



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**TUGAS AKHIR - TM184835**

# **SIMULASI PEMBUATAN FEMORAL STEM HIP ARTHROPLASTY DENGAN METODE HOT FORGING**

**Muhammad Ghusti Rakha Pratama**  
02111640000206

Dosen Pembimbing  
**Fahmi Mubarak., ST., MSc., PhD**  
NIP. 197801152003121002

**DEPARTEMEN TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA - 2020**

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*



**TUGAS AKHIR - TM184835**

**SIMULASI PEMBUATAN FEMORAL STEM HIP  
ARTHROPLASTY DENGAN METODE HOT FORGING**

**Muhammad Ghusti Rakha Pratama  
02111640000206**

**Dosen Pembimbing  
Fahmi Mubarak., ST., MSc., PhD  
NIP. 197801152003121002**

**DEPARTEMEN TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA - 2020**

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*



**FINAL PROJECT - TM184835**

**SIMULATION OF FEMORAL STEM HIP ARTHROPLASTY WITH  
HOT FORGING PROCESS**

**Muhammad Ghusti Rakha Pratama**  
02111640000206

Advisor  
**Fahmi Mubarok., ST., MSc., PhD**  
NIP. 197801152003121002

**MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT  
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY AND SYSTEM  
ENGINEERING  
INSTITUTE OF TECHNOLOGY SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA - 2020**

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

**HALAMAN PENGESAHAN**  
**SIMULASI PEMBUATAN FEMORAL STEM HIP**  
**ARTHROPLASTY DENGAN METODE HOT FORGING**  
**TUGAS AKHIR**

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat  
Memperoleh gelar sarjana teknik  
Program studi S-1 Departemen Teknik Mesin  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

**Muhammad Ghusti Rakha Pratama**  
NRP. 02111640000206

Disetujui oleh:

- 1 **Fahmi Mubarak, ST., MSc., PhD** ..... **(Pembimbing)**  
NIP. 197801152003121002
- 2 **Putu Suwarta ST, MSc, PhD** ..... **(Penguji 1)**  
NIP. 198203032009121007
- 3 **Suwarno, ST, MSc, PhD** ..... **(Penguji 2)**  
NIP. 198005202005011003
- 4 **Dr. Eng Sutikno, ST, MS** ..... **(Penguji 3)**  
NIP. 19740703200003100

SURABAYA  
AGUSTUS, 2020



*(halaman ini sengaja dikosongkan)*



## **SIMULASI PEMBUATAN FEMORAL STEM HIP ARTHROPLASTY DENGAN METODE HOT FORGING**

**Nama Mahasiswa** : Muhammad Ghusti Rakha Pratama  
**NRP** : 0211164000206  
**Departemen** : Teknik Mesin FTI-ITS  
**Dosen Pembimbing** : Fahmi Mubarak, ST., MSc., PhD

### **ABSTRAK**

*Osteoarthritis* (OA) adalah penyakit sendi yang bersifat degeneratif yang terjadi karena proses inflamasi kronis pada sendi dan tulang yang ada disekitar sendi tersebut. Bagian tubuh yang sering mengalami osteoarthritis seperti lutut, panggul, tangan, dan tulang belakang. Osteoarthritis panggul (*hip osteoarthritis*) terjadi pada sendi panggul (sendi *ball-and-socket*) dengan *femoral head*. Salah satu upaya medis yang dilakukan oleh dokter ortopedi untuk mengatasi *hip osteoarthritis* adalah dengan pergantian material implan pada bagian sendi pinggul yang disebut *hip prosthesis*. Pada umumnya, material implan lokal dibuat dengan metode *wax casting* sehingga secara sifat mekanik sulit untuk ditingkatkan. Proses manufaktur lain yang banyak digunakan di luar negeri adalah dengan *hot forging* sehingga memungkinkan diperoleh kenaikan sifat mekanik dan proses produksi yang jauh lebih cepat.

Dalam penelitian ini tahapan proses *hot forging* akan disimulasikan dengan menggunakan material *austenitic stainless steel* 316L sebagai material *femoral stem* dengan standar ASTM F138-13a. Tahapan pembentukan *femoral stem* tersebut menggunakan *finite element methode*. Ada beberapa tahapan yang dilakukan dalam penelitian ini. Cetakan *dies* untuk proses *pre-forging* dan *last-forging* pada *femoral stem* digambar dengan *software* 3D *Solidworks*. Untuk proses simulasi digunakan *software* ANSYS menggunakan *explicit dynamic* meliputi tahap pendefinisian material, *set up*, *meshing* material, dan analisis hasil. Variasi koefisien gesek pada *die* & benda kerja dan besarnya gaya pembebanan pada tahap *last-forging* dilakukan untuk mengetahui

kondisi optimal dalam proses *hot forging* tersebut dengan melakukan analisis tegangan *equivalent*.

Dari penelitian ini didapatkan hasil tegangan terhadap perpindahan *upper die*. Terdapat pola yang berulang dimana Analisis data dilakukan dengan perbandingan grafik perpindahan *upper die* menempa benda kerja terhadap tegangan *equivalent*. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa gaya pembebanan 2.000 kN menghasilkan tegangan *equivalent* lebih kecil dibandingkan dengan gaya 2.500 kN & 3.000 kN pada setiap variasi koefisien gesek. Tegangan yang dihasilkan akan semakin meningkat seiring dengan perpindahan *upper die* saat menempa benda kerja. Pengaruh variasi koefisien gesek dimana mempengaruhi tegangan *equivalent* pada penempaan maksimal.

**Kata Kunci** : *Forging, ANSYS, implan, hip arthroplasty*

## **SIMULATION OF FEMORAL STEM HIP ARTHROPLASTY WITH HOT FORGING PROCESS**

**Nama Mahasiswa** : Muhammad Ghusti Rakha Pratama  
**NRP** : 0211164000206  
**Departemen** : Teknik Mesin FTI-ITS  
**Dosen Pembimbing** : Fahmi Mubarak, ST., MSc., PhD

### **ABSTRAK**

*Osteoarthritis (OA) is a degenerative joint disease that occurs due to chronic inflammatory processes in the joints and bones that surround these joints. Parts of the body that often experience osteoarthritis include the knees, hips, hands and spine. Hip osteoarthritis (hip osteoarthritis) occurs in the hip joint (ball-and-socket joint) with the femoral head. One of the medical efforts made by orthopedic doctors to treat hip osteoarthritis is by replacing the implant material in the hip joint called the hip prosthesis. In general, local implant materials are made by the wax casting method so that the mechanical properties are difficult to improve. Another manufacturing process that is widely used abroad is by hot forging, which allows for a much faster increase in mechanical properties and the production process.*

*In this study, the hot forging process stages will be simulated using the austenitic stainless steel 316L as a femoral stem material with ASTM F138-13a standards. The stages of the formation of the femoral stem use the finite element method. There are several stages in this research. Die molds for the pre-forging and last-forging processes on the femoral stem were drawn using Solidworks 3D software. For the simulation process, ANSYS software uses explicit dynamic including the stages of defining the material, set up, material meshing, and analysis of the results. The variation of the friction coefficient between the mold and the workpiece and the magnitude of the loading force in the last-forging stage were carried out to determine the optimal conditions*

*in the hot forging process by conducting an equivalent stress analysis.*

*From this research, the results of the stress on the upper die displacement are obtained. There is a repeating pattern in which data analysis is performed by comparing the graph of the displacement of the upper die forging the workpiece to the equivalent stress. The results of this study indicate that the 2,000 kN loading force produces a smaller equivalent stress than the 2,500 kN & 3,000 kN force at each variation of the friction coefficient. The resulting stress will increase along with the displacement of the upper die when forging the workpiece. The effect of the variation of the friction coefficient which affects the equivalent stress at the maximum forging.*

**Keyword** : *Forging, ANSYS, implant, hip arthroplasty*

## KATA PENGANTAR

Puji Syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT. yang telah memberikan rahmat dan petunjuk sehingga Tugas Akhir ini dapat terselesaikan dengan baik. Tak lupa sholawat dan salam kepada Nabi Muhammad SAW. Penulis menyadari bahwa dalam penyelesaian Tugas Akhir yang berjudul “Simulasi Pembuatan *Femoral Stem Hip Arthroplasty* dengan Metode *Hot Forging*” ini tidak lepas dari dukungan, bantuan, dan doa berbagai pihak. Untuk itu, pada kesempatan ini penulis mengucapkan banyak terima kasih dan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada :

1. Allah SWT atas karunia, rahmat, dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dengan lancar.
2. Ayahanda Bagus Susetyo, Ibunda Siti Kotijah, Adik Rizqa Rahma Nur Annisa, dan keluarga yang senantiasa memberikan dukungan, moral, kasih sayang, dan doa hingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
3. Bapak Fahmi Mubarak., S.T., M.Sc., Ph.D. selaku dosen pembimbing tugas akhir yang tidak pernah berhenti memberikan ilmu yang bermanfaat, arahan, saran, bimbingan, dan motivasi yang tidak ternilai sehingga penulis mampu menyelesaikan tugas akhir ini. Tanpa bimbingan dan kesabaran bapak, penulis yakin tugas akhir ini tidak akan selesai pada waktu yang tepat
4. Bapak Suwarno., S.T., M.Sc., Ph.D, Putu Suwarta., S.T., M.T., dan Dr. Eng. Sutikno., S.T., M.T., Ph.D. selaku dosen penguji tugas akhir atas semua kritik dan saran bagi penulis sehingga penulisan tugas akhir ini menjadi lebih baik
5. Bapak Ir. Yusuf Kaelani., S.T., M.Sc selaku dosen wali penulis selama menempuh pendidikan di Teknik Mesin FTI-ITS, berkat bantuannya penulis dapat menyelesaikan perkuliahan dengan baik
6. Putri Cinto Buliah M.Eza yang telah membantu dan memberi dukungan kepada penulis. Terima kasih atas

hiburan, motivasi dan doanya selama menempuh tahun terakhir kuliah penulis.

7. Bagus Emran yang telah mendukung dan bersedia memberikan akomodasi dan makanan kepada penulis selama penulisan tugas akhir ini. Semoga sukses di dunia bisnis makanannya.
8. Indjra, Burhan, Zulfan, Kafi, Fatir, Vano, Teofilis, Raka, dan Adib yang telah menjadi teman diskusi saat mengerjakan terutama mempelajari *software*. Semoga sukses terus.
9. Farhan Khairi, Kelvin, Iqbal, Adde, Nuge dan angkatan M59 Teknik Mesin FTI-ITS yang telah menemani dan membantu penulis dari awal tahun kuliah hingga berjuang dalam penulisan tugas akhir ini. Semoga tujuan kalian tercapai dan dipermudah hingga akhir.
10. Mbak Amanda, Mas Rayhan, Wildhan, Pieter, Yoshua, dan seluruh Rakyat Laboratorium Metalurgi telah membantu selama proses pengerjaan tugas akhir, berbagi ilmu&cerita, dan memberikan motivasi kepada penulis sejak Maret 2020. Terima kasih atas dukungannya selama ini.
11. Semua pihak yang membantu secara langsung maupun tidak langsung, pihak yang telah memberikan ilmu dan pengalamannya selama perkuliahan dan telah mendukung dalam penulisan tugas akhir ini.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam penyusunan tugas akhir ini. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari segala pihak. Penulis berharap semoga tugas akhir ini dapat memberikan dampak dan manfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan.

Surabaya, Agustus 2020  
Penulis

## DAFTAR ISI

ABSTRAK .....	iii
ABSTRAK .....	v
KATA PENGANTAR.....	vii
DAFTAR ISI .....	ix
DAFTAR GAMBAR .....	xi
DAFTAR TABEL .....	xiv
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	3
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan Penelitian.....	3
1.5 Manfaat Penelitian .....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....	5
2.1 Biomaterial pada Implan .....	5
2.2 <i>Stainless Steel</i> .....	8
2.2.1 <i>Austenitic Stainless Steel 316L</i> .....	9
2.3 <i>Forging</i> .....	10
2.3.1 <i>Cold Forging</i> .....	11
2.3.2 <i>Warm Forging</i> .....	11
2.3.3 <i>Hot forging</i> .....	12
2.3.4 <i>Closed dan Open Die Forging</i> .....	13
2.4 Perbedaan <i>Casting</i> dan <i>Forging</i> .....	14
2.5 Parameter <i>Forging</i> .....	16
2.6 Metode Elemen Hingga (MEH) atau <i>Finite Element Methode</i> (FEM) .....	17
2.7 Prosedur Umum Metode Elemen Hingga.....	21
2.7.1 Verifikasi Metode Elemen Hingga .....	22
2.7.2 Validasi Metode Elemen Hingga.....	23
2.7.3 Aplikasi Metode Elemen Hingga .....	23
2.8 Teori Plastisitas Bahan .....	25
2.9 Pemodelan Johnson-Cook Strength.....	28
2.10 Pemodelan Johnson Cook Failure .....	29
2.11 Penelitian Terdahulu.....	30
BAB III METODE PENELITIAN .....	38

3.1	<i>Flowchart</i> Penelitian.....	38
3.2	Observasi .....	40
3.3	Pemodelan .....	40
3.3.1	Penentuan Data Awal .....	43
3.3.2	Proses Desain.....	45
3.3.3	Simulasi .....	49
3.3.3.1	Simulasi <i>Pre-Forging</i> .....	49
3.3.3.2	Simulasi <i>Last Forging</i> .....	57
3.3.4	Analisis Hasil.....	61
3.3.5	Rencana Penelitian .....	62
3.3.6	Verifikasi Penelitian .....	63
BAB IV DATA DAN ANALISA .....		64
4.1	Analisis Hasil Kontur Tegangan dan <i>Path</i> .....	64
4.2	Analisis Tegangan terhadap Perpindahan <i>Upper Die</i> dengan variasi gaya pembebanan dan koefisien gesek.....	69
1.2.1	Komparasi Displacement Upper Die .....	74
4.3	Verifikasi Failure pada Hasil <i>Last-Forging Hip</i> <i>Prosthesis</i> .....	75
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....		78
5.1	Kesimpulan.....	78
5.2	Saran.....	78
DAFTAR PUSTAKA.....		80
LAMPIRAN .....		83



