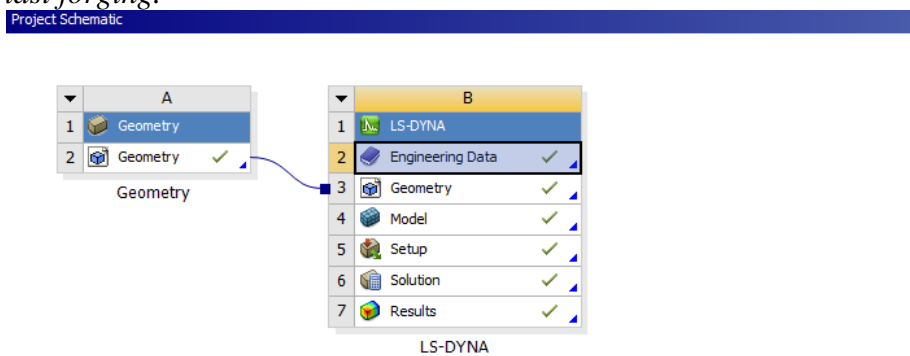
The image shows two screenshots from the LS-DYNA software interface. The top screenshot, titled 'Outline of Schematic B2: Engineering Data', displays a table with columns A (Material), B (Source), C (Description), D, and E. Row 5 is highlighted, showing 'SS 1000' as the material. The bottom screenshot, titled 'Properties of Outline Row 5: SS 1000', shows a detailed table of material properties. The columns are Property, Value, Unit, and checkboxes for D and E. The table lists various mechanical and thermal properties such as Density, Specific Heat, Johnson Cook Strength, and Shear Modulus.

| Property | Value | Unit | D | E |
|---|-------------|------------------------------------|---|---|
| Material Field Variables | Table | | | |
| Density | 7507 | kg m ⁻³ | | |
| Specific Heat Constant Pressure, C _p | 721,49 | J kg ⁻¹ C ⁻¹ | | |
| Johnson Cook Strength | | | | |
| Strain Rate Correction | First-Order | | | |
| Initial Yield Stress | 3,05E+08 | Pa | | |
| Hardening Constant | 1,161E+09 | Pa | | |
| Hardening Exponent | 0,61 | | | |
| Strain Rate Constant | 0,01 | | | |
| Thermal Softening Exponent | 0,517 | | | |
| Melting Temperature | 1399 | C | | |
| Reference Strain Rate (/sec) | 1 | | | |
| Shear Modulus | 5,185E+09 | Pa | | |
| Shock EOS Linear | | | | |
| Gruneisen Coefficient | 1,93 | | | |
| Parameter C1 | 4940 | m s ⁻¹ | | |
| Parameter S1 | 1,49 | | | |
| Parameter Quadratic S2 | 0 | s m ⁻¹ | | |
| Johnson Cook Failure | | | | |
| Damage Constant D1 | 0,05 | | | |
| Damage Constant D2 | 3,44 | | | |
| Damage Constant D3 | 2,12 | | | |
| Damage Constant D4 | 0,002 | | | |
| Damage Constant D5 | 0,1 | | | |
| Melting Temperature | 1399 | C | | |
| Reference Strain Rate (/sec) | 1 | | | |

Gambar 3. 10 Penentuan engineering data (a) Upper & Lower Die (b) Workpiece

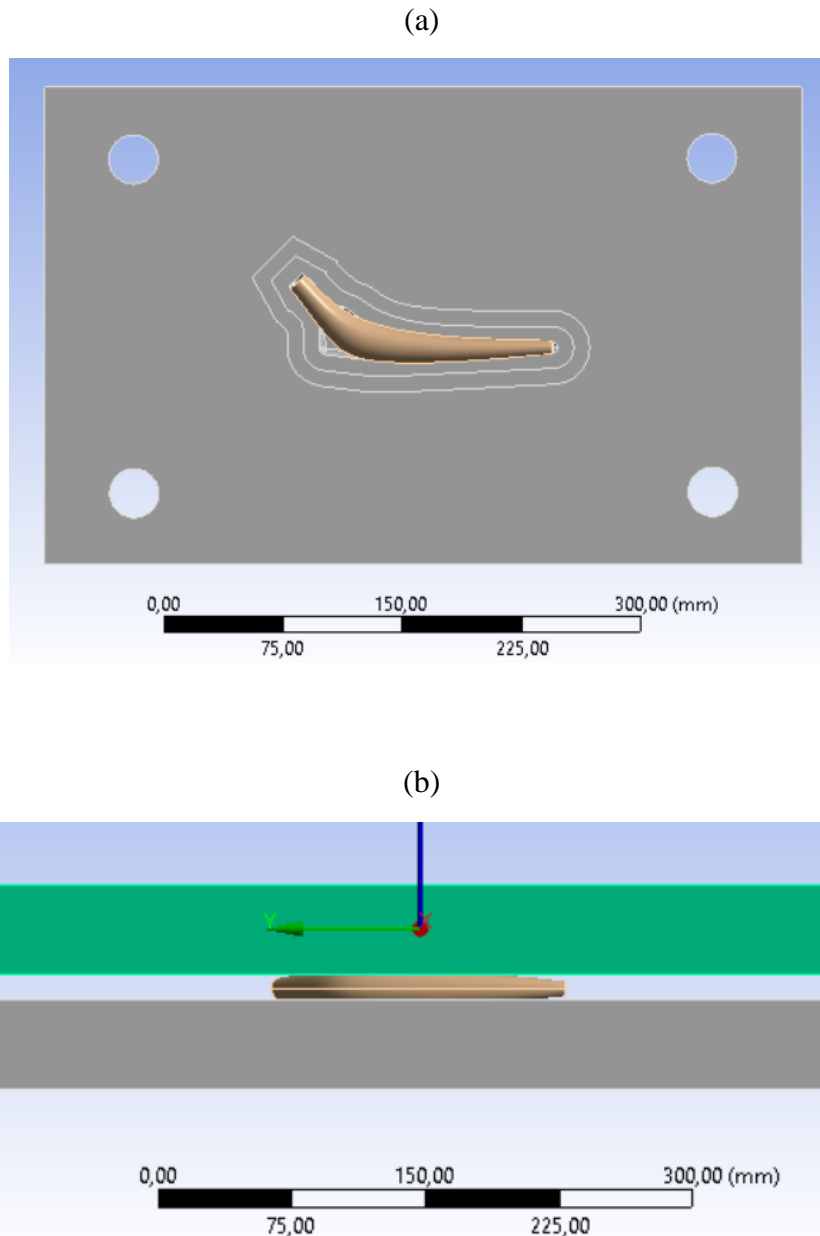
2. Mengimpor Geometri Cetakan *last-forging*

Setelah *preforging* selesai, hasil simulasi berupa benda kerja yang sudah terdeformasi akan menjadi benda kerja untuk proses *last forging*. Pada gambar 3.11 dapat dilihat rangkaian *workflow* dari *last forging*.



Gambar 3. 11 Skema import material ke simulasi

Setelah *preforging*, material yang sudah ditebuk di *export* menjadi benda kerja *last forging*. Geometri *die* yang sudah di desain akan di impor dengan format *.STEP* yang akan dimasukkan kedalam program *ANSYS design modeler*. Setelah mengimpor material cetakan dan bahan hasil material *preforging*, selanjutnya diatur koordinat lokasi dengan melakukan *translate* pada *create transformation* pada *die* agar sesuai koordinat antara cetakan dengan benda kerja. Jarak antar cetakan adalah sejauh 19 mm



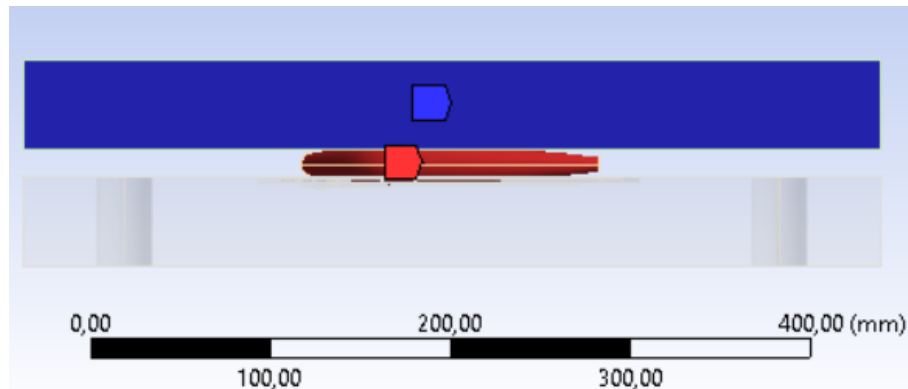
Gambar 3. 12 Desain *die* dan *workpiece* pada proses *last forging* (a) tampak atas (b) tampak atas

3. Menentukan Jenis Hubungan

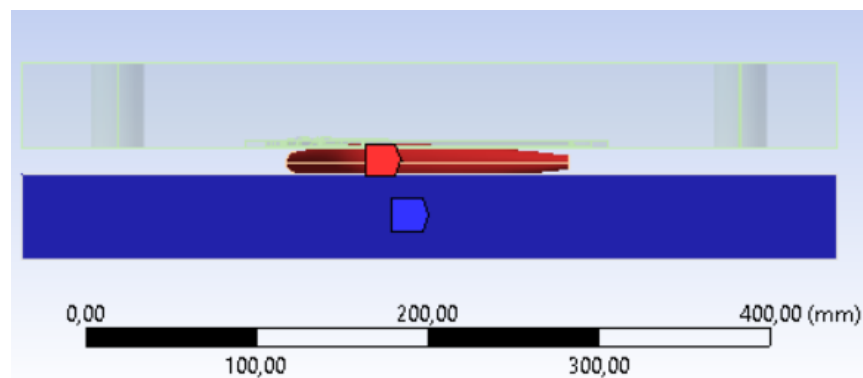
Pada simulasi kali ini terdapat interaksi antara dua benda. Karena itu perlu didefinisikan jenis interaksi pada kedua benda tersebut. Pendefinisian interaksi pada kedua geometri menggunakan batasan *body interaction*. Permukaan yang mengalami kontak ada tiga buah yaitu

die atas, *die* bawah dan benda kerja. Karena itu, kita perlu membuat dua jenis kontak yaitu *die* atas dengan bagian atas benda kerja dan *die* bawah dengan bagian bawah benda kerja. Jenis kontak yang digunakan adalah *frictional body to body* dengan *friction coefficient* 0,3 untuk SS316L dan 0,35 untuk Ti6Al4V.