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Implan sementara (A) <i>plates</i> , (B) <i>screws</i> , (C) <i>pins</i> , (D) <i>wires</i> , (E) <i>intramedullary nails</i> yang digunakan pada operasi patah tulang (Jin, 2017).....	5
Gambar 2. 2 Pengaplikasian Biomaterial Implan <i>hip</i> (A) dan <i>knee</i> (B) (Jin, 2017) .....	6
Gambar 2. 3 Komponen bagian <i>total hip arthroplasty</i> (Ambrosio, 2017).....	7
Gambar 2. 4 Ilustrasi skematik <i>open die forging</i> (a-c) dan <i>closed die forging</i> (d) (Chandrasekaran, 2010) .....	13
Gambar 2. 5 Klasifikasi metode yang umum digunakan (Hutton, 2004).....	19
Gambar 2. 6 (a) domain dua dimensi umum pada permasalahan nilai batas $\phi(x,y)$ (b) tiga titik elemen hingga yang didefinisikan di dalam domain (c) elemen-elemen tambahan yang menunjukkan sebuah bagian dari <i>mesh</i> elemen hingga pada domain (Hutton, 2004).....	20
Gambar 2. 7 (a) <i>meshing</i> domain batas melengkung yang dimodelkan dengan elemen-elemen kotak yang berjumlah 41 elemen (b) <i>fine meshing</i> domain batas melengkung yang dimodelkan dengan elemen-elemen kotak yang berjumlah 192 elemen. (Hutton, 2004).....	20
Gambar 2. 8 Diagram Alir penggunaan metode elemen hingga dalam kasus penempatan (Roque, 2000) .....	25
Gambar 2. 9 Diagram Tegangan-Regangan Material Ulet (Z. Marcianak, 2002) .....	28
Gambar 2. 10 Distribusi Tegangan (atas) dan temperatur (bawah) pada <i>workpiece</i> (Hojjat, 2015) .....	30
Gambar 2. 11 Grafik Perpindahan <i>Upper Die</i> terhadap tegangan effective (equivalent von-mises) dengan variasi kecepatan dan koefisien gesek .....	31
Gambar 2. 12 Grafik tegangan pada benda kerja terhadap koordinat dari titik pusat (Prof..N.C Mehta, 2013) .....	32
Gambar 2. 13 Vonmises dari benda kerja (Prof..N.C Mehta, 2013).....	32

Gambar 2. 14 Geometri keseluruhan dari proses <i>closed-die</i> (Prof..N.C Mehta, 2013) .....	32
Gambar 2. 15 Simulasi pembuatan material (a) raw material, (b) pengurangan tinggi, (c) deformasi final, (d) flashing (M. Maarefdoust, 2010).....	34
Gambar 2. 16 Grafik perbandingan temperatur terhadap regangan plastis efektif (kiri) dan grafik radius cirner terhadap tegangan efektif (kanan) (M. Maarefdoust, 2010) .....	33
Gambar 2. 17 Dimensi geometri keseluruhan pada proses <i>forming</i> (Prabhakar,A, 2013) .....	35
Gambar 2. 18 Tegangan Vonmises ssaat penempaan (Prabhakar,A, 2013) .....	35
Gambar 3.1 <i>Flowchart</i> Penelitian.....	38
Gambar 3.2 Bagan Metode Penelitian .....	39
Gambar 3.3 <i>Flowchart</i> permodelan .....	42
Gambar 3.4 Halaman kerja baru pada <i>Solidworks</i> .....	45
Gambar 3.5 Sketch <i>femoral stem</i> .....	46
Gambar 3.6 Pemodelan 3D <i>Femoral Stem</i> .....	46
Gambar 3.7 Sketch 3D <i>workpiece</i> .....	47
Gambar 3.8 Pemodelan <i>assembly</i> 3D <i>die</i> dan <i>workpiece</i> pada <i>preforging</i> .....	48
Gambar 3.9 Pemodelan 3D <i>die</i> pada <i>preforging</i> .....	48
Gambar 3.10 Sketch cetakan <i>last-forging femoral stem</i> .....	49
Gambar 3.11 Penentuan <i>engineering data</i> (a) <i>Upper &amp; Lower Dies</i> (b) <i>workpiece</i> .....	50
Gambar 3.12 Desain <i>dies</i> dan <i>workpiece</i> pada proses <i>preforging</i> .....	51
Gambar 3.13 Penentuan jenis kontak .....	52
Gambar 3.14 Grafik uji konvergensi .....	54
Gambar 3.15 <i>Meshing</i> pada simulasi.....	55
Gambar 3.16 Menentukan letak pembebanan .....	55
Gambar 3.17 Penentuan letak tumpuan.....	56
Gambar 3.18 Hasil <i>preforming</i> .....	56
Gambar 3.19 Skema diagram material <i>pre-forging</i> ke <i>last-forging</i> .....	57

Gambar 3.20 Desain <i>dies</i> dan <i>workpiece</i> pada proses <i>preforging</i> .....	58
Gambar 3.21 Penentuan jenis kontak .....	58
Gambar 3.22 <i>Meshing</i> pada simulasi <i>last-forging</i> .....	59
Gambar 3.23 Menentukan letak pembebanan <i>last forging</i> .....	60
Gambar 3.24 Penentuan letak tumpuan <i>last forging</i> .....	60
Gambar 4. 1 Kontur deformasi benda kerja hasil penempaan pada gaya pembebanan sebesar 2.000 kN dan koefisien gesek 0,5 .....	65
Gambar 4. 2 Kontur Tegangan (a) gaya beban 2000 kN koefisien gesek 0,7 (b) gaya beban 2500 kN & koefisien gesek 0,5 .....	66
Gambar 4. 3 tinjauan path terhadap tegangan (a) head stem (b) body stem (c) tail stem .....	67
Gambar 4. 4 Grafik Tegangan equivalent maksimum pada daerah <i>head stem</i> terhadap variasi gaya beban dan koef. gesek .....	68
Gambar 4. 5 Grafik equivalent stress terhadap dengan perpindahan <i>upper die</i> dengan variasi gaya pembebanan pada koefisien gesek 0,5 .....	70
Gambar 4. 6 Grafik equivalent stress terhadap dengan perpindahan <i>upper die</i> dengan variasi gaya pembebanan pada koefisien gesek 0,7 .....	72
Gambar 4. 7 Grafik equivalent stress terhadap dengan perpindahan <i>upper die</i> dengan variasi gaya pembebanan pada koefisien gesek 1 .....	73
Gambar 4. 8 Hubungan antara perpindahan <i>upper die</i> dengan tegangan equivalent (Hojjat Ghahramanzadeh Asl, dkk.2015) ...	74
Gambar 4. 9 Kontur damage pada gaya beban 2000 kN dan koefisien gesek 0,5 .....	76

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1</b> Standar Sifat Mekanik Stainless Steel Implant Quality (ASTM F138-13a) (ASTM, 2013) .....	10
Tabel 2.2 Komposisi Kimia Stainless Steel Implant Quality (ASTM F138-13a) (ASTM, 2013) .....	10
Tabel 2. 3 Hasil tegangan terhadap variasi ketebalan <i>plate</i> (Prabhakar,A, 2013) .....	35
Tabel 2. 4 Hasil tegangan terhadap kedalaman penempaan (deformasi) (Prabhakar,A, 2013).....	36
Tabel 3.1 Properties material <i>stainless steel</i> 316L .....	43
Tabel 3.2 Properties Material <i>Structural Steel</i> .....	44
Tabel 3. 3 Uji Konvergensi <i>workpiece preforging</i> dengan size <i>uniform</i> dan variasi ukuran elemen .....	44
Tabel 3. 4 Uji Konvergensi <i>workpiece preforging</i> dengan size <i>uniform</i> dan variasi ukuran elemen .....	53
Tabel 3. 5 Rencana Penelitian <i>Last-forging</i> .....	62
Tabel 4. 1 Hasil tegangan equivalent maksimal dari tinjauan <i>path</i> .....	68
Tabel 4. 2 Nilai damage dan keterangan dari setiap variasi gaya beban dan koefisien gesek .....	77

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

*Osteoarthritis* (OA) adalah penyakit sendi yang bersifat degeneratif yang terjadi karena proses inflamasi kronis pada sendi dan tulang yang ada disekitar sendi tersebut. Penyakit ini menimbulkan rasa nyeri pada sendi, kekakuan sendi dan krepitasi pada tulang sendi rawan. Nyeri pada sendi akan menyebabkan keterbatasan gerak, penurunan kekuatan & keseimbangan otot, kesulitan dan keterbatasan dalam beraktifitas yang berujung pada penurunan kualitas hidup. Prevalensi penyakit sendi di Indonesia tercatat sebesar 7,3%. Meski sering dikaitkan dengan penambahan usia, atau dikenal sebagai penyakit degeneratif, penyakit sendi telah terjadi pada masyarakat Indonesia di rentang umur 15 – 24 tahun (angka prevalensi sekitar 1,3%), angka prevalensi terus meningkat pada rentang usia 24 – 35 tahun (3,1%) dan rentang usia 35 – 44 tahun (6,3%). (Kemenkes, 2018) Bagian tubuh yang sering mengalami osteoarthritis seperti lutut, panggul, tangan, dan tulang belakang. Osteoarthritis panggul (*hip osteoarthritis*) terjadi pada sendi panggul (sendi *ball-and-socket*) dengan *femoral head* dengan kondisi cekung yang dibentuk oleh acetabulum dan *labrum* dan disokong oleh *femoral stem*. Salah satu perawatan bedah yang dapat menyembuhkan penyakit ini adalah pergantian pinggul total (*hip arthroplasty*). *Hip arthroplasty* adalah salah satu prosedur pembedahan yang menggantikan sendi pinggul dengan hip prosthesis (buatan).

Implan *hip prosthesis* merupakan salah satu teknologi biomaterial yang digunakan untuk mengembalikan fungsi tulang pangkal paha yang patah dan meningkatkan mobilitas pada sendi. (Ambrosio, 2017) Material implan yang umum digunakan adalah biomaterial berbasis logam seperti baja tahan karat (*stainless steel*) dan titanium. Implan *stainless steel* khususnya SS 316L sering digunakan dalam dunia ortopedik dikarenakan memiliki keuntungan seperti lebih ekonomis dibanding titanium dengan memiliki sifat mekanik yang bagus dan mudah difabrikasi.

*Stainless steel 316L* merupakan baja tahan karat austenitik yang memiliki keunggulan pada sifat mekanik, ketahanan terhadap korosi yang baik dan biokompatibilitas yang tinggi dengan tubuh manusia. (Jones, 2017) Standar medis ASTM F138-13a untuk material implan “*Standard Specification for Wrought 18Chromium-14Nickel-2.5Molybdenum Stainless Steel Bar and Wire for Surgical Implant (UNS S31673)*” menyatakan bahwa implan tulang 316L harus memiliki kandungan kromium tinggi 16-18% dan kadar nikel 13-15% untuk meningkatkan daya tahan korosi.

Pembuatan implan terutama dalam *femoral stem* pada *hip prosthesis* pada umumnya dibuat dengan metode pengecoran (*wax casting*) atau penempaan (*forging*). *Forging* adalah proses deformasi dimana benda kerja diletakkan diantara 2 cetakan yang disebut *dies*, penekanan dapat dilakukan dengan tekanan kejut atau perlahan. Material implan yang dibuat secara ditempa memiliki sifat mekanik yang lebih baik dibandingkan dibuat dengan metode *casting*. (Williams, 2017) Oleh karena itu, metode penempaan menjadi opsi metode paling baik agar dapat menggantikan peran fungsi tulang asli.

Simulasi pemodelan *femoral stem* akan dilakukan dengan metode *finite element methode*. Pembuatan *femoral stem* hasil *hot forging* menggunakan material *stainless steel 316L*. Model *femoral stem* yang digunakan sesuai dengan ukuran anatomi orang Indonesia atau ras Mongoloid. Setelah membuat model, material *round bar* akan ditebuk pada proses *preforging* dan akan dibentuk dengan cetakan pada proses *last forging*. Simulasi dilakukan dengan variasi parameter besaran gaya pembebanan pada *punch (upper die)* dan koefisien gesek antar *die* dan benda kerja. Dari variasi tersebut, analisis akan dilakukan berdasarkan tegangan *equivalent*. Hal ini agar mengetahui tegangan luluh yang terjadi hasil penempaan *femoral stem*. Hasil dari simulasi *hot forging hip prosthesis* ini diharapkan dapat memberikan informasi dan menjadi sumber referensi bagi manufaktur implan terutama manufaktur lokal mengenai kekuatan minimum mesin *forging* yang dapat

membentuk hip prosthesis dengan mempertimbangkan jumlah tegangan pada benda kerja.

## 1.2 Perumusan Masalah

Adapun dalam tugas akhir ini terdapat rumusan masalah yaitu:

Bagaimana analisa pengaruh besar gaya penekanan *upper die* dan pengaruh koefisien gesek antara *dies* dan benda kerja pada proses *forging* terhadap *equivalent stress*?

## 1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan pada tugas akhir ini adalah:

1. Material bersifat homogen dan isotrop
2. Dimensi *femoral stem* yang akan dibentuk disesuaikan dengan profil dimensi ras mongoloid (Indonesia)
3. Kecepatan *die* sebelum menyentuh *workpiece* dianggap konstan untuk mempercepat simulasi.
4. Analisis tidak memasukkan pengaruh dari perpindahan panas
5. Kedua *die* dianggap berbentuk *rigid*
6. Distribusi temperatur merata pada benda kerja

## 1.4 Tujuan Penelitian

Dengan mengacu pada perumusan masalah di atas, maka tujuan dari tugas akhir ini adalah:

1. Menganalisa pengaruh besar gaya penekanan *upper die* terhadap *equivalent stress*.
2. Menganalisa pengaruh koefisien gesek antara *dies* dan benda kerja pada proses *forging* terhadap *equivalent stress*.

## 1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari tugas akhir ini adalah:

1. Sebagai bahan referensi tentang analisa *forging* pada material implan *femoral stem* sesuai ukuran anatomi orang Indonesia (ras mongoloid)
2. Sebagai media penelitian dan pengembangan ilmu pengetahuan khususnya pada bidang kesehatan khususnya material implan tulang
3. Meningkatkan kemampuan mahasiswa dalam penggunaan *software*



## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

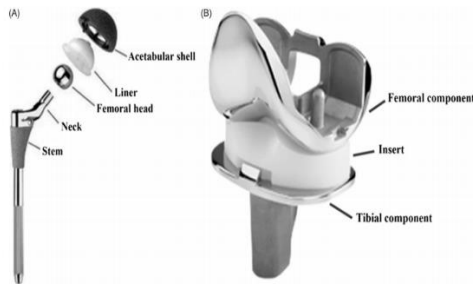
### 2.1 Biomaterial pada Implan

Dalam ilmu material, suatu biomaterial didefinisikan sebagai suatu material yang telah direkayasa untuk menjadi kesatuan atau sebagai bagian dari sistem yang kompleks yang digunakan untuk menggantikan atau menjadi bagian dari suatu organ atau jaringan dengan kontak langsung dengan jaringannya. Disebutkan bahwa awalan kata bio dari biomaterial mengacu pada biokompatibilitas. (Chen, 2015) Biokompatibilitas adalah kemampuan material untuk berinteraksi dengan tubuh tanpa mengeluarkan reaksi yang beracun bagi tubuh manusia. (Cahyanto, 2009) Biokompatibilitas dari material dapat diartikan aman secara interaksi kimia dari material yang ditanamkan, seperti bebas dari korosi paduan dan ion logam yang mengandung zat berbahaya. Selain itu, biokompatibilitas juga melihat dampak fisik selaras dari bahan yang ditanamkan pada jaringan di sekitarnya, seperti sifat mekanik dari material terhadap tulang sekitarnya. Dalam konsep ini, biokompatibilitas dari biomaterial implan logam secara langsung ditentukan oleh ketahanan korosi dan efek biologis dari ion logam yang ditimbulkan. (Chen, 2015) Contoh dari aplikasi biomaterial yang digunakan dalam dunia kesehatan seperti plat penyambung tulang. (Cahyanto, 2009)



**Gambar 2. 1** Implan sementara (A) *plates*, (B) *screws*, (C) *pins*, (D) *wires*, (E) *intramedullary nails* yang digunakan pada operasi patah tulang (Jin, 2017)

Menurut umur penggunaannya, tulang implan dibedakan menjadi implan sementara dan implan permanen. Implan sementara membantu menyembuhkan tulang dengan waktu yang sementara. Contoh dari implan sementara seperti plates, screw pins, wires, dan nails. Implan sementara dapat dilihat pada gambar 2.1. Sedangkan implan permanen diharapkan dapat berperan membantu pergerakan manusia dalam waktu yang lama. Implan permanen dapat terbuat dari baja, keramik, dan polimer. Contoh dari implan permanen adalah jenis-jenis persendian termasuk pada pinggul (hip), lutut, engkel, dan bahu. Secara khusus, prosesis sendi pinggul dan lutut mengalami perkembangan pesat dan sering digunakan pada dunia medis beberapa tahun terakhir. Namun bentuk yang rumit dan aliran beban yang susah dianalisis membuat prostesis sulit untuk dirancang. Pergantian total pada pinggul terdiri dari batang (stem), kepala femoral (femoral head), liner dan acetabular cup. Liner melindungi cup dari kerusakan aus dan cup memberikan perlindungan bagi tulang induk. Contoh aplikasi biomaterial pada implan tulang patah dengan ilustrasi dalam tubuh manusia ditunjukkan pada gambar 2.2. (Jin, 2017)



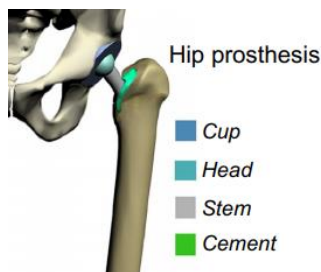
**Gambar 2.2** Pengaplikasian Biomaterial Implan *hip* (A) dan *knee* (B) (Jin, 2017)

Agar material implan aman dan sesuai dengan waktu yang ditentukan, implan logam harus memiliki karakteristik berikut, tetapi tidak terbatas pada:

- (1) Biokompatibilitas yang sangat baik (tidak beracun)
- (2) Ketahanan korosi yang tinggi
- (3) Sifat mekanik yang cocok
- (4) Ketahanan aus yang tinggi (Chen, 2015)

### ***Hip Arthroplasty (femoral stem)***

*Hip arthroplasty* adalah pendekatan operasi yang paling umum untuk mengembalikan biomekanik pinggul yang rusak. Dalam penggantian pinggul total (atau *total hip arthroplasty*), tulang dan tulang rawan yang rusak dipotong dan diganti dengan komponen prostetik implan. Prostesis pada dasarnya terdiri dari komponen *femoral* dalam hubungannya dengan *acetabular cup*. Bagian seperti bentuk leher dan kepala komponen femoralis membentuk batang dan/atau mereka dapat dipisahkan bersama melalui permukaan yang meruncing. Komponen femoral dan asetabular dapat diberi perlakuan *cemented* atau *non-cemented*. *Cemented prosthesis* ditunjukkan ketika jaringan yang bermasalah tidak memenuhi persyaratan umum kesesuaian dan 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. Sesuai gambar 2.3, batang sesuai ke dalam jalur meduler melewati epiphysis tulang paha. Jadi batang terutama menggantikan *cancellous bone*, menempati bagian *darimedullary canal*, dan menggantikan bagian dari jaringan *femoral head*. Bagian *femoral stem* bisa termasuk dalam amterial sintesis dan mengambil peran biomekanikal dalam pergantian tulang paha alami. Pemasangan batang paha ke dalam kanal masih merupakan satu-satunya pendekatan untuk memulihkan sendi manusia lain. Dalam pembuatannya, logam *stainless steel* berkekuatan tinggi, paduan kobalt-krom (CoCr), dan paduan titanium aluminium vanadium (Ti6Al4V) telah digunakan sebagai bahan untuk pembuatan batang paha. Pilihan material logam terutama bergantung pada nilai kekuatan kelelahan logam. (Ambrosio, 2017)

### **2.2 *Stainless Steel***

*Stainless steel* adalah baja paduan yang mengandung kromium dengan persentase berat 11-30% berat. Baja jenis ini banyak digunakan sebagai material implan. *Stainless steel* digunakan pada kondisi yang membutuhkan ketahanan korosi dan panas yang tinggi. *Stainless steel* harus memiliki kandungan Cr minimal 11%. Selain Cr, *stainless steel* juga ditambahkan unsur lain seperti nickel, molybdenum, tembaga, titanium, dan niobium dengan tujuan meningkatkan ketahanan terhadap korosi dan memperbaiki struktur mikro dan sifat mekanik. (Davis, 1994)

Kelebihan baja tahan karat adalah mempunyai nilai keuletan yang sangat tinggi, harga yang lebih terjangkau, dan relatif mudah dibuat dibandingkan dengan paduan lain yang digunakan dalam implan ortopedi. Jenis *stainless steel* juga dapat dikelompokkan menjadi empat jenis berdasarkan karakteristik struktur mikro dari paduan. (Jones, 2017) Di antara itu, *stainless steel* austenitik adalah yang paling banyak digunakan karena ketahanannya yang tinggi

terhadap korosi, sifat mekanik yang sangat baik, kemampuan las yang baik dan biaya perawatan yang rendah. (Davis, 1994)

### **2.2.1 Austenitic Stainless Steel 316L**

Austenitic Stainless steel adalah *stainless steel* dengan kandungan berat kromium sebesar 18-25% dan kandungan nikel sebesar 8-20%. (Chen, 2015) Kandungan nikel pada *austenitic stainless steel* agar fasa *austenite* stabil hingga temperatur ruang. Kandungan kromium memberikan nilai ketahanan korosi *stainless steel*, dimana berfungsi pada kenaikan nilai kestabilan oksida pada permukaan. Hal ini membuat *austenitic stainless steel* memiliki sifat tahan korosi yang baik dan kekuatan yang baik yang diaplikasikan sebagai material *implant*. (Talha, 2013)

Austenitic stainless steel memiliki struktur kristal FCC sehingga dapat diberi perlakuan *rolling* dalam keadaan dingin hingga mencapai reduksi sebesar 90% (Maburi, 2012) Struktur kristal FCC sangat tangguh dan ulet sehingga tidak mengalami kehilangan kekuatan pada temperatur tinggi dibandingkan dengan *ferritic stainless steel* dengan struktur kristal BCC. (Davis, 1994) Selain itu, *austenitic stainless steel* memiliki kemampuan berdeformasi sangat tinggi. *Austenitic stainless steel* juga bersifat tidak magnetik. (Talha, 2013) Untuk meningkatkan nilai kekerasan, *austenitic stainless steel* diberi perlakuan *cold-working*.

*Austenitic stainless steel* banyak digunakan sebagai material implan. Jenis *austenitic stainless steel* yang umum digunakan untuk implan tulang adalah *stainless steel* tipe 316L. *Stainless steel* 316L sebagai salah satu biomaterial untuk implan tulang, dimana material tersebut memiliki kandungan kromium dan nikel yang tinggi dengan kandungan karbon yang lebih rendah. Adanya kandungan molybdenum menambah ketahanan korosi pada *stainless steel* 316L. (Fernandez-Abia, 2013) Kandungan material yang digunakan sesuai dengan “ASTM F138-13a “Standard Specification for Wrought 18Chromium-14Nickel-2.5Molybdenum Stainless Steel Bar and Wire for Surgical Implant (UNS S31673)” yang dijelaskan dalam tabel 2.1 dan 2.2.

**Tabel 2.1** Standar Sifat Mekanik Stainless Steel Implant Quality (ASTM F138-13a) (ASTM, 2013)

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

**Tabel 2.2** Komposisi Kimia Stainless Steel Implant Quality (ASTM F138-13a) (ASTM, 2013)

<i>Element</i>	<i>Composition% (mass/mass)</i>
<b><i>Carbon</i></b>	0.03 max
<b><i>Manganese</i></b>	2 max
<b><i>Phosphorus</i></b>	0.025 max
<b><i>Sulfur</i></b>	0.010 max
<b><i>Silicon</i></b>	0.75 max
<b><i>Chromium</i></b>	17.00 to 19.00
<b><i>Nickel</i></b>	13.00 to 15.00
<b><i>Molybdenum</i></b>	2.25 to 3
<b><i>Nitrogen</i></b>	0.10 max
<b><i>Copper</i></b>	0.50 max
<b><i>Iron</i></b>	<i>Balance</i>

### 2.3 Forging

Proses *forging* adalah proses pembentukan logam atau material paduan dengan penerapan gaya tekan pada benda kerja. Berdasarkan temperatur awal benda kerja, proses forging dikategorikan menjadi tiga, yaitu *Cold forging*, *Warm forging*, dan *Hot forging*.

*Cold forging* dilakukan pada benda kerja dengan temperatur sekitar suhu kamar. Material yang biasa diaplikasikan yaitu karbon

dan baja paduan standar. *Warm forging* pada kisaran diatas suhu kamar hingga dibawah suhu rekristalisasi dari logam yang ditempa, atau sekitar 800 hingga 1800 derajat Fahrenheit. *Warm forging* memiliki kelebihan berupa berkurangnya beban mesin, berkurangnya beban tekan dan peningkatan keuletan baja dibandingkan dengan *cold forging*. Sedangkan *Hot forging* dilakukan pada suhu diatas suhu rekristalisasi logam. Penempaan ini menghasilkan keuletan yang tinggi, karena rekristalisasi menjaga *yield strength* dan kekerasan material tetap rendah. (Battin, 2009)

### **2.3.1 Cold Forging**

*Cold forging* adalah proses dalam industri pembentukan logam dengan mendapatkan produk dalam bentuk akhir dan properti dengan permesinan minimum. *Cold forging* merupakan proses produksi yang membutuhkan sedikit permesinan, waktu produksi kecil, dan produk menghadirkan kekuatan mekanik yang lebih tinggi daripada bagian yang diproduksi oleh proses lain.