(a)



(b)

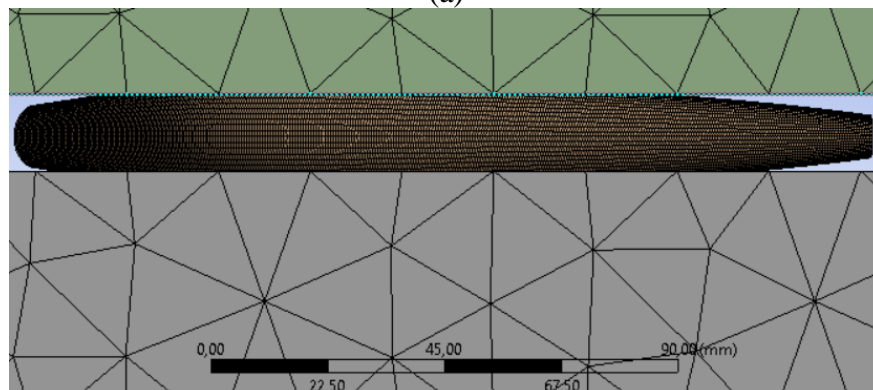


Gambar 3. 13 Penentuan jenis hubungan (a) *body interaction 1* (b) *body interaction 2*

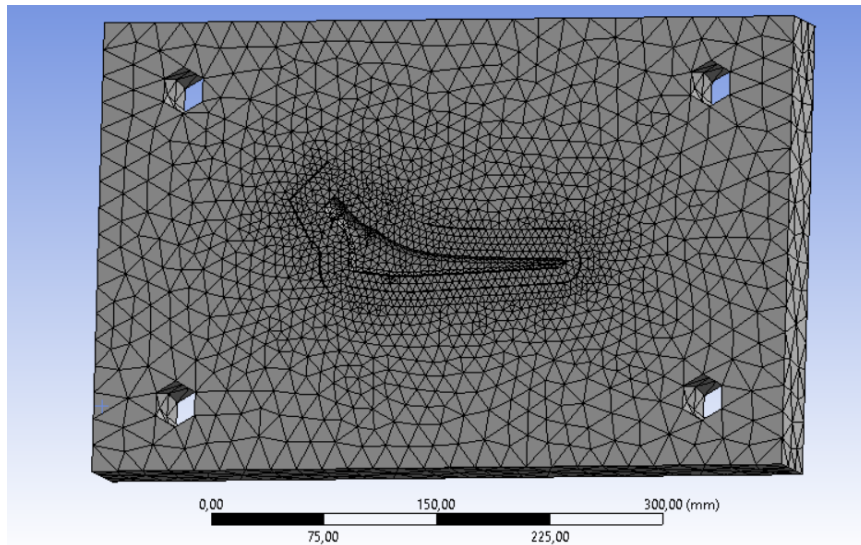
4. Meshing

Proses *meshing* pada material *last forging* dilakukan dengan metode *multizone* karena akurasi elemen pada segi kualitas yang lebih baik daripada metode lain. Bentuk *meshing* menggunakan *size fuction* berupa *uniform-proximity* dengan ukuran

(a)



(b)



Gambar 3. 14 Meshing pada simulasi *last-forging* (a) tampak depan (b) tampak belakang

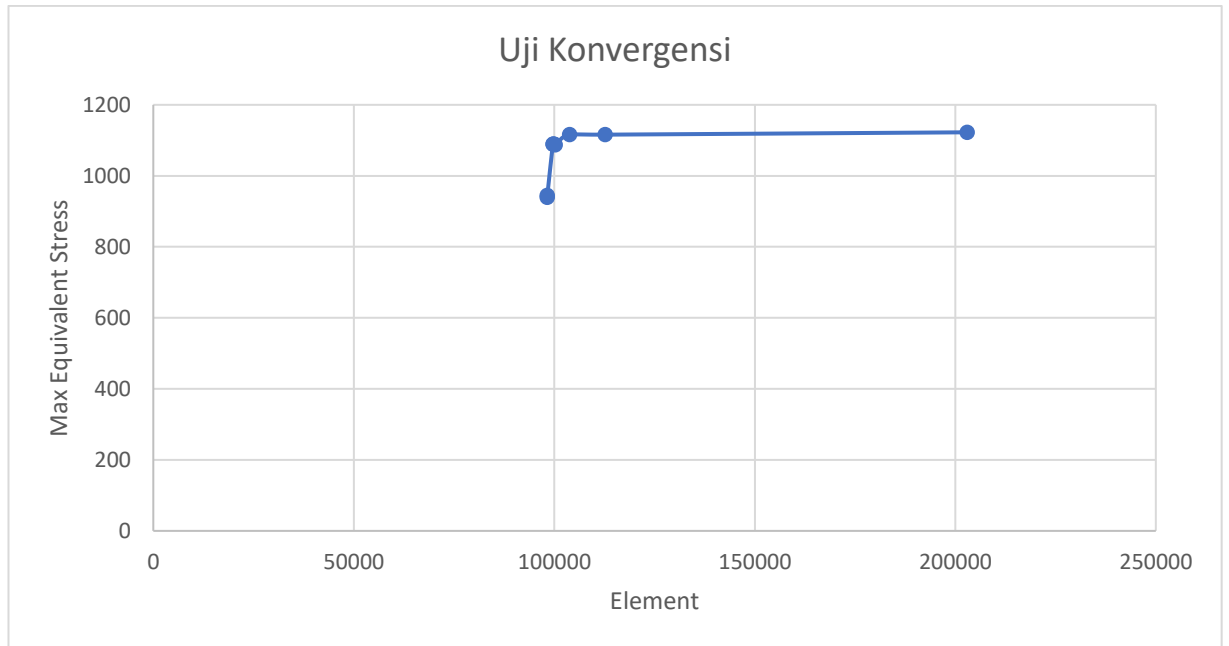
5. Uji Konvergensi

Pada *software* ANSYS, semakin kecil ukuran *meshing*, maka semakin akurat hasilnya dan semakin mendekati kondisi nyata. Akan tetapi, pada ukuran tertentu, perubahan meshing tidak menunjukkan perbedaan hasil yang signifikan. Untuk menemukan ukuran *meshing* yang optimum, perlu dilakukan validasi. Jenis validasi *meshing* yang digunakan adalah uji konvergensi. Dengan itu, kita bisa mengetahui ukuran *meshing* yang paling akurat dan optimal. Uji konvergensi dilakukan dengan cara membuat grafik hubungan antara ukuran mesh dengan besar tegangan hasil simulasi model.

Konvergensi tes dilakukan secara manual dengan variasi ukuran nodes dan element. Adapun konvergensi ini akan menggunakan *output solver probe stress* karena nilai tegangan akan berfokus pada satu titik *body*. Sebagai acuan, digunakan nilai maksimum dari tegangan *Von-Misses Equivalent Stress* dengan pembebanan sesuai nilai maksimum yang diizinkan dari desain untuk geometri yang telah disederhanakan. Dibawah ini adalah hasil uji konvergensi berdasarkan variasi ukuran elemen.

Tabel 3. 4 Uji Konvergensi *workpiece last forging* dengan ukuran *uniform* dan variasi ukuran elemen

| Mesh (mm) | Nodes | Element | Max Equivalent Stress | Max Stress Error |
|-----------|--------|---------|-----------------------|------------------|
| 3.0 | 19838 | 98226 | 939,35 | |
| 2.8 | 19889 | 98256 | 944,33 | 0,00527358 |
| 2.6 | 21446 | 99629 | 1088,5 | 0,132448323 |
| 2.4 | 21646 | 99784 | 1088,9 | 0,000367343 |
| 2.2 | 21886 | 99970 | 1088,9 | 0 |
| 2.0 | 22206 | 100218 | 1087,4 | 0,001379437 |
| 1.5 | 26476 | 103780 | 1116,4 | 0,025976353 |
| 1.0 | 36762 | 112672 | 1116 | 0,000358423 |
| 0.5 | 135268 | 202976 | 1122,6 | 0,005879209 |

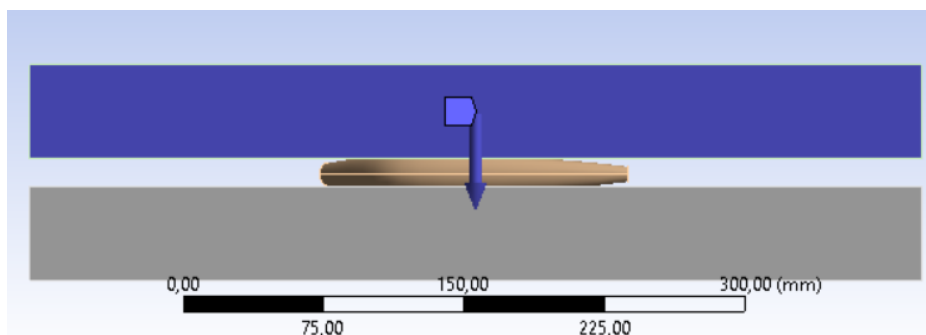


Gambar 3. 15 Grafik Uji Konvergensi

Dari data pada table 3.2 didapat grafik 3.15 dimana dari grafik tersebut dapat dinyatakan bahwa *von-misses equivalent stress* akan meningkat seiring dengan bertambahnya jumlah element. Dari table dan grafik diatas, didapatkan bahwa titik optimal yang sudah menunjukkan konvergensi adalah pada 21886 Nodes dan 99970 element. Dengan hasil tegangan *von-misses* maksimum bernilai 1088,9 Mpa dan error terkecil yaitu 0

6. Menentukan letak kecepatan awal

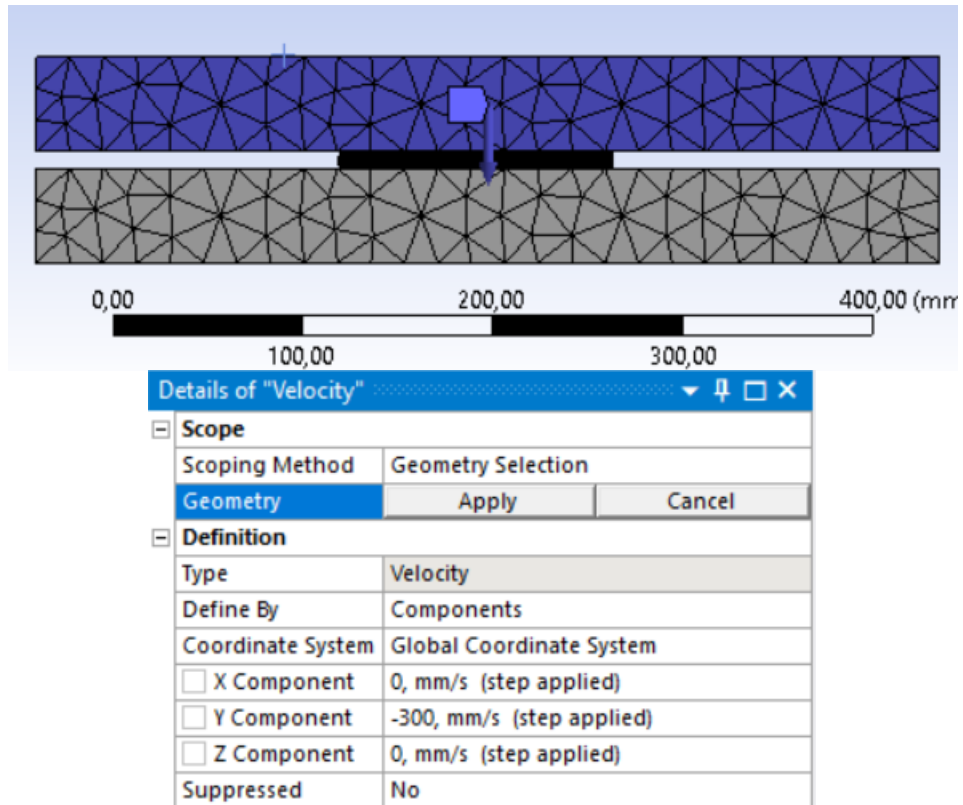
Body *upper die* selanjutnya diberi kecepatan awal agar kondisinya *die* menempa benda kerja dengan kecepatan awal tertentu. Kecepatan awal yang diberikan yaitu sebesar 300 mm/s. Kecepatan awal yang dimaksud disini adalah kecepatan sesaat sebelum *die* menyentuh *workpiece* bukan kecepatan awal penempaan.