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

### **2.3.2 Warm Forging**

*Warm forging* biasanya dilakukan antara temperatur *recovery* dari bahan dan suhu rekristalisasi ( $0,2T_m-0,4T_m$ ). Jenis *forging* ini lebih dilakukan dimana nilai kekuatan dan sifat-sifat lainnya perlu dipertahankan tetapi tidak jauh lebih tinggi dari nilai awal. *Warm forging* memiliki beberapa keuntungan seperti lebih menghemat biaya dibandingkan metode penempaan dingin atau

panas. Dibandingkan dengan *cold forging*, *warm forging* memiliki beberapa kelebihan seperti mengurangi beban pahat, mengurangi beban tekan, meningkatkan keuletan dan mempersingkat kegiatan *annealing* sebelum penempaan. Di sisi lain, temperatur yang digunakan untuk *warm forging* lebih rendah daripada *hot forging*, sehingga menghemat biaya energi serta menghilangkan kebutuhan akan alat khusus yang ada diperlukan dalam *hot forging*. Jenis pengerjaan logam terbatas untuk rentang suhu 0,2-0,4 kali titik leleh ( $T_m$ ) masing-masing sistem material atau paduan. *Warm forging* menghasilkan permukaan akhir yang dapat ditoleransi dengan kebutuhan energi yang sedikit lebih rendah. Selain itu, proses ini juga biasanya tidak memerlukan perlakuan *annealing* pada tahap menengah penempaan. (Chandrasekaran, 2010)

### 2.3.3 Hot forging

*Hot forging* adalah proses penempaan yang paling banyak digunakan dalam proses manufaktur. Dalam proses *hot forging*, penempaan dilakukan pada suhu di atas temperatur rekristalisasi logam yang berarti pada suhu di mana butiran baru terbentuk dalam logam. Tempertur ekstrem ini diperlukan untuk menghindari *strain hardening* pada logam selama deformasi.

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



sehingga mengembang lebih sedikit dari bagian yang lebih panas di bagian tengah. Ini yang disebut efek laras.

Keuntungan dari *hot forging* adalah:

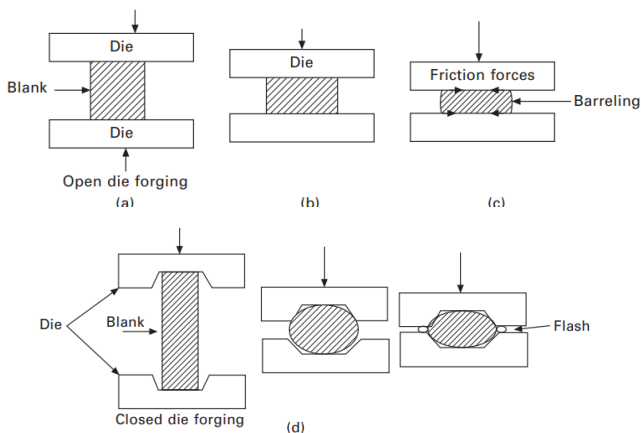
- Laju regangan yang tinggi sehingga logam mudah mengalir;
- Rekrystalisasi dan pemulihan memungkinkan;
- Gaya yang dibutuhkan lebih kecil.

Kerugian dari *hot forging* adalah :

- Pelumasan pada suhu tinggi sulit;
- Oksidasi terjadi pada benda kerja;
- Permukaan akhir yang buruk;
- Toleransi yang kurang tepat
- Kemungkinan pembengkokan material selama proses pendinginan. (Battin, 2009)

### 2.3.4 *Closed dan Open Die Forging*

Pembagian tipe *forging* lainnya berdasarkan pada desain cetakan. Ada dua tipe *forging*, yaitu *open-die forging* dan *closed-die forging*. Pembuatan tulang implan medis biasanya termasuk tipe *closed-die forging*.



**Gambar 2. 4** Ilustrasi skematik *open die forging* (a-c) dan *closed die forging* (d) (Chandrasekaran, 2010)

Dalam *open-die forging*, pada gambar 2.4a, die akan diberi gaya tekan dari punch yang dibiarkan dalam rongga. Jenis penempaan ini terbatas untuk bentuk yang sederhana dan berukuran besar. *Open die forging* banyak digunakan pada industri atau pabrik logam yang besar.

Pada gambar 2.4b, *punch* pada metode *closed-die forging* memberi gaya tekan pada material dan membentuk suatu bentuk sesuai dengan cetaknya. Saat terjadi tekanan ini benda kerja akan mengisi cetakan. Keuntungan penempaan dengan metode *closed die* adalah dapat membuat material hingga bagian-bagian yang sangat detail dibandingkan *open die forging*. Selain itu, *closed die forging* dapat menempa benda dengan bentuk yang rumit. Jenis *forging* ini merupakan metode terbaik yang dimana toleransi yang kecil pun dapat terpenuhi dan bagian yang detail dan bebas dari cacat. Volume material yang digunakan dalam jenis penempaan ini sama dengan volume akhir produk dengan beberapa tambahan nilai toleransi. Kebanyakan biomaterial implan tulang diproduksi dengan menggunakan jenis cetakan ini dan dilanjutkan proses *finishing*. (Chandrasekaran, 2010)

#### **2.4 Perbedaan Casting dan Forging**

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

Saat proses *casting*, ukuran butir bebas semakin besar ketika logam mulai dilelehkan. Setelah dilelehkan, logam cair dituang pada cetakan yang berbentuk seperti barang atau cetakan yang akan diproduksi. Selama proses pengecoran, tidak ada aliran butir dan peningkatan arah kekuatan yang terjadi. Ketika kembali ke padatan, struktur butiran menjadi kasar dan lebih acak sehingga mengurangi kekuatannya. *Casting* adalah metode yang paling

efisien dalam pembuatan produk baja, tetapi produk akhirnya tidak begitu kuat dan tahan lama dibandingkan dengan *forging*. (Battin, 2009)

Penempaan atau *forging* pada baja adalah metode yang paling umum digunakan untuk komponen-komponen penting. *Workpiece* yang berbentuk *billet* baja dipanaskan dan ditempatkan diantara *die* atas dan bawah. *Billet* yang telah dipanaskan diberikan tekanan ekstrim dan dibentuk sesuai profil *die* secara paksa. Aliran butiran bersifat terarah dan telah diorientasikan untuk meningkatkan nilai kekuatan dan/atau ketangguhan (yaitu meningkatkan keuletan baja dan ketahanan terhadap benturan). Selain itu, dikarenakan tidak ada ujung butir yang terekspos, produk *forging* lebih tahan terhadap kelelahan dan tegangan. *Forging* biasanya memiliki porositas permukaan yang lebih sedikit, struktur butiran yang lebih halus, kekuatan tarik yang lebih tinggi, umur atau kekuatan lelah yang lebih baik, dan keuletan yang lebih tinggi daripada *casting*. Keunggulan material yang dibentuk dalam proses *forging* antara lain

- *Forging* menghasilkan struktur butir dan karakteristik aliran yang dapat diprediksi dan seragam yang menyebabkan peningkatan kekuatan.
- *Forging* menghilangkan rongga dalam atau kantong gas yang melemahkan bagian logam, memberikan keseragaman komposisi kimia yang unggul dan meningkatkan kekuatan struktural.
- *Forging* memastikan orientasi aliran butir yang tepat, sehingga memaksimalkan ketahanan terhadap kelelahan dan meningkatkan kekuatan benturan.

Singkatnya, proses penempaan baja menambahkan sekitar 30% peningkatan kekuatan dan/atau ketangguhan dari *billet* aslinya. Bila dibandingkan dengan teknologi pengecoran, maka investasi awal, *running costs*, dan juga biaya *maintenance* peralatan penempaan jauh lebih mahal. Untuk memperoleh dengan harga produk yang lebih ekonomis, maka produksi dengan teknik *forging* harus lebih banyak dalam waktu yang lebih singkat. Tetapi

mengingat keunggulan penempaan baja, ini adalah metode yang sangat hemat biaya untuk produksi volume besar. (Battin, 2009)

Perbandingan satu jenis produk yang dibuat dengan metode casting dan forging memiliki beberapa perbedaan seperti:

- Material yang di-*forging* memiliki nilai kekuatan tarik 26% lebih tinggi daripada material cor. Didapatkan material yang lebih kuat dan ringan.
- Material yang di-*forging* memiliki nilai kekuatan leleh 37% lebih tinggi yang menghasilkan faktor umur keletihan yang lebih lama. Ini berarti bahwa barang akan bertahan lebih lama.
- Besi tuang hanya memiliki 66% kekuatan luluh baja tempa. Kekuatan luluh merupakan indikator dari apa yang akan ditahan oleh barang sebelum mulai berubah bentuk.
- Material yang di-*forging* memiliki pengurangan 58% disuatu area ketika diberi gaya tarik untuk dirusak. Bagian cor hanya memiliki pengurangan 6% disuatu area. Itu berarti akan ada deformasi yang jauh lebih besar sebelum kegagalan untuk barang hasil tempa. (Williams, 2007)

## 2.5 Parameter Forging

Dalam proses *forging*, material akan mengalami deformasi plastis dan gesekan. Kedua deformasi tersebut menimbulkan panas dalam proses *metal forming*. Banyaknya energi mekanikal didalam proses *forging* yang dikonversi menjadi panas hampir 90-95 %. Dalam peralatan forging pada kecepatan tinggi seperti penekan (*press*) mekanis, penekan ulir, dan palu, energi panas yang ditimbulkan dianggap sebagai fenomena yang signifikan. Selama proses penempaan, beberapa bagian dari energi panas yang dihasilkan akan berubah menjadi energi dimana menyebabkan logam mengalami deformasi dan alat-alat yang bersentuhan dengan logam itu. Namun beberapa bagian dari energi panas tetap berada di bagian yang terdeformasi. Kondisi pelumasan, usia pakai alat, struktur mikro dan sifat-sifat material yang di-*forging* dipengaruhi oleh temperatur yang timbul dalam proses penempaan.

Dengan dikembangkannya analisis elemen hingga, sebuah proses analisa menghasilkan energi panas, pengaruh kecepatan tekan, waktu kontak, dan perpindahan panas dalam pembentukan logam dapat disimulasikan secara rasional dalam komputer. Parameter seperti benda kerja (material), koefisien perpindahan panas permukaan *die*, koefisien konveksi termal, emisivitas, harus diketahui untuk memastikan perhitungan perpindahan panas yang akurat.

Dalam pembentukan material logam, proses perpindahan panas terutama tergantung pada:

- a. Suhu benda kerja (material) awal
- b. Suhu *die* awal
- c. Menghasilkan energi panas inelastis
- d. Menghasilkan energi panas karena gesekan pada benda kerja atau permukaan *die*
- e. Kontak konduktansi
- f. Koefisien konveksi termal

Dalam proses pembentukan logam, suhu sesaat rata-rata dalam deformasi

benda kerja,  $T$ , dapat dihitung dengan,

$$T = T_w + T_d + T_f - T_t - T_r - T_c \dots\dots\dots (2.1)$$

dimana,

$T_w$  = suhu awal benda kerja,

$T_d$  = kenaikan suhu karena deformasi inelastis,

$T_f$  = kenaikan suhu karena gesekan,

$T_t$  = penurunan suhu karena konduktansi kontak,

$T_r$  = penurunan suhu akibat radiasi termal,

$T_c$  = penurunan suhu karena konveksi (Altan, 2005)

## 2.6 Metode Elemen Hingga (MEH) atau *Finite Element Methode (FEM)*

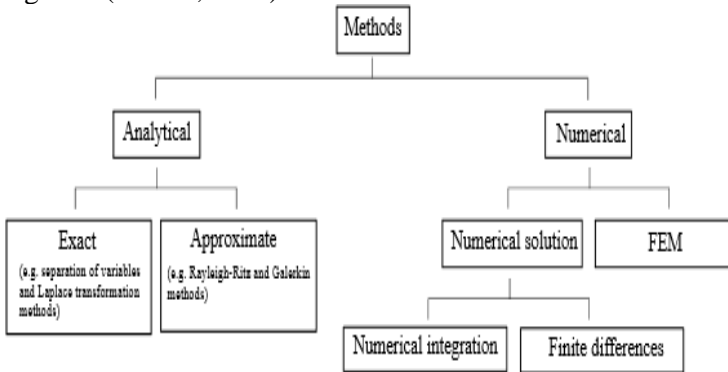
Fenomena kegagalan suatu komponen ditunjukkan dengan gejala atau tanda seperti performansi yang menurun, tidak nyaman saat digunakan, dan lain-lain. Tindakan yang dilakukan untuk mengidentifikasi penyebab kerusakan pada komponen atau alat

dsisebut Analisa kegagalan. Analisa kegagalan dapat meliputi aspek mekanik, termal, fisik, metalurgi, kimia, korosi, proses manufaktur, analisa tegangan termasuk simulasi numerik dengan software finite element method (FEM) atau metode elemen hingga.

Metode elemen hingga adalah sebuah teknik komputasional yang digunakan untuk mendapatkan solusi pendekatan dari permasalahan dengan nilai-nilai batas pada bidang *engineering*. Permasalahan nilai batas secara sederhana didefinisikan sebagai sebuah permasalahan matematis dimana melibatkan satu atau lebih variabel tidak bebas dan memenuhi sebuah persamaan diferensial di dalam sebuah domain variabel bebas yang diketahui dan memenuhi juga kondisi spesifik pada batasan domain tersebut. Finite element method (FEM) pada awalnya hanya dikembangkan untuk memecahkan masalah yang kompleks dalam mekanika struktural, tetapi saat ini digunakan untuk berbagai masalah yang berbeda seperti perpindahan panas, aliran fluida, medan listrik, dan lainnya.

Dalam metode elemen hingga, permasalahan nilai batas ini sangat sering direpresentasikan ke dalam sebuah struktur fisis. Contohnya, terdapat sebuah volume material yang memiliki sifat-sifat fisis tertentu. Volume tersebut merepresentasikan domain dari sebuah permasalahan nilai batas yang akan diselesaikan. Sederhananya, asumsikan sebuah kasus dua dimensi dengan sebuah variabel nilai batas  $\phi(x,y)$  yang akan ditentukan pada setiap titik  $P(x,y)$ , seperti sebuah persamaan-persamaan fisis yang diketahui terpenuhi secara eksak pada tiap-tiap titik. Sehingga kita akan dapatkan solusi matematis pada tiap titik tersebut, yang mana solusi tersebut adalah sebuah persamaan aljabar dari variabel-variabel tetap. Akan tetapi pada kenyataannya, domain tersebut secara geometri mungkin sangat kompleks sekali. Sehingga nilai ketepatan solusi aljabar bentuk tertutup akan sangat rendah. Oleh karena itu, solusi pendekatan berdasarkan teknik numerik dan komputasi digital seringkali dibutuhkan dalam analisis *engineering* pada permasalahan-permasalahan yang kompleks. Dan analisis elemen hingga atau metode elemen hingga adalah teknik yang

sangat tepat untuk mendapatkan solusi aproksimasi dengan akurasi yang baik (Hutton, 2004)

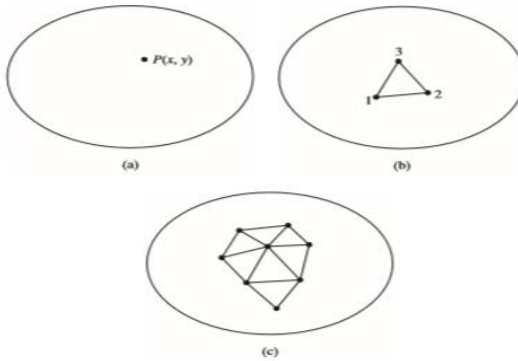


**Gambar 2. 5** Klasifikasi metode yang umum digunakan (Hutton, 2004)

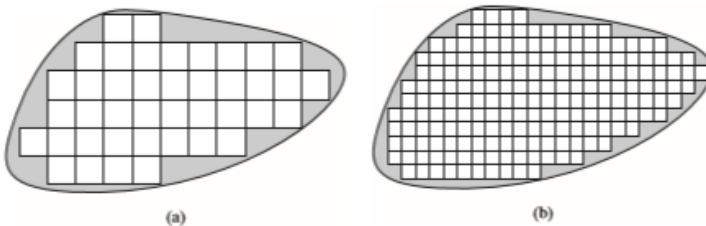
Proses merepresentasikan sebuah domain fisis dengan elemen-elemen hingga dikenal dengan istilah *meshing*. Metode elemen hingga membagi (diskrit) struktur menjadi kecil tetapi terbatas, yang didefinisikan dengan baik, substruktur elastik (elemen). Hasil dari rangkaian elemen-elemen tersebut dikenal dengan istilah *mesh* elemen hingga, gambar 2.6 dan 2.7.

Pada umumnya, elemen-elemen yang digunakan dalam *meshing* adalah bentuk garis lurus, sehingga sangat tidak mungkin untuk memenuhi seluruh domain fisis di dalam *mesh* elemen jika domain memiliki batasan-batasan yang melengkung seperti pada gambar 2.7a dimana sebuah domain dengan batas berbentuk melengkung dilakukan *meshing* menggunakan elemen-elemen kotak. *Meshing* yang lebih halus untuk domain yang sama ditunjukkan oleh gambar 2.7b dengan elemen yang bentuknya sama namun lebih kecil dan lebih banyak. Semakin halus proses *meshing* atau semakin banyak jumlah bentuk elemen, akurasi pendekatan semakin baik. Apabila hasil fungsi interpolasi sudah memenuhi permintaan matematis yang pasti, sebuah solusi elemen

hingga terhadap kasus tersebut sudah dikatakan konvergen (mendekati) terhadap solusi eksak kasus tersebut.



**Gambar 2. 6** (a) domain dua dimensi umum pada permasalahan nilai batas  $\phi(x,y)$  (b) tiga titik elemen hingga yang didefinisikan di dalam domain (c) elemen-elemen tambahan yang menunjukkan sebuah bagian dari *mesh* elemen hingga pada domain (Hutton, 2004)



**Gambar 2. 7** (a) *meshing* domain batas melengkung yang dimodelkan dengan elemen-elemen kotak yang berjumlah 41 elemen (b) *fine meshing* domain batas melengkung yang dimodelkan dengan elemen-elemen kotak yang berjumlah 192 elemen. (Hutton, 2004)



Setelah hal itu dilakukan, hal ini menjadi masalah sederhana untuk menggunakan perpindahan dalam menentukan regangan dan tegangan di dalam persamaan konstitutif melalui elastisitas. Nilai input penting bagi model finite element, yang menentukan akurasi model, yang meliputi sifat material dari bagian yang berbeda dalam struktur, kondisi batas, beban eksternal pada struktur, seberapa akurat mesh, dan apa jenis elemen yang digunakan. Ada banyak cara untuk mendefinisikan elemen tergantung pada geometri dan pembebanan struktur, mulai dari unsur-unsur garis sederhana satu dimensi, dengan unsur-unsur solid tiga dimensi. Jenis elemen yang cocok untuk masalah 3-dimensi asli adalah unsur padat tiga dimensi. Berbagai jenis elemen padat antara lain *wedge*, *brick*, dan elemen *tetrahedral*. Elemen tetrahedral memiliki kemampuan beradaptasi geometris yang baik dan cocok untuk mesh otomatis, sementara elemen *wedge* dan *brick* lebih sesuai mesh manual. (Logan, 2012)

Struktural meliputi analisa tegangan, getaran, dan beban tekuk atau *buckling*. Sedangkan permasalahan non-struktural di antaranya perpindahan panas, aliran cairan, dan distribusi listrik maupun potensi magnetik. Penggunaan metode elemen hingga dapat memudahkan operator untuk mendeteksi dan mengevaluasi tegangan, getaran, maupun suhu temperatur hasil desain sebelum *prototype* dibuat. Sehingga, tingkat cacat *prototype* tersebut menurun. Selain itu, metode ini mempunyai beberapa manfaat lain di antaranya:

- a. Dapat memodelkan geometri yang tidak beraturan dengan mudah.
  - b. Dapat menganalisa pengaruh dinamis.
  - c. Dapat menangani kondisi batas yang banyak dan beragam.
- (Logan, 2012)

## **2.7 Prosedur Umum Metode Elemen Hingga**

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

- a. Tahap dari *pre-processing* antara lain:

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

### 2.7.1 Verifikasi Metode Elemen Hingga

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

### **2.7.2 Validasi Metode Elemen Hingga**

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

### **2.7.3 Aplikasi Metode Elemen Hingga**

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

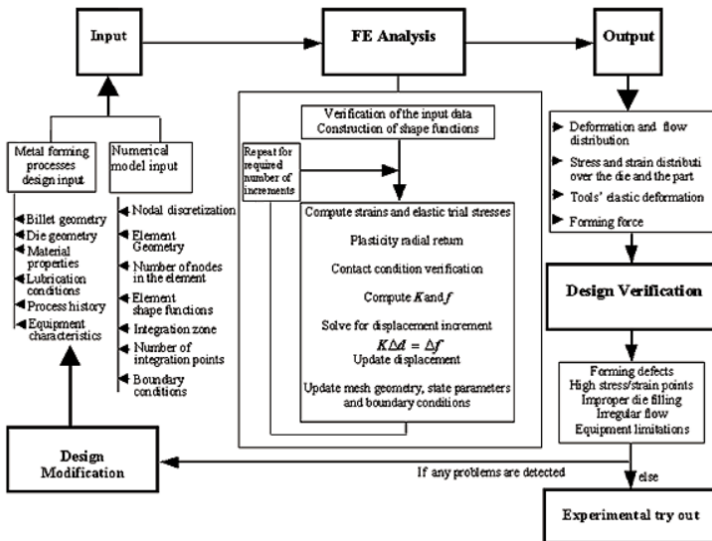
Simulasi komputer telah menjadi salah satu solusi yang dapat diterima dalam industri pembentukan logam sejak 1980-an. Analisis pembuatan logam dapat dilakukan dalam tiga skala pemodelan (Koop et al., n.d.). Skala pertama adalah pemodelan global dengan menggunakan metode analitik, yang hanya memprediksi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

Dengan pengembangan besar dalam bidang mekanika komputasi, metode numerik telah digunakan sebagai alternatif efektivitas dalam biaya untuk melakukan pemodelan lokal. Pemodelan skala mikro menghitung pembaharuan atau progres mikro-struktural selama proses pembentukan. Karena analisis skala global hanya berlaku untuk situasi sederhana dan pemodelan mikro masih baru dan hanya memberikan hasil untuk kondisi

tertentu, pemodelan lokal adalah pendekatan yang paling populer. Di antara metode lain, metode elemen hingga (MEH) banyak digunakan dalam analisis pembentukan logam karena kemampuannya untuk membuat model geometri alat dan bagian yang rumit dalam proses pembentukan.

Gambar 2.8 menunjukkan bagaimana analisis elemen hingga (MEH) dapat digunakan dalam desain pembuatan logam. Metode ini dapat memberikan informasi terperinci untuk membentuk desainer seperti membentuk kekuatan, prediksi cacat, pola aliran, dan konsentrasi tegangan pada cetakan (*die*). *Output* regangan, misalnya, dapat menampilkan luas konsentrasi regangan untuk mengidentifikasi kemungkinan kegagalan awal pada alat atau untuk memprediksi masalah kemampuan bentuk. Oleh karena itu, desain manufaktur bagian dapat dimodifikasi untuk meningkatkan masa pakai alat atau untuk meningkatkan kondisi kemampuan bentuk dan desain baru dapat diperiksa dengan simulasi elemen hingga berulang sebelum pengujian kondisi nyata (eksperimental).

Banyak aspek manufaktur yang dapat dianalisis dari solusi simulasi. Misalnya, aliran (*flow*) tidak teratur, yang dapat menyebabkan cacat internal produk, dapat dideteksi dari simulasi. Masalah pengisian cetakan juga dapat diprediksi oleh pola deformasi dan solusi tegangan dan/atau regangan. Deformasi elastis dari alat, yang harus dikendalikan untuk mempertahankan toleransi yang diinginkan, dapat diverifikasi dalam prediksi analisis elemen hingga. Konvergensi solusi dari metode ini diperiksa dengan mengurangi langkah waktu, dan dengan meningkatkan jumlah node dari model analisis. (Roque, 2000)



**Gambar 2. 8** Diagram Alir penggunaan metode elemen hingga dalam kasus penempaan (Roque, 2000)

## 2.8 Teori Plastisitas Bahan

Dalam pemilihan material, ada aspek-aspek yang harus diperhatikan seperti bentuk *bar* adalah sifat-sifat material antara lain : kekuatan (*strength*), keuletan (*ductility*), pemanjangan (*elongation*), massa jenis (*density*) dan kekuatan luluh (*yield strength*).

Kemampuan bahan untuk menahan gaya atau tegangan luar yang diukur secara kuantitatif adalah sifat mekanik material. Saat menahan beban struktur molekul dalam kondisi keseimbangan, gaya luar terjadi ketika adanya gaya tarik dan tekan yang diwujudkan dalam uji penarikan, penekanan, pemotongan, penempaan, pengerolan, dan pembengkokan yang akan mengakibatkan material mengalami tegangan dan berubah bentuk & ukuran (deformasi). Peningkatan beban yang melewati nilai

kekuatan luluh (*yield strength*) yang dimiliki material akan mengakibatkan aliran deformasi material dimana tidak akan kembali ke bentuk semula atau mengalami deformasi permanen dinamakan plastisitas bahan. Langkah pertama dari analisis aliran plastis adalah menentukan kriteria luluh (*yield criteria*). Peningkatan pembebanan yang melebihi kekuatan luluh (*Yield Strength*) yang dimiliki pelat mengakibatkan aliran deformasi permanen disebut plastisitas. (Mondelson, 1983). Karakteristik setiap dari material mayoritas dipengaruhi oleh temperatur. Diagram tegangan-regangan diperoleh pada suhu tertentu berdasarkan eksperimen. Temperatur tinggi mengurangi kekakuan dan kekuatan material, sedangkan temperatur rendah meningkatkan kekakuan dan kekuatan material. Karakteristik material pada suhu kamar terutama baja tahan akarat berbeda dari baja karbon karena kandungan paduannya yang tinggi. Pada suhu kamar, baja tahan karat menampilkan respons tegangan-regangan yang lebih baik daripada baja karbon dari segi titik luluh yang ditentukan, bersama dengan rasio tegangan luluh-terhadap-luluh yang lebih tinggi. Pada suhu tinggi, baja tahan karat umumnya menunjukkan hambatan yang lebih baik kekuatan dan keuletan dibandingkan dengan baja karbon. (Gardner, 2010)

Dalam proses pembentukan ada variabel yang menunjukkan seberapa besar gaya untuk merubah bentuk material yaitu :

#### a. Tegangan

Tegangan adalah besaran pengukuran intensitas gaya (F) atau reaksi dalam yang timbul per satuan luas(A). Apabila terjadi tegangan secara merata pada luasan (A) dan tegangan ( $\sigma$ ) bernilai konstan, maka persamaan yang digunakan adalah (Singer, 1995)

$$\sigma = F_n/A \dots\dots\dots (2.2)$$

Tegangan geser adalah tegangan tangensial atau yang bekerja sejajar dengan permukaan bidang. Nilai tegangan geser adalah

$$\tau = F_t/A \dots\dots\dots (2.3)$$

Tegangan normal dianggap positif jika menimbulkan suatu tarikan (*tensile*) dan dianggap negatif jika menimbulkan penekanan (*Compression*).