Gambar 3. 16 Penentuan letak kecepatan awal

7. Menentukan kecepatan gerak *die*

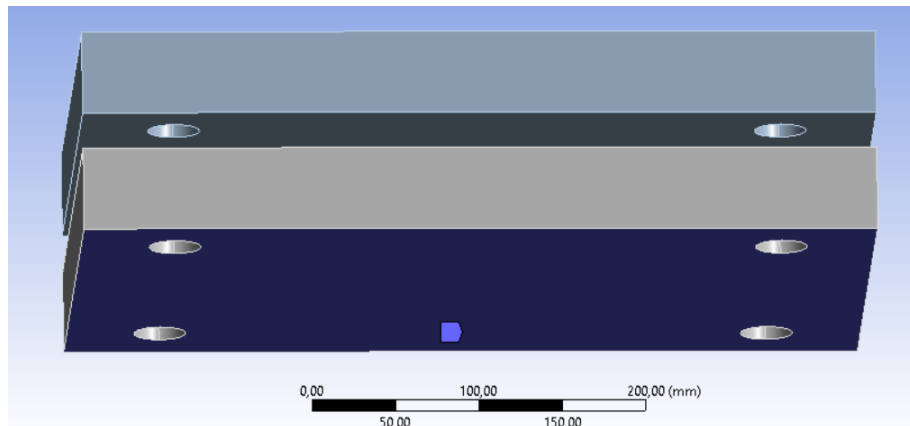
Ditentukan pula kecepatan gerak *die* terhadap sumbu Y sesuai variasi yang diinginkan yaitu dari 300 mm/s.



Gambar 3. 17 Penentuan kecepatan gerak *die*

8. Menentukan letak tumpuan (*fixed support*)

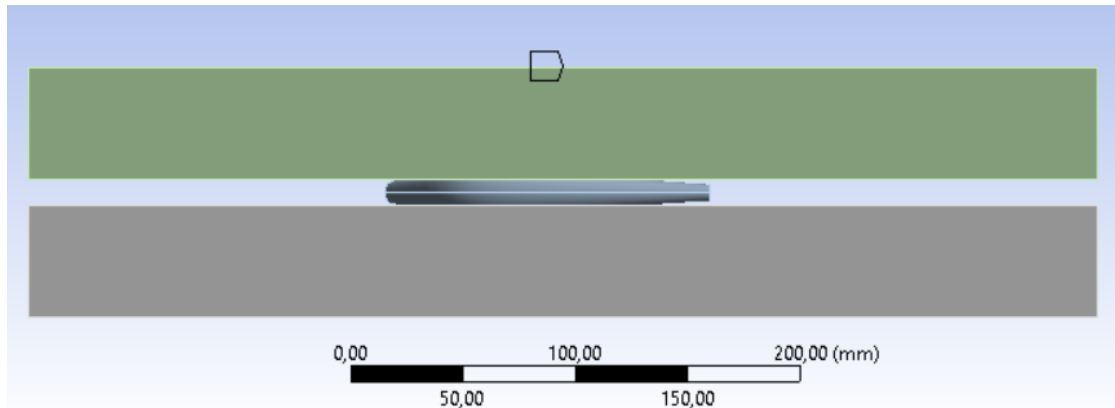
Lower die sebagai dudukan dimana nantinya cetakan tidak bergerak saat dilakukan pembebanan.



Gambar 3. 18 Penentuan letak tumpuan (*fixed support*)

9. Menentukan *Displacement*

Untuk mencegah pergerakan ke sumbu lain, diberikan displacement pada *die* atas. *Displacement* yang diberikan adalah bebas terhadap sumbu Y dan terkunci terhadap sumbu lain



| Details of "Displacement" | |
|--------------------------------------|--------------------------|
| Scope | |
| Scoping Method | Geometry Selection |
| Geometry | 1 Face |
| Definition | |
| Type | Displacement |
| Define By | Components |
| Coordinate System | Global Coordinate System |
| <input type="checkbox"/> X Component | 0, mm (ramped) |
| Y Component | Free |
| <input type="checkbox"/> Z Component | 0, mm (ramped) |
| Suppressed | No |

Gambar 3. 19 Pemberian Displacement

10. Menentukan *end time*

Untuk memvariasikan kecepatan, ditentukan pula *end time* atau waktu berakhirnya simulasi dan itu disesuaikan dengan variasi kecepatan yang diinginkan. Sebagai contoh, jika ingin mendapatkan kecepatan sebesar 10 mm/s maka di atur waktu simulasi sebesar 1,25 s

| Details of "Analysis Settings" | |
|----------------------------------|------------------|
| Step Controls | |
| End Time | 0,03996666 s |
| Time Step Safety Factor | 0,9 |
| Maximum Number Of Cycles | 100000000 |
| Automatic Mass Scaling | No |
| CPU and Memory Management | |
| Memory Allocation | Manual |
| --- Value(MB) | 16384 |
| Number Of CPUS | 12 |
| Processing Type | Program Contr... |
| Solver Controls | |
| Solver Type | Program Contr... |
| Solver Precision | Program Contr... |
| Unit System | mm |

Gambar 3. 20 Pemberian End Time

3.3.4 Analisis Hasil

Setiap proses manufaktur pada pembuatan logam akan menghasilkan tegangan efektif terhadap benda kerjanya. Untuk dapat mengetahui tegangann efektif yang timbul pada *die* dan

benda kerja akibat proses *forging*, maka *output solver* dibuat menjadi *equivalent von-misses*. Hal ini dilakukan karena untuk mengetahui tegangan luluh yang dialami benda kerja dan *die* saat mengalami deformasi plastis. Selain itu, dipilih juga *total deformation* sebagai *output solver* untuk mengetahui deformasi *workpiece*.

Berdasarkan simulasi percobaan yang dilakukan, kembali disimulasikan dengan *workpiece* bervariasi. Tahapan dalam simulasi yang baru akan identic dengan simulasi sebelumnya. Variasi ini juga dilakukan untuk menemukan mengetahui berapa umur *die* jika kita melakukan penempaan dengan masing – masing variasi *workpiece*

3.4 Validasi Perangkat Lunak Ansys LS-Dyna

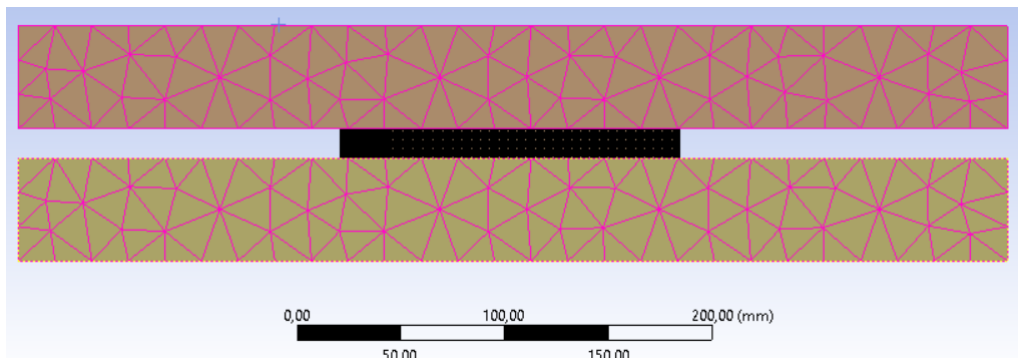
Untuk menguji apakah perangkat lunak Ansys – Dyna bisa mewakili kondisi real atau tidak, dapat dilakukan validasi. Validasi yang dilakukan adalah melakukan simulasi *ring compression test* pada perangkat lunak dan kemudian membandingkannya dengan eksperimen dari jurnal yang berjudul “*Determination of the friction factor of Ti-6Al-4V titanium alloy in hot forging by means of ring-compression test using FEM*” yang dibuat oleh Zhu *et. al.* pada tahun 2011. Penelitian ini bertujuan untuk mencari koefisien gesek untuk material Ti6Al4V pada proses *hot forging*. Pada eksperimen ini material Ti6Al4V berbentuk *ring* dipanaskan hingga mencapai suhu 940C. Hasil dari *ring compression* ini kemudian diukur untuk dan digunakan sebagai acuan dalam mencari koefisien gesek menggunakan perangkat lunak Deform 3d. Hasil simulasi menunjukkan bahwa *heat transfer* mempunyai pengaruh yang

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini dilakukan dengan metode elemen hingga dengan menggunakan aplikasi ANSYS. Pada penelitian kali ini percobaan yang dilakukan adalah simulasi *last forging* dengan variasi kecepatan pembebanan yaitu sebesar 300 mm/s. koefisien gesek yang digunakan adalah koefisien gesek antara titanium dan stainless steel dengan AISI H13.

Nilai tegangan efektif (*equivalent von-misses*) didapatkan dari aplikasi ANSYS Workbench LS-DYNA setelah menyelesaikan beberapa simulasi dengan langkah yang telah dijelaskan pada bab sebelumnya. Nilai perpindahan *upper die* didapat dari hasil *output solver directional deformation* pada *upper die* dan juga disesuaikan dengan waktu simulasi. Nantinya hasil tegangan *die* yang didapat dari *output solver* akan dimasukkan kedalam persamaan Archard Wear dan digunakan untuk mencari *tool life* dari *upper die*.