### b. Regangan

Regangan adalah perubahan ukuran material dari panjang awal sebagai hasil dari gaya yang menarik atau menekan pada material. Apabila suatu spesimen struktur material diikat pada jepitan mesin pengujian dan beban serta pertambahan panjang spesimen diamati secara bersamaan, maka dapat digambarkan pengamatan pada grafik dimana ordinat menyatakan beban dan absis menyatakan pertambahan panjang. Batasan sifat elastis perbandingan tegangan regangan akan linear dan akan berakhir sampai pada titik mulur. Hubungan tegangan regangan tidak lagi linear pada saat material mencapai batas fase sifat plastis. Untuk memperoleh satuan deformasi atau regangan ( $\epsilon$ ) yaitu dengan membagi perpanjangan ( $l-l_0$ ) dengan panjang material mula-mula ( $l_0$ ). Hal ini dapat dinyatakan dalam sesuai dengan persamaan (Singer, 1995)

$$\epsilon = (l - l_0) / l_0 \dots\dots\dots (2.4)$$

Perubahan laju regangan terhadap waktu disebut *strain rate*. *Strain rate* merupakan laju deformasi benda ketika mendapatkan beban sesuai dengan kecepatan yang diterima. Efek dari *strain rate* pada *flow stress* adalah semakin tinggi *strain rate*, makin besar *flow stress*. *Strain rate* dapat dirumuskan sebagai:

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} \dots\dots\dots (2.5)$$

### c. Hubungan Tegangan-Regangan

Dalam mekanika teknik, analisis struktur membahas pengaruh gaya luar terhadap sebuah sistem kerja dengan adanya gaya reaksi atau gaya-gaya dalam beserta deformasi. Gaya-gaya tersebut berfungsi meneruskan gaya-gaya luar yang bekerja. Memanfaatkan sifat plastisitas dari material saat material diberi gaya luar merupakan hal yang penting dari proses pembentukan. Pada awal pembebanan dimana gaya terus meningkat pelat akan

mengalami sifat elastis dan kemudian tahap plastis. Dengan memanfaatkan tahap plastis tersebut maka proses pembentukan material akan tercapai, dimana bentuk pelat akan sesuai dengan bentuk cetakan yang diinginkan. (Battin, 2009)

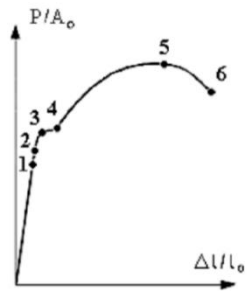
Perubahan regangan plastis bergantung pada riwayat pembebanan seperti temperature, tegangan, laju regangan, serta variabel internal seperti kekuatan luluh, tegangan, dan kerusakan. Kurva pada gambar 2.9 untuk material material ulet dalam sistem tegangan nominal-regangan. Titik kurva mengindikasikan karakteristik 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 :

$$\sigma = K \epsilon^n \dots\dots\dots (2.6)$$

Dimana: K = *strength koefisient*

n = *hardening eksponen* (Z.Marcianak, 2002)



**Gambar 2. 9** Diagram Tegangan-Regangan Material Ulet (Z. Marcianak, 2002)

**2.9 Pemodelan Johnson-Cook Strength**

Permodelan *Johnson-Cook strength* digunakan untuk merepresentasikan respon dari material saat menerima regangan, laju regangan, dan temperatur yang tinggi. Respon tersebut akan muncul pada peristiwa pembebanan *compressive* akibat gaya beban dengan jumlah besar. Dengan permodelan ini, *yield stress*



bergantung pada regangan, laju regangan, dan temperatur. Pemodelan ini termasuk pemodelan material yang bersifat non-linear dimana dibutuhkan pada proses deformasi pada *forming*. Permodelan *Johnson-Cook strength* dapat ditulis sebagai rumus berikut:

$$Y = \left[ A + B \varepsilon_p^n \right] \left[ 1 + C \ln \varepsilon_p^* \right] \left[ 1 - T_H^m \right] \dots (2.7)$$

dimana: Y = Yield stress  
 A = Initial yield stress  
 B = Hardening constant  
 $\varepsilon$  = Effective plastic strain  
 n = Hardening exponent  
 C = Strain rate constant  
 $\varepsilon^*$  = Normalized effective plastic strain  
 $T_H$  = Homologous Temperature

## 2.10 Pemodelan Johnson Cook Failure

Pemodelan Johnson-Cook Failure adalah jenis penentu kegagalan pada material ulet yang mengalami tekanan tinggi, *strain rate*, dan temperatur. Pemodelan ini didefinisikan dengan pengaruh yang sama seperti *Johnson Cook Strength* dimana kegagalan *dynamic fracture* ditentukan dengan pengaruh tekanan, *strain rate*, dan temperatur. Berikut persamaan 2.8 *effective fracture strain* pada pemodelan Johnson Cook Failure.

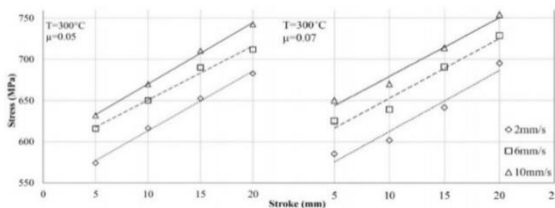
$$\varepsilon^f = \left[ \underbrace{D_1 + D_2 e^{D_3 \sigma^*}}_{\text{Pressure dependence}} \right] \left[ \underbrace{1 + D_4 \ln |\dot{\varepsilon}^*|}_{\text{Strain rate dependence}} \right] \left[ \underbrace{1 + D_5 T^*}_{\text{Temperature dependence}} \right] \quad (2.8)$$

Perbandingan antara perubahan *effective plastic strain* dengan *effective fracture strain* akan dijumlahkan dan disimpan

dalam *output solver* “Damage”. Material diasumsikan utuh tidak mengalami kegagalan jika angka “damage” bernilai satu dari skala nol hingga satu. Pada skala satu, elemen pada material mengalami kegagalan.

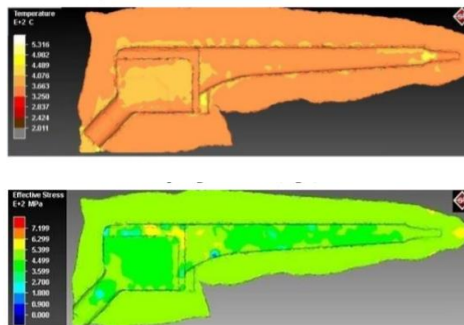
### 2.11 Penelitian Terdahulu

Penelitian tentang analisa pembuatan *hip prosthesis* dengan cara *hot forging* telah dilakukan oleh Hojjat Ghahramanzadeh Asl, Sinan Sezek, dan Akgün Alsaran pada tahun 2015. Penelitian ini disimulasikan dengan *finite element methode* dengan menggunakan *software* MSC SIMUFACT 10. Material paduan titanium (Ti6Al4V) digunakan sebagai *workpiece* dalam membuat *hip prostheses*. Simulasi ini menggunakan analisis dengan faktor kecepatan *upper die (punch)*, temperatur awal spesimen, dan koefisien gesek. *Workpiece* ini diproduksi dengan tahapan *preforming* dan *last forming*. Tahap *preforming* dilakukan dengan kecepatan *punch* sebesar 2 mm/s, temperatur sebesar 300°C, dan koefisien gesek sebesar 0,05. Tahap *preforming* hanya membentuk *workpiece* agar bisa diproses dengan bentuk yang lebih baik dengan kecacatan material dianggap tidak berubah. Pada tahap *last forming*, material ditempa dengan variasi kecepatan *punch* sebesar 2, 6, & 10 mm/s, temperatur sebesar 300°C & 500°C, dan koefisien gesek sebesar 0,05 & 0,07. Pada penelitian tersebut, tegangan meningkat seiring dengan bertambahnya kecepatan *punch die* dan *friction coefficient*. Pada temperatur 300°C, tegangan terbesar bernilai 750 MPa dengan kecepatan *upper die* 10mm/s dan *friction coefficient* sebesar 0.07.



**Gambar 2. 10** Distribusi Tegangan (atas) dan temperatur (bawah) pada *workpiece* (Hojjat, 2015)

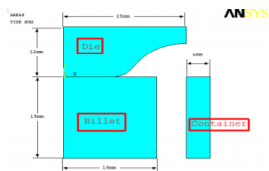
Pada hasil akhir, parameter yang paling sesuai adalah material ditempa dengan temperatur 500°C, koefisien gesek sebesar 0,05, dan kecepatan *punch* sebesar 2mm/s. Penelitian tersebut menyatakan bahwa nilai tegangan paling tinggi berada pada ujung *hip prosthesis* yang dikarenakan tegangan konsentrasi pada daerah tersebut tinggi. Selain itu, ditunjukkan bahwa tegangan meningkat selama proses penempaan dan ditunjukkan bergerak ke arah cetakan. Perubahan temperatur pada ujung dan bagian tepi pada material *hip prosthesis*. Selain itu temperatur meningkat seiring dengan meningkatnya kecepatan *punch* (*upper die*), *friction coefficient* dan *stroke*. (Hojjat, 2015) Dengan itu, penelitian yang penulis lakukan adalah membuat *hip prosthesis* dengan menggunakan material berbeda yaitu stainless steel 316L dengan temperatur konstan. Simulasi juga dilakukan dengan menggunakan *software* berbeda ANSYS. Selain itu, variabel koefisien gesek akan digunakan pada proses *last-forging* dan menggunakan gaya pembebanan.



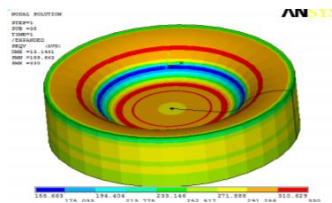
**Gambar 2. 11** Grafik Perpindahan *Upper Die* terhadap tegangan effective (equivalent von-mises) dengan variasi kecepatan dan koefisien gesek

Penelitian berjudul “Metal Forming Analysis” dilakukan oleh Prof. N. C. Mehta, Viral V. Shiyani, dan Jemish R. Nasit pada

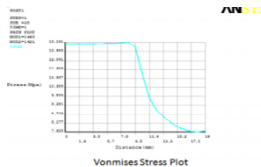
tahun 2013. Penelitian ini dilakukan dengan cara pendekatan simulasi forming. Penelitian ini menggunakan metode finite element dengan software ANSYS. Simulasi ini menggunakan die, billet, dan container. Material billet menggunakan material aluminium AlMgSi dengan 10% partikel SiC. Die akan menekan billet hingga pada permukaan billet menyentuh container. Kontak antara permukaan die & billet dan billet & container menggunakan friction coefficient sebesar 0,1. Pada kesimpulan, hasil maximum tegangan vonmises pada billet adalah 330 MPa. (Prof..N.C Mehta, 2013). *Software* ANSYS digunakan dalam penelitian ini dan akan digunakan pada penelitian penulis. Namun, geometri cetakan dan benda kerja dan jenis material yang digunakan berbeda dengan penelitian ini.



**Gambar 2. 13** Grafik tegangan pada benda kerja terhadap koordinat dari titik pusat (Prof..N.C Mehta, 2013)

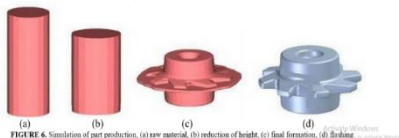


**Gambar 2. 12** Vonmises dari benda kerja (Prof..N.C Mehta, 2013)

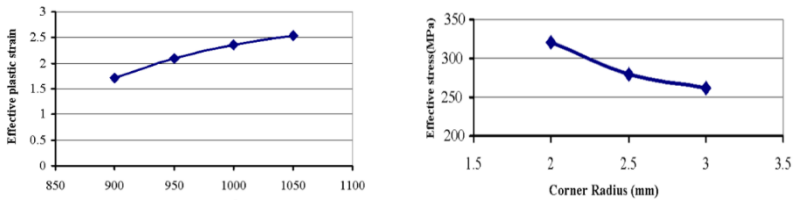


**Gambar 2. 14** Geometri keseluruhan dari proses *closed-die* (Prof..N.C Mehta, 2013)

Penelitian selanjutnya mengenai analisa Simulasi 3D proses *closed die forging* pembuatan *locking gear* skala industri. Parameter yang mempengaruhi seperti temperatur, geometri cetakan dan geometri billet *preforming*. Pada penelitian ini simulasi mempengaruhi temperatur billet pada regangan plastis efektif, radius dari ujung cetakan pada tegangan dalam billet dan ketebalan *flash* dengan gaya yang dibutuhkan. Pemodelan tiga dimensi dari material awal dan cetakan dibuat dengan Solid Edge dan simulasi & analisis *forging* menggunakan Super Forge. Proses ini membutuhkan dua proses, yaitu *preforming* dengan mengurangi tinggi dari benda kerja dan *final forging*. Variasi tinggi *billet* adalah 75 mm dan 45 mm. Pada preform, temperatur benda kerja adalah 900, 950, 1000, 1050°C. Kesimpulannya temperatur yang digunakan adalah 1050°C karena memiliki regangan plastis efektif yang paling tinggi dibandingkan temperatur lain. Grafik ditunjukkan pada gambar 2.15. Dalam pemilihan radius (2, 2.5, dan 3 mm). Kesimpulannya radius dengan panjang 3 digunakan karena memiliki tegangan von mises terkecil. Gambar 2.15 menunjukkan grafik perbandingan radius ujung dengan tegangan efektif. Selain itu, ketebalan flash memiliki variasi dengan panjang 1.8, 2, 2.5, dan 3 mm. Kesimpulannya gaya tekan menaik seiring dengan pembentukan *flash*. Semakin kecil ketebalan flash terhadap tekanan maka akan merusak meningkatkan potensi kerusakan cetakan. Selain itu, semakin besar ketebalan flash akan menyebabkan sisa material semakin banyak dan meningkatkan biaya produksi. Dengan mempertimbangkan jumlah produksi benda kerja, ketebalan flash yang digunakan adalah 3 mm. Gambar 2.16 menunjukkan grafik perbandingan gaya tekan dan ketebalan *flash*. (M. Maarefdoust 2010)

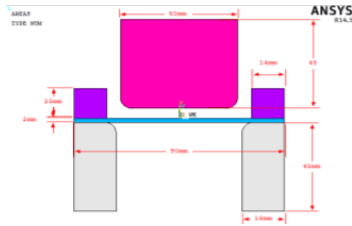


**Gambar 2. 15** Simulasi pembuatan material (a) raw material, (b) pengurangan tinggi, (c) deformasi final, (d) flashing

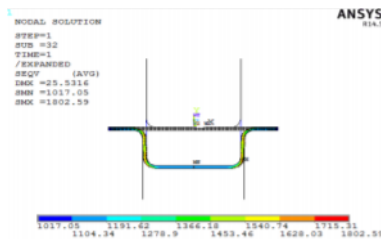


**Gambar 2.16** Grafik perbandingan temperatur terhadap regangan plastis efektif (kiri) dan grafik radius cirner terhadap tegangan efektif (kanan) (M. Maarefdoust, 2010)

Penelitian selanjutnya dilakukan oleh Prabhakar.A, Dr. Mohamed Haneef, dan Shabbir Ahmed R.M pada tahun 2013 dengan judul *Sheet metal forming analyses with spring-back deformation on U-Bends in Isotropic plates*. Penelitian ini menggunakan *die* dan *workpiece* berupa *sheet metal* dengan variasi ketebalan sebesar 2-3,5 mm. Spesifikasi material *sheet metal* dengan young's modulus bernilai 200 Gpa, *density* bernilai 7800 kg/m<sup>3</sup>, *yield stress* bernilai 250 Mpa, dan *plastic modulus* bernilai 3000 MPa. Jumlah meshing yang digunakan pada material berjumlah 1580 element dan 1693 nodes. Penelitian ini menghitung tegangan *equivalent* (von-mises), tegangan *residual*, *contact pressure*, dan regangan plastis *equivalent* dengan variasi ketebalan dan kedalaman deformasi *sheet metal* akibat ditempa oleh *die*. Pada kesimpulan, semakin tebalnya *plate* maka tegangan vonmises, *contact pressure*, *residual stress*, dan regangan plastis meningkat. Selain itu semakin tinggi kedalaman deformasi pada *sheet metal* atau dengan kata lain perpindahan *die* menempa benda kerja semakin tinggi, maka tegangan *von-mises*, tegangan *residual*, dan *contact pressure* semakin meningkat. (Prabhakar,A, 2013) Dari penelitian ini, analisis pengaruh perpindahan *upper die* terhadap tegangan akan dilakukan dengan *output* hasil benda yang berbeda dari penelitian ini.



**Gambar 2. 18** Dimensi geometri keseluruhan pada proses *forming* (Prabhakar,A, 2013)



**Gambar 2. 17** Tegangan Vonmises ssaat penempaan (Prabhakar,A, 2013)

**Tabel 2. 3** Hasil tegangan terhadap variasi ketebalan *plate* (Prabhakar, A, 2013)

Thickness of Plate	Spring Back(mm)	Percentage of Spring Back	Vonmises Stress (Mpa)	Contact Pressure (Mpa)	Residual Stress (Mpa)	Plastic Strain
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

**Tabel 2. 4** Hasil tegangan terhadap kedalaman penempaan (deformasi) (Prabhakar,A, 2013)

<b>Depth of Deformation(mm)</b>	<b>Vonmises Stress (Mpa)</b>	<b>Contact Pressure (Mpa)</b>	<b>Residual Stress (Mpa)</b>	<b>Plastic Strain</b>
20	1501	540	481	0,4177
25	1802	614	524	0,5163
30	2090	660	517	0,614
35	2360	697	573	0,6919

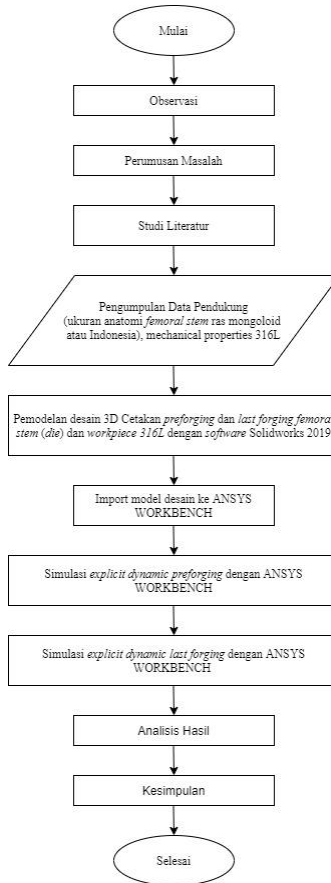


*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

## BAB III METODE PENELITIAN

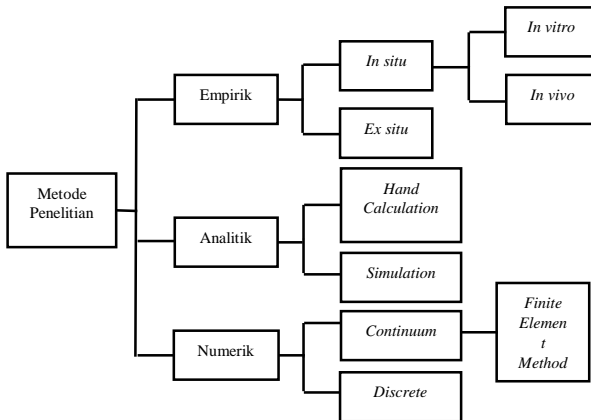
### 3.1 *Flowchart* Penelitian

Langkah-langkah yang akan dilakukan dalam penelitian ini secara singkat dapat digambarkan melalui diagram alir penelitian. Berikut adalah skema diagram alir penelitian



**Gambar 3.1** *Flowchart* Penelitian

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



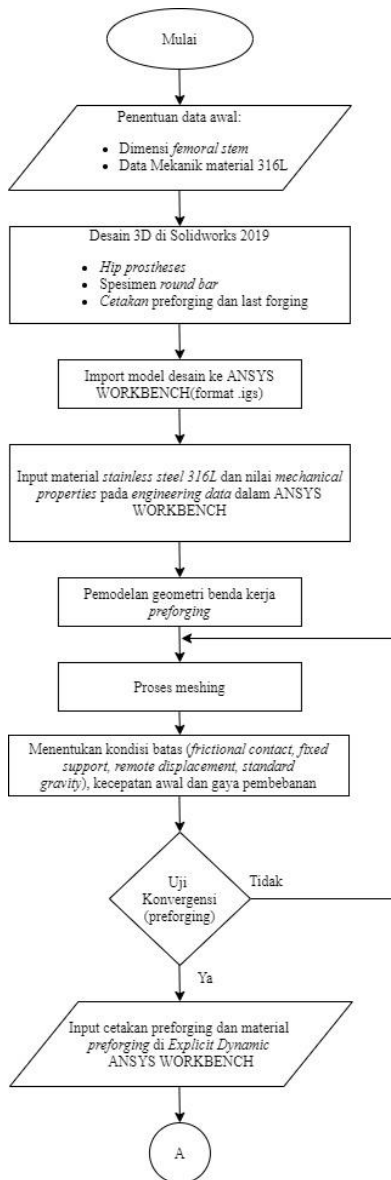
**Gambar 3.2** Bagan Metode Penelitian

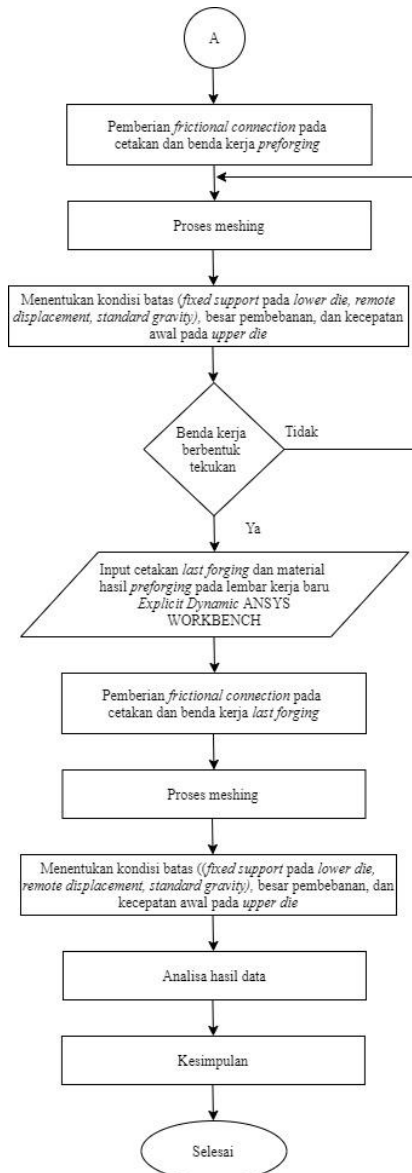
### 3.2 Observasi

Observasi merupakan langkah awal yang dilakukan dalam penelitian ini untuk menentukan ruang lingkup dan batasan permasalahan yang akan dijadikan dalam penelitian. Dalam hal ini, observasi dilakukan dalam lingkup pembuatan *femoral stem* dengan proses *forging*.

### 3.3 Pemodelan

Pemodelan dilakukan dengan tujuan membuat objek penelitian dilengkapi dengan dimensi dan spesifikasi tersebut. Sebelum melakukan pemodelan, perlu mencari data-data pendukung seperti dimensi *femoral stem* pada ras Mongoloid (Indonesia) dan material yang memiliki biokompatibilitas & sifat mekanik yang baik. Setelah itu data-data tersebut disesuaikan dan digunakan sebagai input dalam simulasi. Tahap selanjutnya adalah membuat model dimensi *femoral stem* yang sudah ditentukan dengan program CAD (*computer-aided design*) dimana *software* yang digunakan adalah 3D *Solidworks*. Dari model *hip prothesis* dapat dibuat cetakan *preforging* dan *last forging* yang disebut dengan *dies*. Berikut adalah diagram alir yang menggambarkan tahapan-tahapan yang dilakukan peneliti mulai dari pemodelan 3D hingga simulasi.





**Gambar 3.3** Flowchart permodelan

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

### 3.3.1 Penentuan Data Awal

Data awal berupa dimensi *femoral stem* yang ingin dibentuk, data material spesimen, kecepatan dan beban penekanan. Dimensi *femoral stem* dapat dilihat pada gambar 3.6. Material *stainless steel 316L* digunakan sebagai *wokrpiece* dengan nilai sifat mekanik temperatur 1000°C pada tabel 3.1. Tabel 3.2 menjelaskan data material *structural steel* untuk cetakan. Nilai densitas, *specific heat*, dan *johnson and cook* parameters pada *stainless steel 316L* mengacu pada sumber Umbrello(2009). *Temperatur reference* material pada *Johnson and Cook strength* diatur pada 1000°C pada *environment temperature* pada Explicit Dynamic. *Temperature reference* berlaku untuk material dengan asumsi *flexible body*. Johnson and Cook Damage mengacu pada sumber Ahmed (2019).

**Density :**

$$\begin{aligned}\rho_w(T) &= 7921 - 0,614.T + 0.0002.T^2 \\ &= 7921 - 0,614 \cdot (1000) + \\ &0.0002.(1000)^2 \\ &= 7507 \text{ Kg/m}^3 \text{ (Umbrello, 2007)}\end{aligned}$$

**Tabel 3.1** Properties material *stainless steel 316L*

ISTILAH		SATUAN	NILAI
<i>Density</i>		Kg/m <sup>3</sup>	7507
Specific heat		J/(kg K)	721.49
Shear Modulus		MPa	5185
Johnson and Cook constitutive equation parameters	Initial yield stress (A)	Mpa	305
	Strain hardening constant (B)	Mpa	1161
	Strain hardening exponent (n)	-	0.61

	Thermal softening coefficient (m)	-	0,517
	Strain rate constant (C)	-	0,01
	Melting temperature (T <sub>m</sub> )	°C	1399
	Reference strain rate	/sec	1
Mie-Gruneisen Equation of State	Gruneisen Coefficient	-	1,93
	Parameter C1	m/s	4940
	Parameter S1	-	1,49
	Parameter Quadratic S2	0	s/m
Johnson and Cook Damage	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

**Tabel 3.2** Properties Material *Structural Steel*

ISTILAH	SATUAN	NILAI
<i>Density</i>	Kg/m <sup>3</sup>	7507
Specific heat	J/(kg K)	721,49
Young Modulus	GPa	200
Poisson's ration	-	0,3

**Tabel 3. 3** Uji Konvergensi *workpiece preforming* dengan size *uniform* dan variasi ukuran elemen

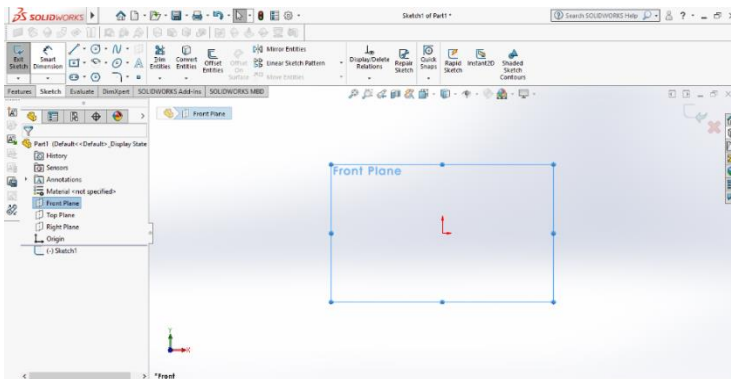
Parameter	Value
<i>Upper die prevelocity</i> (mm.s <sup>-1</sup> )	15
Besar gaya pembebanan <i>upper die</i> (kN)	2500
<i>Initial temperature of the workpiece</i> (°C)	1000
<i>Friction coefficient</i>	0,5
<i>Temperature of the dies</i> (°C)	22 (default)
<i>Ambient temperature</i> (°C)	22 (default)



### 3.3.2 Proses Desain

Proses desain menggunakan *software* Solidworks untuk memudahkan dalam merancang desain yang cukup rumit. File desain tersebut akan diimpor ke dalam *software* ANSYS, dimana file desain nanti akan berformat .IGS. Langkah-langkah dalam mendesain pemodelan forging adalah sebagai berikut:

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

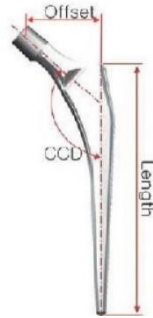


**Gambar 3.4** Halaman kerja baru pada *Solidworks*

#### 2. Membuat sketch *femoral stem*.

Ukuran *hip prosthesis* mengikuti ukuran *femoral stem* dengan anatomi tulang Indonesia. *Femoral stem* yang digunakan sebagai acuan model cetakan *last-forging* memiliki ukuran *length*

sebesar 129 mm, *offset* sebesar 39,1 mm, dengan CCD (*centrum-collum-diaphysis angles*) angle dengan ukuran  $134^{\circ}$ .