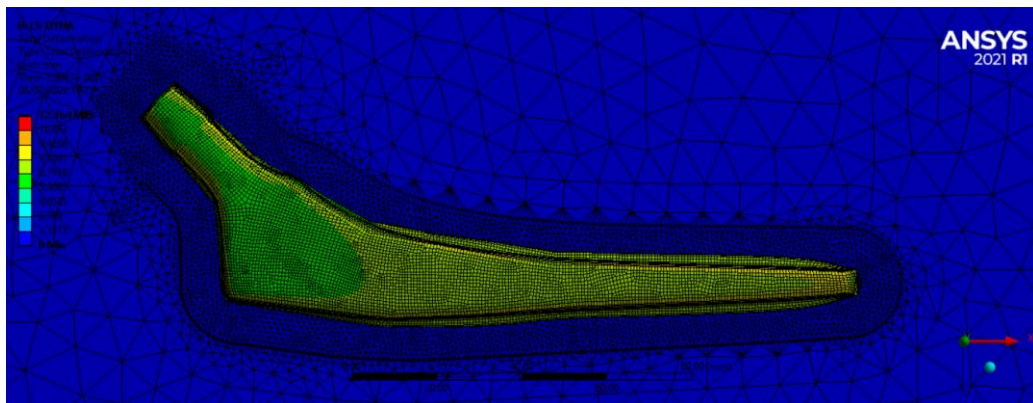
Berikut ini adalah gambaran simulasi *forging* yang dilakukan oleh penulis seperti pada gambar 4.1 dibawah.



Gambar 4. 1 Proses Simulasi *hot forging femoral stem*

4.1 Penentuan Parameter dan Dimensi Workpiece

Sebelum melakukan simulasi dengan *software* ANSYS WORKBENCH LS-DYNA, perlu ditentukan beberapa parameter dan juga dimensi workpiece yang akan digunakan pada simulasi. Adapun dimensi *workpiece* telah dibuat sebelumnya oleh orang yang berbeda. *Workpiece* pada percobaan kali ini menggunakan material SS316L dengan bentuk plat dan sudah di validasi sebelumnya oleh pembuat *workpiece*. Contoh dari *workpiece* yang digunakan dalam proses *forging* dapat dilihat pada gambar dibawah



Gambar 4. 2 *workpiece* yang dicetak

Tabel 4. 1 Parameter pada Simulasi

| Parameter | Nilai |
|---|------------------------------|
| Kecepatan awal <i>Upper Die</i> (mm/s) | 300 |
| Kecepatan kerja <i>Upper Die</i> (mm/s) | 300 |
| Suhu Awal <i>workpiece</i> (°C) | 1000 (Plat) , 995 (Batangan) |
| Koefisien Gesek | 0,3 (Plat) , 0,35 (Batangan) |
| Suhu <i>Die</i> (°C) | 22 |
| Suhu Sekitar (°C) | 22 |
| <i>Meshing Die</i> (mm) | 1,2 |
| <i>Meshing Workpiece</i> (mm) | 0,7 |

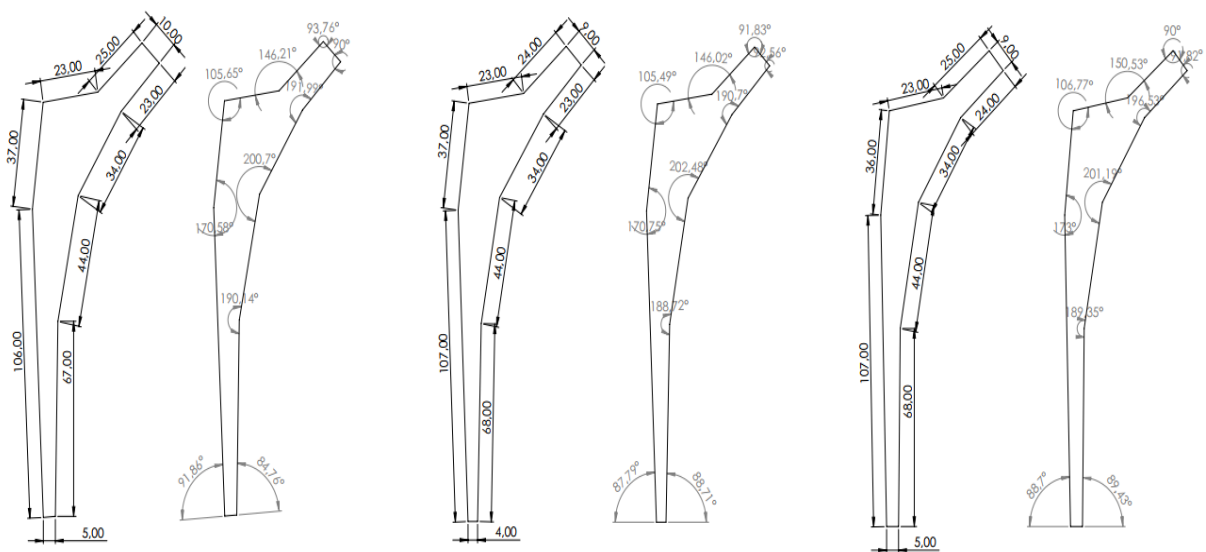
Sebagai penjelelas, kecepatan awal yang dimaksud pada tabel adalah kecepatan sesaat sebelum *die* menyentuh *workpiece*. Hal ini dilakukan untuk menghemat waktu simulasi karena jika simulasi dilakukann dengan kondisi real, *end time* menjadi sangat lama dan watu simulasi juga akan bertambah lama

Pada percobaan kali ini variasi *workpiece* yang digunakan menggunakan 2 jenis *workpiece* yaitu plat dan batangan dengan ukuran sebagai berikut

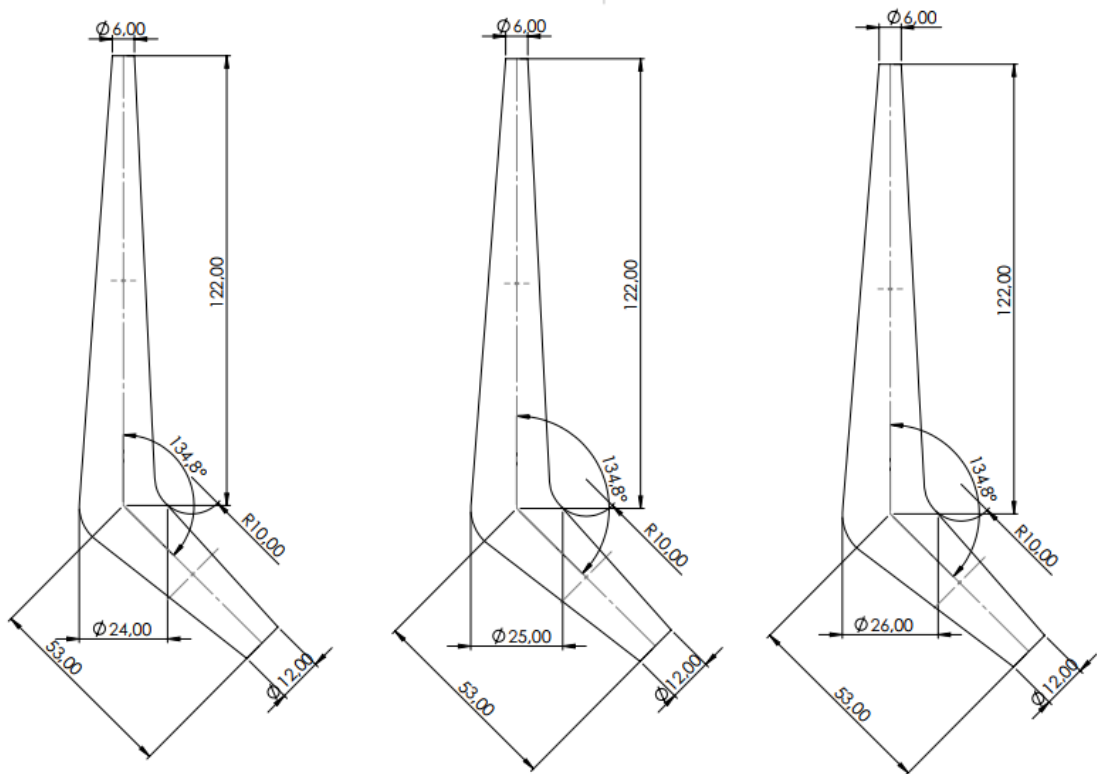
Tabel 4. 2 Variasi *Workpiece* pada Simulasi

| Benda Kerja | Variasi | Ukuran |
|-------------|---------|--------|
| PLAT | 1 | 12 mm |
| | 2 | 13 mm |
| | 3 | 14 mm |
| BATANGAN | 1 | 24 mm |
| | 2 | 25 mm |
| | 3 | 26 mm |

Dibawah ini disajikan gambar masing-masing *workpiece* baik plat maupun batangan.



(a)



(b)

Gambar 4. 3 Geometri benda kerja (a) Plat (b) Batangan

Adapun alasan penggunaan *workpiece* dengan geometri seperti diatas adalah untuk memenuhi geometri dari *dies*. Oleh karena itu digunakan benda kerja batangan dengan diameter leher yang cukup besar yaitu sebesar 24, 25, 26 mm. Untuk plat ketebalannya lebih kecil yaitu 12, 13, dan 14 mm karena bentuk akhirnya lebih mendekati produk.

4.2 Analisis Keausan *Dies* padaa Proses *Hot Forging*

Pembuatan *femoral stem total hip arthroplasty* menggunakan proses *hot forging*. Hal ini dikarenakan bentuknya yang cukup kompleks dan proses *hot forging* dianggap cocok untuk memproduksinya. Sebagian besar biaya produksi tersebut diarahkan pada biaya alat dan perawatannya. Hal ini mengacu pada umur dan keawetan dari *die*. Factor utama yang memengaruhi umur atau keawetan dari *die* adalah kerusakan yang disebabkan oleh keausan (*wear*), kelelahan (*Fatigue*) dan deformasi plastic.

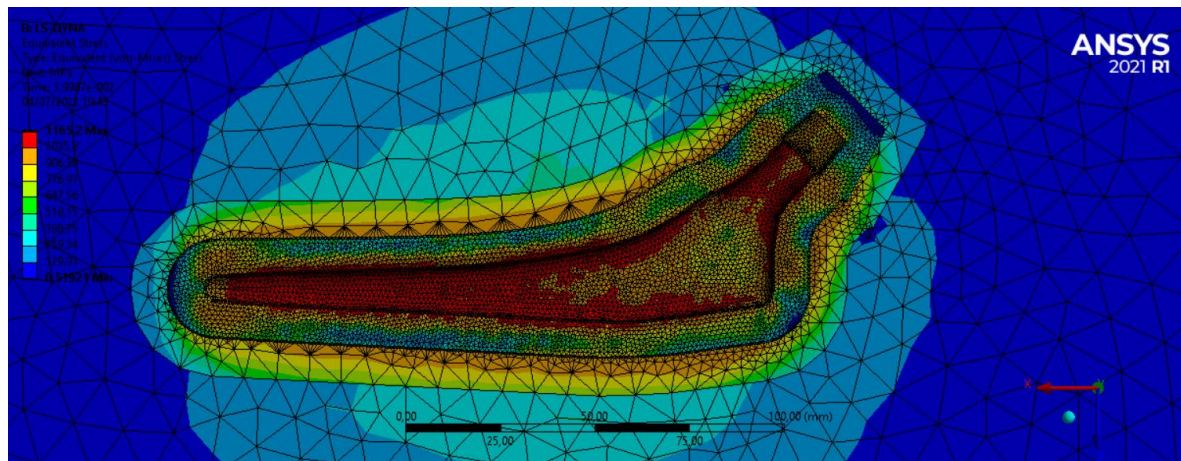
Kita dapat meningkatkan umur *die* dengan membuat kombinasi proses yang optimal. Kondisi optimal salah satunya bisa berupa pelumasan yang baik. Pada bab ini, akan dijelaskan tentang keausan yang terjadi pada *die* atas dan *die* bawah. Karena *die* atas mengalami pergerakan, kemungkinan besar *die* atas lah yang mengalami keausan lebih besar.

Untuk menghitung keausan, metode yang digunakan penulis adalah perhitungan manual yang juga dibantu dengan hasil dari metode elemen hingga menggunakan *software* ANSYS untuk mendapatkan distribusi tegangan dari *die*. Kedalaman keausan yang dapat juga disebut *depth of wear* dari *die* bisa didekatkan dengan persamaan *Archard Wear* seperti yang tertera dibawah ini

$$\Delta d = \frac{K P \Delta L}{H}$$

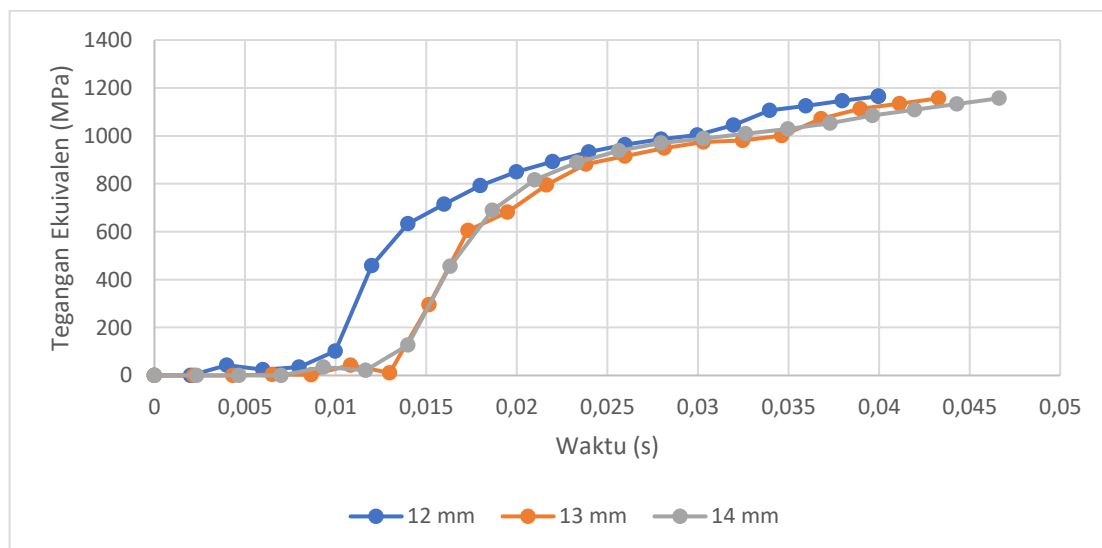
Nilai K yang digunakan dapat dilihat pada table 2. 3. Pada penelitian kali ini, penulis menggunakan koefisien keausan dalam kondisi pelumasan normal atau *average lubrication* dimana koefisien keausan yang digunakan adalah 2×10^{-5}

Parameter selanjutnya yang dibutuhkan dalam perhitungan adalah tegangan yang terjadi saat proses *forging*. Distribusi tegangan yang terjadi pada saat proses *forging* didapatkan dari hasil simulasi. Distribusi tegangan yang terjadi saat proses simulasi digambarkan seperti gambar dibawah



Gambar 4. 4 Distribusi tegangan pada *dies*

Gambar 4. 3 merupakan hasil distribusi tegangan pada *die* atas yang didapatkan dari simulasi pada ANSYS menggunakan *workpiece* dengan ketebalan 12 mm dengan kecepatan 300mm/s. Adapun tegangan terbesar terjadi pada bagian leher *die*. Nilai tegangan equivalent maksimal yang didapat selama proses simulasi yaitu 1165,2 MPa. Nilai tegangan maksimal nantinya akan digunakan sebagai referensi dalam penghitungan *tool life* pada *dies*. Sebagai pembandingan, pada grafik dibawah ini ditunjukkan tegangan maksimal *die* untuk tiap variasi *workpiece*

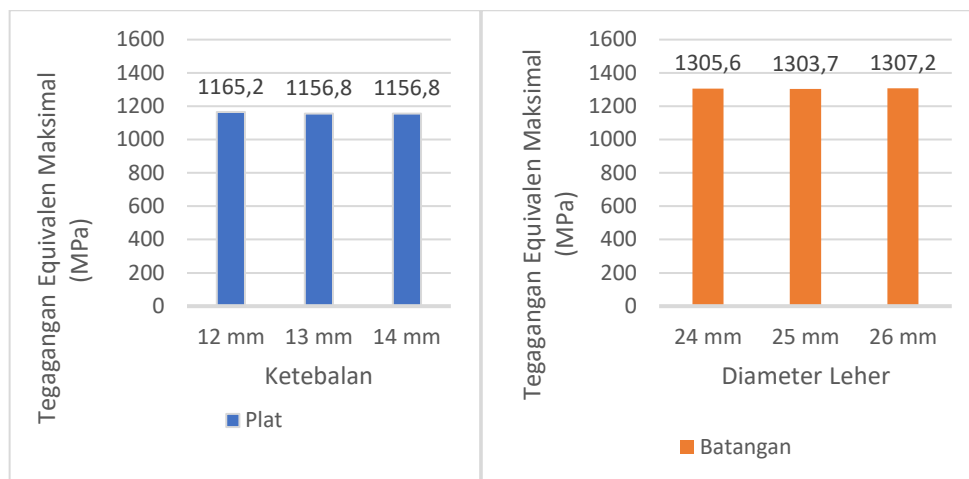


Gambar 4. 5 Grafik Kenaikan Tegangan Ekuivalen Antar Material Plat terhadap Waktu

Pada grafik diatas dinyatakan nilai tegangan equivalen pada waktu tertentu dari setiap variasi ukuran material. Dapat dilihat nilai tegangan equivalen meningkat seiring dengan bertambahnya waktu penempaan dan akhirnya mencapai maksimal pada akhir penempaan. Untuk tegangan equivalen dari masing-masing variable dapat dilihat pada table dibawah.

Tabel 4. 3 Tegangan Maksimal pada Variasi *Workpiece*

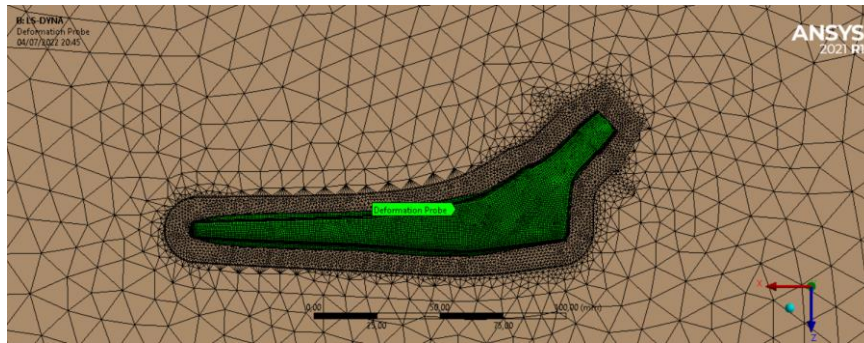
| Benda Kerja | Ukuran | Tegangan Maksimal (MPa) |
|-------------|--------|-------------------------|
| PLAT | 12 mm | 1165,2 |
| | 13 mm | 1156,8 |
| | 14 mm | 1156,8 |
| BATANGAN | 24 mm | 1305,6 |
| | 25 mm | 1303,7 |
| | 26 mm | 1307,2 |



Gambar 4. 6 Diagram Perbandingan Tegangan Equivalen Antar Variasi Material

Gambar 4. 4 menunjukkan bahwa *workpiece* dengan bentuk batangan menghasilkan tegangan ekuivalen yang lebih tinggi daripada bentuk plat. Adapun hal ini terjadi karena *workpiece* bentuk plat menggunakan material SS316L sedangkan batangan menggunakan material Ti6Al4V. Secara property mekanik, Ti6Al4V lebih kuat dan lebih tangguh daripada SS316L. Selain itu, koefisien gesek Ti6Al4V juga lebih tinggi daripada SS316L dan membuat aliran material semakin sulit. Pada *workpiece* batangan, tegangan equivalen akan meningkat seiring dengan kenaikan diameter leher dan untuk plat, tegangan equivalen akan meningkat seiring dengan meningkatnya ketebalan *workpiece*

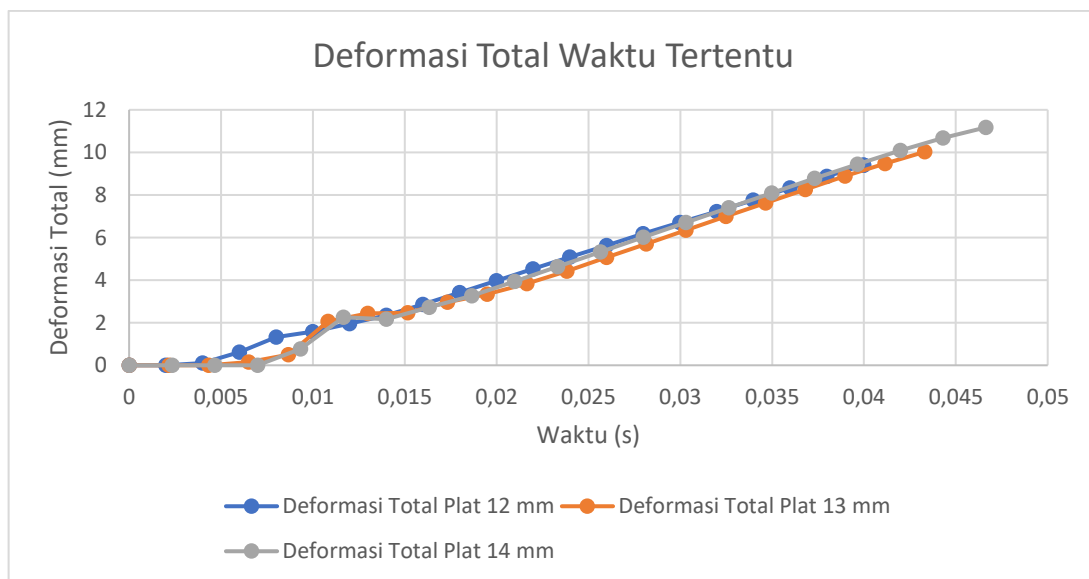
Parameter lainnya yang digunakan dalam perhitungan *tool life* adalah *sliding distance*. *Sliding distance* dalam seberapa jauh material bergesekan dengan *die*. Karena pada proses *forging* terjadi gesekan ke segala arah, dalam percobaan kali ini, *sliding distance* yang digunakan adalah deformasi yang terjadi pada *workpiece* hingga menjadi *femoral stem* atau dapat juga disebut sebagai *total deformation*. Cara mendapatkan *total deformation* adalah dengan cara meletakkan *deformation probe* pada *workpiece* dan melihat deformasi yang terjadi pada *output solver* dari *probe* tersebut. Peletakan *deformation probe* dapat dilihat pada gambar dibawah



| Details of "Deformation Probe" | |
|---------------------------------------|--------------------|
| Location Method | Geometry Selection |
| Geometry | 1 Body |
| Suppressed | No |
| Options | |
| Result Selection | Total |
| <input type="checkbox"/> Display Time | End Time |
| Spatial Resolution | Use Maximum |
| Results | |
| Maximum Value Over Time | |
| <input type="checkbox"/> Total | 9,3918 mm |
| Minimum Value Over Time | |
| <input type="checkbox"/> Total | 0, mm |
| Information | |

Gambar 4. 7 Deformasi yang terjadi pada *workpiece*

Dari gambar 4. 4 ditunjukkan total deformation dari material plat dengan ketebalan 12 mm. Didapatkan bahwa *sliding distance* adalah sebesar 9,39 mm. Oleh karena itu, nilai 9,39 mm akan dimasukkan kedalam nilai *L*. *Total deformation* dari variasi *workpiece* lain dapat dilihat pada grafik dibawah

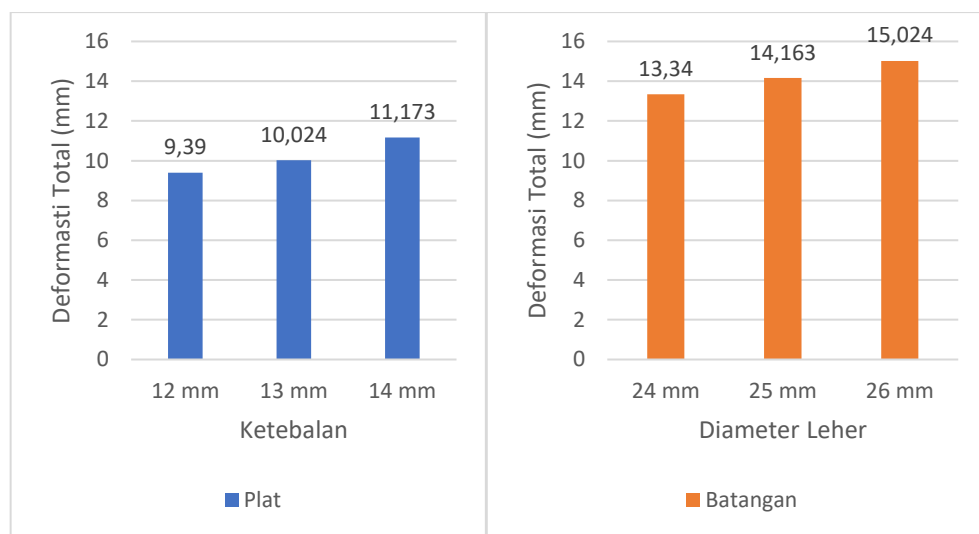


Gambar 4. 8 Grafik Kenaikan Deformasi Total Antar Material Plat terhadap Waktu
Grafik diatas menunjukkan nilai deformasi total pada waktu tertentu dari setiap variasi ukuran material. Dapat dilihat deformasi total meningkat seiring dengan bertambahnya waktu

penempaan dan akhirnya mencapai maksimal pada akhir penempaan. Untuk deformasi total maksimal dari masing-masing variable dapat dilihat pada table dibawah.

Tabel 4. 4 Total Deformation pada Variasi Workpiece

| Benda Kerja | Ukuran | Total Deformation (mm) |
|-------------|--------|------------------------|
| PLAT | 12 mm | 9,39 |
| | 13 mm | 10,024 |
| | 14 mm | 11,173 |
| BATANGAN | 24 mm | 13,34 |
| | 25 mm | 14,163 |
| | 26 mm | 15,024 |



Gambar 4. 9 Diagram Deformasi Total Antar Material

Gambar 4. 6 menunjukkan bahwa *workpiece* dengan bentuk batangan menghasilkan deformasi total yang lebih tinggi daripada bentuk plat. Adapun hal ini memang sepantasnya terjadi karena *workpiece* dengan bentuk plat dari awal sudah dibentuk menyesuaikan bentuk *femoral stem* sedangkan batangan tidak. Selain itu diameter batangan yang digunakan juga cukup besar jika dibandingkan dengan ketebalan plat. Ini menyebabkan aliran material pada *workpiece* batangan lebih tinggi daripada plat. Untuk plat, deformasi total meningkat seiring dengan kenaikan ketebalan plat. Hal ini terjadi karena semakin tebal plat, semakin kecil luas penampangnya dan deformasi akan meningkat untuk mengisi *die*. Untuk batangan, deformasi total akan meningkat seiring meningkatnya ketebalan diameter leher batangan.

Selanjutnya dibutuhkan juga nilai kekerasan dari material *dies*. Material yang digunakan pada *die* adalah AISI H13 Tool Steel pada suhu ruang. Pada suhu ruang, kekerasan H13 adalah sebesar 45 HRC atau jika dinyatakan dalam MPa adalah sebesar 1455 MPa. (Ding et al. 2011). Nilai ini akan dimasukkan pada parameter H.

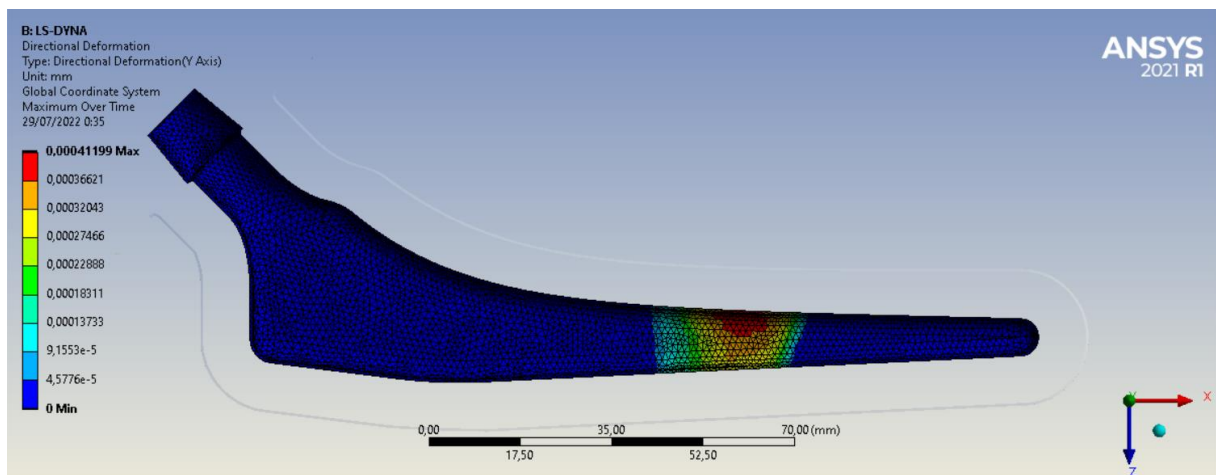
Setelah seluruh parameter diketahui, kita dapat menghitung laju keausan dengan persamaan *Archard Wear* seperti persamaan 4.1, berikut ini perhitungannya

$$\Delta d = \frac{K P \Delta L}{H}$$

$$\Delta d = \frac{2 \times 10^{-5} \cdot 1165,2 \text{ MPa} \cdot 9,39 \text{ mm}}{1455 \text{ MPa}}$$

$$\Delta d = 0,0001504 \text{ mm/cycle}$$

Persamaan *Archard* Wear ini digunakan untuk mencari laju deformasi rata-rata untuk setiap siklus. Contoh perhitungan *Archard* *Wear* diatas menghasilkan deformasi rata-rata sebesar 0,0001504 mm untuk *workpiece* dengan ketebalan 12 mm. Hasil perhitungan ini dapat digunakan untuk menentukan waktu penggantian atau peremajaan *die*. Namun, hasil pada percobaan sesungguhnya bisa berbeda karena pada setiap penempaan bisa menghasilkan nilai deformasi yang berbeda. Contoh nilai deformasi tersebut dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



Gambar 4. 10 Titik deformasi dari *dies*.

Gambar 4.10 menunjukkan deformasi maksimal dari *die* yang berbeda dari hasil perhitungan, akan tetapi, nilai ini hanya untuk siklus penempaan pertama. Berbeda dengan perhitungan *Archard* yang merupakan laju rata-rata pada setiap siklus.

Untuk mengetahui jumlah siklus nya kita harus menentukan nilai toleransinya. Nilai toleransi untuk *die* dapat ditentukan dari buku panduan ASM Handbook, Volume 14A: Metalworking: Bulk Forming. Didalam buku tersebut disebutkan terdapat 2 jenis toleransi yaitu *match tolerance* dan *closure tolerance*. Toleransi tersebut dapat dilihat pada table dibawah

Tabel 4. 5 Variasi toleransi pada *dies* (ASM, 2015)D

Table 4 Match tolerances, (a)

| Materials | Displacement allowances, in., for trimmed forgings weighing, lb: | | | | | | | |
|------------------------------------|--|--------------------|---------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|--------------|
| | Over 2 to 5, incl (b) | Over 5 to 25, incl | Over 25 to 50, incl | Over 50 to 100, incl | Over 100 to 200, incl | Over 200 to 500, incl | Over 500 to 1000, incl | Over 1000 |
| Carbon and low-alloy steels | 1/64 (0.016) | 1/32 (0.031) | 3/64 (0.047) | 1/16 (0.063) | 3/32 (0.094) | 1/8 (0.125) | 5/32 (0.156) | 3/16 (0.188) |
| Stainless steels | 1/32 (0.031) | 3/64 (0.047) | 1/16 (0.063) | 3/32 (0.094) | 1/8 (0.125) | 5/32 (0.156) | 3/16 (0.188) | 1/4 (0.250) |
| Heat-resisting and titanium alloys | 1/32 (0.031) | 3/64 (0.047) | 1/16 (0.063) | 3/32 (0.094) | 1/8 (0.125) | 5/32 (0.156) | 3/16 (0.188) | 1/4 (0.250) |
| Aluminum and magnesium alloys | 1/64 (0.016) | 1/32 (0.031) | 3/64 (0.047) | 1/16 (0.063) | 3/32 (0.094) | 1/8 (0.125) | 5/32 (0.156) | 3/16 (0.188) |
| Refractory metals | 1/16 (0.063) | 3/32 (0.094) | 1/8 (0.125) | 5/32 (0.156) | 3/16 (0.188) | 1/4 (0.250) | 5/16 (0.313) | 3/8 (0.375) |

(a) Amount of displacement of a point in one die half from the corresponding point in the other die half in a direction parallel to the parting line. (b) Tolerances for forgings weighing less than 2 lb are customarily negotiated with the purchaser

Table 5 Die-closure or thickness tolerances, (a)

| Materials | Die-closure tolerances, in., for plan area at the trim line, sq in. (b): | | | | | | |
|------------------------------------|--|---------------------|---------------------|----------------------|-----------------------|------------------------|--------------|
| | 10 and under | Over 10 to 30, incl | Over 30 to 50, incl | Over 50 to 100, incl | Over 100 to 500, incl | Over 500 to 1000, incl | Over 1000 |
| Carbon and low-alloy steels | 1/32 (0.031) | 1/16 (0.063) | 3/32 (0.094) | 1/8 (0.125) | 5/32 (0.156) | 3/16 (0.188) | 1/4 (0.250) |
| Series 400 stainless steels | 1/32 (0.031) | 1/16 (0.063) | 3/32 (0.094) | 1/8 (0.125) | 3/16 (0.188) | 1/4 (0.250) | 5/16 (0.313) |
| Series 300 stainless steels | 1/16 (0.063) | 3/32 (0.094) | 1/8 (0.125) | 5/32 (0.156) | 3/16 (0.188) | 1/4 (0.250) | 5/16 (0.313) |
| Heat-resisting and titanium alloys | 1/16 (0.063) | 3/32 (0.094) | 1/8 (0.125) | 3/16 (0.188) | 1/4 (0.250) | 5/16 (0.313) | 3/8 (0.375) |
| Aluminum and magnesium alloys | 1/32 (0.031) | 1/32 (0.031) | 1/16 (0.063) | 3/32 (0.094) | 1/8 (0.125) | 3/16 (0.188) | 1/4 (0.250) |
| Refractory metals | 3/32 (0.094) | 1/8 (0.125) | 5/32 (0.156) | 3/16 (0.188) | 1/4 (0.250) | 5/16 (0.313) | 3/8 (0.375) |

(a) Tabulated figures are plus values only. (b) Flash not included

Pada table diatas, ditunjukkan 2 jenis toleransi yaitu *match tolerance* dan *closure tolerance*. *Match tolerance* adalah toleransi yang digunakan untuk membatasi *missalignment* pada *dies* sedangkan *closure tolerance* menyinggung variasi dimensi di seujur *parting line* yang fundamental. *Match tolerance* juga hanya ditinjau dari 1 *die* sedangkan *closure tolerance* ditinjau dari kedua *die*. Untuk menentukan berapa toleransi yang kita gunakan, kita perlu melihat berat produk untuk *match tolerance* dan luas penampang produk tanpa *flash* untuk *closure tolerance*. Berat produk *femoral stem* adalah 190 gram untuk SS316l dan 106 gram untuk Ti6Al4V. dan untuk luas penampang dari keduanya adalah 2625 mm². Dari geometri tersebut dapat kita gunakan toleransi untuk berat dibawah 2 pon dan luas penampang dibawah 10 in². *Match tolerance* yang diizinkan untuk menempa kedua produk tersebut adalah 1/32 inci atau 0.79375 mm dan *closure tolerance* yang diizinkan adalah 1/16 inci atau 1.5875 mm. karena pada produk ini *closure tolerance* adalah dua kali *match tolerance*, maka kita dapat menggunakan *match tolerance* untuk 1 *die* saja yaitu 0.79375 mm. Setelah kita mendapatkan nilai toleransinya, selanjutnya adalah membagikan nilai tersebut dengan deformasi yang terjadi pada setiap siklus

$$\text{number of cycle} = \frac{\text{allowed deformation}}{\text{wear rate}}$$

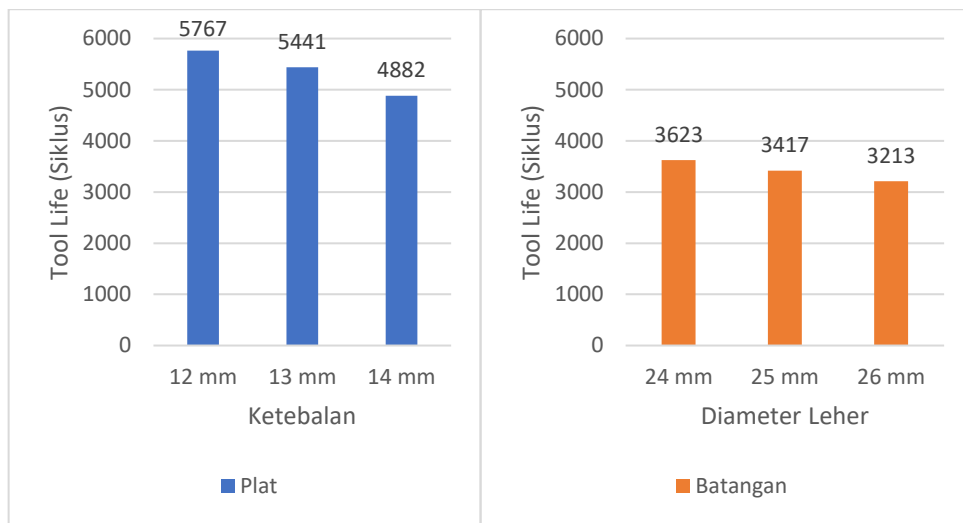
$$\text{number of cycle} = \frac{0,79375\text{mm}}{0,0001504 \text{ mm/cycle}}$$

$$\text{number of cycle} = 5767 \text{ cycle}$$

Dari persamaan diatas didapat jumlah siklus untuk *workpiece* plat dengan ketebalan 12 mm, siklus maksimal yang dapat diterima oleh *die* adalah sebesar 5767 siklus. Kita lakukan perhitungan yang sama pada setiap *workpiece* dan didapat jumlah siklus dari setiap table seperti pada table dibawah ini

Tabel 4. 5 *Tool Life* pada Variasi *Workpiece*

| Benda Kerja | Ukuran | <i>Tool Life</i> (cycle) |
|-------------|--------|--------------------------|
| PLAT | 12 mm | 5767 |
| | 13 mm | 5441 |
| | 14 mm | 4882 |
| BATANGAN | 24 mm | 3623 |
| | 25 mm | 3417 |
| | 26 mm | 3213 |



Gambar 4. 10 Diagram Hasil Perhitungan *Tool Life* Antar Material

Pada diagram di gambar 4. 8 dapat dilihat bahwa *workpiece* berbentuk batangan memiliki *tool life* yang lebih rendah daripada plat. Hal ini sudah sepantasnya terjadi karena baik tegangan ekuivalen maupun deformasi total dari batangan lebih tinggi daripada plat. Adapun factor yang cukup signifikan dalam memengaruhi *tool life* tersebut adalah deformasi total dari *workpiece*. Hal ini wajar terjadi karena kita menggunakan *workpiece* batangan dengan diameter yang cukup besar dibanding dengan ketebalan plat. Ini memperbesar kedalaman keausan (*depth of wear*). *Depth of wear* yang besar membuat *die* menjadi lebih cepat aus dan jumlah siklus maksimalnya mengecil.

Berdasarkan persamaan Archard yang digunakan, salah satu parameter yang sangat berpengaruh dalam *tool life* adalah pelumasan yang digunakan. Kita dapat meningkatkan umur dari *die* dengan melakukan pelumasan yang baik.

Karakteristik pelumasan yang ideal berdasarkan penelitian Kumar U. et al (2014) yang berjudul *Hot Forging Lubricant* adalah sebagai berikut.

1. Mengurangi *sliding friction* antara *dies* dan *workpiece*
2. Dapat mencegah lengket
3. Bekerja sebagai insulator
4. Non-abrasif dan non-korosif
5. Bebas polusi
6. Harga terjangkau

Pada masa kini, ada beberapa campuran pelumas yang sering dan cocok digunakan pada proses *hot forging* diantaranya *water-based graphite emulsion*, *water based graphite*, dan *water*

based synthetic atau *non-graphite*. Pelumas dengan jenis ini sering digunakan dalam *forging* karena aman dan bersifat mereduksi gesekan yang baik. Jika digunakan dengan tepat maka grafit akan membantu bahkan dalam rentang temperature yang luas

Penelitian ini memerlukan validasi dalam kondisi real. Validasi dapat dilakukan dengan menggunakan beberapa instrument seperti *tool maker microscope*, *optical microscope* dan *scanning electron microscope*. Alat-alat tersebut dapat kita lihat pada gambar dibawah (Izamshah, 2017). Pada penelitiannya, beliau menghitung *flank wear* pada proses *milling* Ti6Al4V dengan menggunakan *tool* berbahan dasar PVD TiAlN/AlCrN atau CVD TiCN/AL₂O₃



(a)



(b)



(c)

Gambar 4. 11 (a) *Tool Maker Microscope* (b) *Scanning Electron Microscope* (c) *Optical Microscope*

Tingkat keausan *dies* dapat dihitung dengan ketiga alat diatas. Pada penelitian Izamshah, alat tersebut bertipe Mitutoyo TM-505 untuk *tool maker microscope*, Meiji Techno EMZ-13TR untuk *optical microscope*, dan Zeiss EVO 50 SEM untuk *scanning electron minicroscope*. Karena nilai ketelitian yang terbatas dari ketiga alat tersebut, cara pengukurannya keausan yang bisa dilakukan adalah dilakukan penempatan sampai dengan jumlah siklus diatas 1000, kemudian *die* diukur *depth of wear* nya. Selain dari ketiga instrument diatas, keausan *dies* dapat juga menggunakan metode non-konvensional seperti *image processing*

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang bisa diambil dari penelitian kali ini adalah sebagai berikut :

1. Cara melakukan simulasi penentuan tool life menggunakan perangkat lunak ANSYS Workbench adalah pertama-tama menentukan engineering data untuk material *die* dan *workpiece*. Selanjutnya kita perlu mengimport geometri yang akan di simulasikan. Pada tahap simulasi hal pertama yang harus dilakukann adalah *assignment* material dengan geometri. Setelah itu kita perlu mendefinisikan kontak antara *workpiece* dengan *die*. pada penelitian ini jenis kontak yang diberikan adalah *body interaction*. Selanjutnya adalah proses *meshing* pada *die* dan *workpiece*. Setelah itu kita perlu menentukan kondisi awal yaitu kecepatan awal. Kita juga perlu menentukan kondisi batas seperti *fixed support*, *velocity* dan *displacement*. Selanjutnya perlu ditentukann jenis *solver* yang ingin digunakan seperti *equivalent stress*, *total deformation* dan *deformation probe* pada *workpiece*. Nantinya *output equivalent stress* pada *die* dan *deformation probe* pada *workpiece* akan digunakan dalam perhitungan *tool life* menggunakan persamaan Archard Wear.
2. Berdasarkan hasil simulasi yang dimasukkan kedalam perhitungan, penempaan dengan menggunakan *workpiece* plat menghasilkan umur *die* yang lebih lama daripada menggunakan *workpiece* batangan. Semakin tebal plat, semakin berkurang *tool life* pada *die*. Pada plat, *tool life* maksimal yang bisa didapat adalah pada ketebalan 12 mm yaitu 5767 siklus penempaan, sedangkan pada batangan, *tool life* maksimal didapat pada diameter leher 24 mm yaitu 3623 siklus penempaan.
3. Berdasarkan persamaan Archard, *tool life* dari material dapat ditingkatkan dengan mengatasi kausan yang terjadi. Ini dapat dicapai dengan penambahan lubrikasi yang baik, peningkatan kekerasan material *die* dan *post-processing* setelah proses *forging*

5.2 Saran

Adapun saran penulis untuk menunjang penelitian ini kedepannya adalah :

1. Diperlukannya eksperimen untuk memvalidasi permodelan yang dilakukan sehingga dapat lebih sesuai dengan kenyataan yang ada. Eksperimen tersebut bisa berupa pengukuran *depth of wear* dengan mikroskop atau image processing
2. Diperlukannya perbandingan dengan metode atau perangkat lunak lain
3. Dilakukan simulasi lain dengan material yang berbeda untuk *die* sehingga *tool life* dapat meningkat
4. Perlunya mempertimbangkan penambahan pelumas dalam parameter penelitian
5. Ditingkatkannya pemahaman tentang mesh, contact, dan penentuan kondisi pada ANSYS agar meminimalkan distorsi yang terjadi

DAFTAR PUSTAKA

- Abachi, Siamak & Akkök, Metin & Gökler, Mustafa. (2010). Wear analysis of hot forging dies. *Tribology International*. 43. 467–473. 10.1016/j.triboint.2009.07.011.
- Altan, T., Ngaile, G., & Shen, G (2005). *Cold and Hot Forging: Fundamentals and Applications*. ASM International
- Ardiansyah, Septian Kurnia. (2021). Proses *Hot Forging* Untuk Produksi Roda Kereta Api dengan Metode Elemen Hingga. Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh Nopember
- Ambrosio, Luigi. (2017). *Biomedical Composites 2nd Edition*. Woodheat Publishing. India: Spi Global
- American Academy of Orthopaedic Surgeons. (2020). Total Hip Replacement. AAOS
- ASM Handbook, Volume 14A: Metalworking: Bulk Forming S.L. Semiatin, editor, p820-823
DOI: 10.31399/asm.hb.v14a.a0004035 Copyright © 2005 ASM International® All rights reserved. www.asminternational.or
- ASTM F138-13a untuk material implant “*Standard specification for Wrought 18Chromium-14Nickel-2.5Molybdenum Stainless Steel Bar and Wire for Surgical Implant (UNS S31673)*”. *United States* : ASTM
- Badan Penelitian dan Pengembangan Kesehatan Kementerian Kesehatan Republik Indonesia. (2018). *Riset Kesehatan Dasar*. Kementerian Kesehatan Republik Indonesia.
- Baharuddin, M., Salleh, S.-H., Lee, M., & Noor, A. M. (2015). Development of Asian hip stem 3 – Fabrication using investment casting technique. *Osteoarthritis and Cartilage*, 23, A126–A127. <https://doi.org/10.1016/j.joca.2015.02.852>
- Battin A.A. (2009). *Finite Element Analysis of Forging*. The University of Texas Arlington
- Bombac, D., B, Miha., Fajfar, P., Kkosel,F., dan Turk, R. (2007), “Review of Materials in Medical Applications.” *RMZ-Materials and Geo-Environment.*, 54, 471-499.
- Cahyanto, Arief. (2009). Makalah Biomaterial. Bandung: Universitas Padjajaran
- Callister, W. D. (2007). *Materials Science and Engineering: An Introduction (7th ed.)*. John Wiley & Sons.
- Chandrasekaran, M. (2010). Forging of Metals and Alloys for Biomedical Devices. *Metals For Biomedical Devices*, 235–250.
- Chen, Q., & Thouas, G. A. (2015). Metallic Implant Biomaterials. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 87, 1- 57
- Davis, J.R. (1994). *ASM Specialty Handbook; Stainless Steels*. ASM International
- Ding, Hongtao & Shen, Ninggang & Shin, Yung. (2011). Experimental Evaluation and Modeling Analysis of Micromilling of Hardened H13 Tool Steels. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 133. 041007. 10.1115/1.4004499.
- Dutta, S.. (2018). Different Types and New Applications of Stainless Steel. 62. 86-91.
- Gardner, L., Insausti, A., Ng, K.T., & Ashraf, M. (2010). *Elevated temperature material properties of stainless stell alloys*. *Journal of Construction Steel Research*, 66(5), 634-647
- Ghahramanzadeh Asl, H., Sezek, S., & Alsaran, A. (2015). Analysis of hip prosthesis production with forging using the finite element method. *Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 8(1), 69. <https://doi.org/10.18185/eufbed.31555>
- <https://www.canforge.com/open-die-forging/> (diakses tanggal 2 April 2022)
- https://www.schulergroup.com/major/us/technologien/produkte/grundlagen_massivumformung_gesenkschmieden/index.html (Diakses tanggal 2 April 2022)

- Hutton, D. V. (2003). *Fundamentals of Finite Element Analysis*. McGraw Hill Higher Education.
- Iamtanomchai, R., & Bland, S. 2015. "Study of Wear and Life Enhancement of Hot Forging Dies Using Finite Element Analysis". **World Congress on Engineering**. London
- Izamshah, Raja & Redzuwan, Bahrin & Aziz, Mohd & Kasim, Mohd. (2017). Comparative study of tool wear in milling titanium alloy (Ti-6Al-4V) using PVD and CVD coated cutting tool. *Industrial Lubrication and Tribology*. 69. 10.1108/ILT-09-2016-0202.
- Jin, W., & Chu, P. K. (2017). Orthopedic Implants. *Reference Module in Biomedical Sciences*.
- Kubec, Václav & Duchek, Michal & Urbánek, Miroslav. (2016). Methodology of evaluation of tool wear using finite element method. *MM Science Journal*. 2016. 1407-1410. 10.17973/MMSJ.2016_11_2016133.
- Logan, D.L. (2012). *A First Course in the Finite Element Method* (T. Altieri (Ed); Fifth Edit). Global Engineering: Christopher M. Shortt.
- Maarefdoust, M., & Kadkhodayan, M. (2010). Simulation and analysis of hot forging process for industrial locking gear elevators. *The International Conference on Applied Mechanics and Mechanical Engineering*, 14(14), 1–10. <https://doi.org/10.21608/amme.2010.37680>
- Maburi, Efendi. (2012). Aplikasi *Severe Plastic Deformation (SPD)* dan *Heavy Cold Rolling* pada Baja Tahan Karat Austenitik 316L. Tangerang: Pusat Penelitian Metalurgi – LIP
- Mehta, Nirajkumar & Shiyani, Viral & Nasit, Jemish. (2013). *Metal Forming Analysis*. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. 3. 190-196.
- Mondelson. (1983). *Plasticity: Theory and Application*, Publishing Companies, Florida)
- Perhimpunan Dokter Spesialis Penyakit Dalam Indonesia. (2018). Rekomendasi IRA untuk Diagnosis dan Penatalaksanaan Osteoarthritis. PAPDI
- Prabhakar.A., Haneef, M., & Ahmed, S. (2013). *Sheet metal forming analyses with spring-back deformation on U-Bends in Isotropic plates*. IJIRSET
- Pratama, Ghusti Raka. (2020). Simulasi Pembuatan Femoral Stem hip Arthroplasty dengan Metode *Hot Forging*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember
- Roque, C. M. O. L., & Button, S.T. (2000). Application of The Finite Element Method in Cold Forging Processes. *Revisita Brasileira de Ciencias Mecanicas/Journal of The Brazilian Society of Mechanical Sciences*, 22(2), 189-202
- Seshu, P. (2012) *Textbook of Finite Element Analysis*. Mumbai: Indian Institute of Technology Bombay
- Singer. (1995). *Ilmu Kekuatan Bahan edisi ke 2*. Jakarta: Erlangga
- Sluzalec, Andrzej. (2003). *Theory of Metal Forming Plasticity*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Srinivas, Kartik. (2020). *Verifications and Validations in Finite Element Analysis (FEA)*. Ahmedabad: Research Gate
- Talha, M., Behera, C.K., & Sinha, O.P. (2013). A review on nickel-free nitrogen containing austenitic stainless steels for biomedical applications. *Materials Science and Engineering: C*, 33(7), 3563-3575
- Tathe, Amogh. (2010). *A Brief Review: Biomaterials and Their Application*. Mumbai: Research Gate
- Williams, J., & Fatemi, A. (2007). Fatigue Performance of Forged Steel and Ductile Cast Iron Crankshafts. *SAE Technical Papers*, 1-32

BIODATA PENULIS



Felix Rajaim Bastanta Munthe, merupakan anak pertama dari tiga bersaudara, putra kandung dari pasangan Ayahanda Ferdinan Munthe dan Ibunda Eva Kristina Br. Sembiring. Penulis lahir di Kota Medan pada tanggal 24 Juli 2000 dan sering berpindah tempat tinggal selama masa kecil nya. Mulai dari aceh sampai asahan. Pendidikan formal yang dijalani penulis dimulai dari TK Sultan Hassanuddin Aek Kanopan, dilanjutkan dengan SD Budi Murni 2 Medan, selanjutnya jenjang menengah pertama ditempuh di SMP Putri Cahaya Medan, dan pendidikan menengah akhir ditempuh di SMA Santo Thomas I Medan. Setelah menyelesaikan Pendidikan menengah, penulis

melanjutkan Pendidikan tinggi ke Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya pada tahun 2018 di Departemen Teknik Mesin FTI-RS ITS. Bidang ilmu yang ditekuni penulis adalah manufaktur. Selama perkuliahan penulis aktif kegiatan akademik maupun non akademik. Penulis aktif dalam bermusik baik daring maupun luring. Selain itu penulis juga sangat tertarik dengan industry kelapa sawit dan turunannya. Selama berkuliah, penulis pernah mengikuti magang di 2 perusahaan yaitu Socfin Indonesia dan Wilmar Nabati Indonesia. Penulis juga menjadi *chief of tribes* pada saat mengikuti magang di PT Wilmar dan mengikuti pelatihan *coaching*. Penulis juga aktif mengikuti beberapa pelatihan baik pelatihan teknis maupun non Teknik. Selain organisasi, penulis juga aktif menjadi asisten dosen dan asisten praktikum. Diluar itu, penulis memiliki ketertarikan di bidang music dan fotografi. Penulis terbuka untuk diskusi mengenai tugas akhir ini dan dapat dihubungi via email rajaimmunthe@gmail.com