**Gambar 3.5** Sketch *femoral stem*

### 3. Pembuatan desain 3D *femoral stem*.

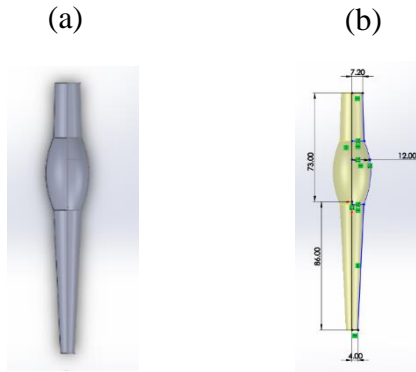


**Gambar 3.6** Pemodelan 3D *Femoral Stem*

### 4. Membuat sketch *workpiece*

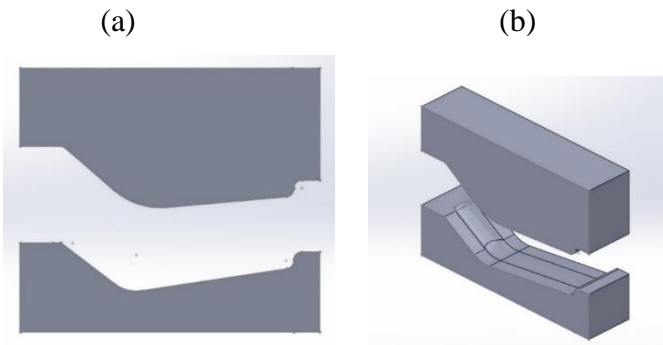
Ukuran *workpiece* diberi nilai toleransi diberikan dengan maksud agar material dapat mengisi cetakan secara maksimal. Ukuran diberikan pada bagian atas, tengah dan bawah batang dengan ukuran yang berbeda mengikuti ukuran model *hip prosthesis* dengan tambahan nilai toleransi. *Workpiece* diberikan fillet agar benda kerja dapat dibentuk dengan mudah jika

dibandingkan dengan menggunakan garis yang membentuk sudut. Setelah diberikan fillet, *workpiece* di-*revolve*  $360^0$  agar membentuk *round bar*.

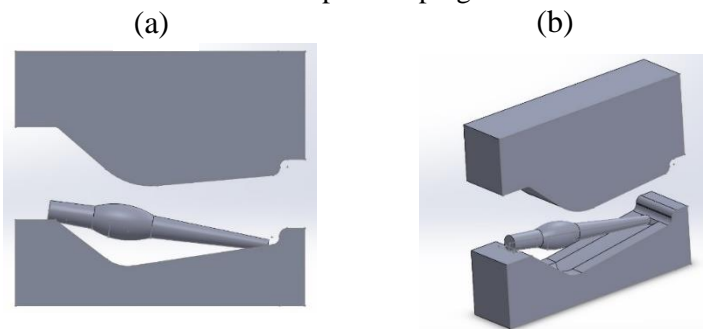


**Gambar 3.7** Sketch 3D *workpiece* (a) tanpa dimensi (b) dengan dimensi (satuan mm)

Selanjutnya, penulis membuat desain *upper & lower die* dengan tujuan membentuk benda kerja awal dengan cara ditebuk. Benda kerja ditebuk bertujuan dengan menyesuaikan bentuk *hip prosthesis* yang akan dibentuk setelah proses *preforging*. Cetakan diberikan *counterlock* pada ujung cetakan agar memberikan posisi lebih stabil kepada benda kerja dan *upper die*. Selain diberikan *counterlock*, cetakan juga diberi jalur dengan kedalaman tertentu agar benda kerja lebih stabil saat diberi gaya oleh *upper die*. Berikut adalah desain dari pembuatan cetakan *preforging* pada gambar 3.8 dan *assembly upper & lower die* dengan *workpiece* pada gambar 3.9.



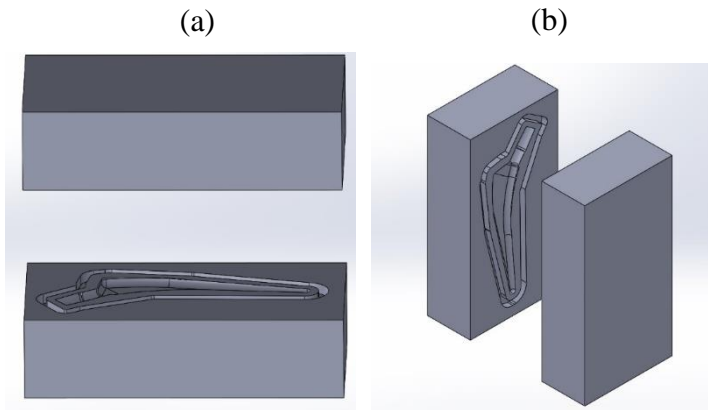
**Gambar 3.8** Pemodelan 3D *die* pada *preforming* (a) tampak atas (b) tampak samping



**Gambar 3.9** Pemodelan *assembly* 3D *die* dan *workpiece* pada *preforming*(a) tampak atas (b) tampak samping

5. **Membuat *upper dies (punch)* dan *lower die***

Pembuatan 3D *dies* berdasarkan desain *femoral stem* sesuai dengan ukuran yang sudah dijelaskan sebelumnya. Pembuatan *dies* dengan cara membagi secara melintang menjadi dua bagian dan terpisah pada bagian tengah. Setelah tahap desain *upper* dan *lower dies* telah selesai, lalu file tersebut disimpan dengan format .IGS agar bisa diimpor pada program ANSYS.



**Gambar 3.10** Sketch cetakan *last-forging femoral stem* (a) tampak depan (b) tampak samping

### 3.3.3 Simulasi

Pada penelitian ini, ANSYS *Workbench subtool explicit dynamic* akan digunakan sebagai *software* simulasi *forging*. Dalam simulasi ini, akan dibedakan menjadi dua proses, yaitu proses *pre-forging* dan *last forging*. Sebelum melakukan simulasi perlu dilakukan proses *set up* pada program agar hasil simulasi yang didapatkan lebih akurat sebagai berikut:

#### 3.3.3.1 Simulasi *Pre-Forging*

##### 1. Mendefinisikan *engineering data*

*Engineering data* merupakan fitur memilih dan mengatur jenis material yang akan digunakan pada simulasi. Jenis material yang akan digunakan pada *upper and lower dies* adalah *structural steel*. Untuk material *workpiece*, jenis material yang akan digunakan adalah 316L. *Stainless steel 316L* akan ditambahkan sebagai material baru dengan menambahkan properties berupa *density*, *Mie-Gruneisen equation of state* (*Gruneisen Coefficient*, *Parameter C1*, *Parameter S1*, *Parameter Quadratic S2*), *Johnson and Cook constitutive equation parameters* (*Initial yield stress*, *Strain hardening constant*, *Strain hardening exponent*, *Thermal*

softening coefficient, Strain rate constant, dan Reference strain rate), Johnson and Cook damage dan specific heat yang disesuaikan pada temperature 1000°C. Pada engineering data, material *workpiece* diharapkan tidak pecah atau mengalami *failure* dalam proses penempaan, namun sudah mengalami deformasi plastis. Karena apabila dalam proses material belum melewati titik luluh, maka ketika material tidak diberikan beban akan kembali ke bentuk semula sehingga *femoral stem* tidak dapat terbentuk.

(a)

Properties of Outline Row 4: Structural Steel				
	A	B	C	D E
	Property	Value	Unit	
1	Material Field Variables	Table		
3	Density	7850	kg m <sup>-3</sup>	
4	Isotropic Elasticity			
5	Derive from	Young's Modulu...		
6	Young's Modulus	2E+08	MPa	
7	Poisson's Ratio	0.3		
8	Bulk Modulus	1,6667E+14	Pa	
9	Shear Modulus	7,6923E+13	Pa	
10	Specific Heat	434	J kg <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup>	

(b)

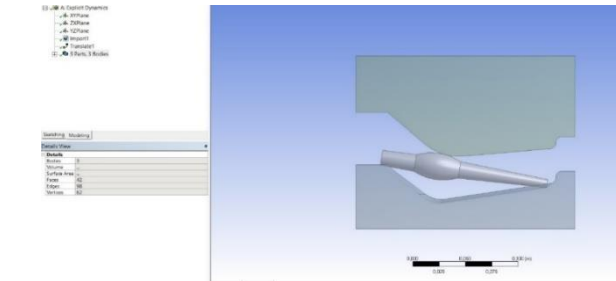
Properties of Outline Row 3: 316L				
	A	B	C	D E
	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	7507	kg m <sup>-3</sup>	
4	Specific Heat, C <sub>p</sub>	721,49	J kg <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup>	
5	Johnson Cook Strength			
6	Strain Rate Correction	First-Order		
7	Initial Yield Stress	305	MPa	
8	Hardening Constant	441	MPa	
9	Hardening Exponent	0,1		
10	Strain Rate Constant	0,057		
11	Thermal Softening Exponent	1,041		
12	Melting Temperature	1399	C	
13	Reference Strain Rate (/sec)	1		
14	Shear Modulus	51585	MPa	
15	Shock EOS Linear			
16	Gruneisen Coefficient	1,93		
17	Parameter C1	4940	m s <sup>-1</sup>	
18	Parameter S1	1,49		
19	Parameter Quadratic S2	0	s m <sup>-1</sup>	
20	Johnson Cook Failure			
21	Damage Constant D1	0,05		
22	Damage Constant D2	3,44		
23	Damage Constant D3	2,12		
24	Damage Constant D4	0,002		
25	Damage Constant D5	0,1		
26	Melting Temperature	1399	C	
27	Reference Strain Rate (/sec)	1		

## 2. Mengimpor geometri cetakan *preforging* dengan *workpiece preforging*

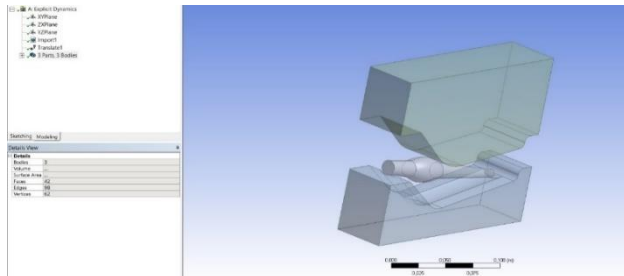
Gambar 3.11 Penentuan *engineering data* (a) Upper & Lower Dies  
(b) *workpiece*

Setelah menentukan jenis material pada *engineering data*, selanjutnya adalah mengimpor geometri *dies* dengan format .IGS yang telah dibuat ke dalam salah satu program ANSYS, ANSYS *design modeller*.

(a)



(b)

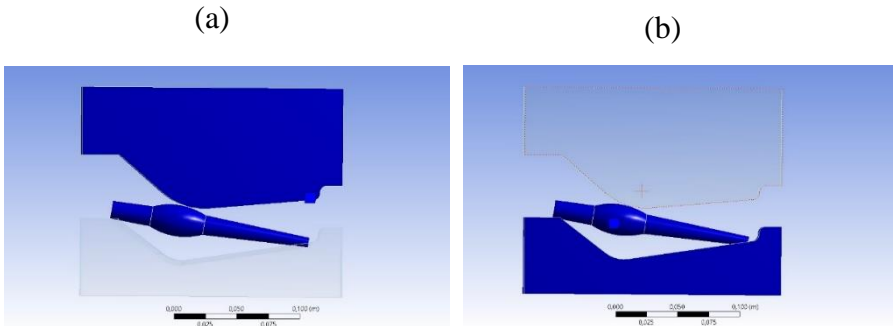


**Gambar 3.12** Desain *dies* dan *workpiece* pada proses *preforging*  
(a) tampak depan (b) tampak samping

### 3. Menentukan jenis kontak

Keluar dari program *design modeller*, selanjutnya masuk ke program *mechanical modeller* untuk melakukan proses *set up* simulasi. Karena dalam simulasi ini terdapat interaksi antara dua benda, maka jenis kontak atau interaksi tersebut didefinisikan terlebih dahulu. Pendefinisian kontak menggunakan batasan *body interaction*. Permukaan yang mengalami kontak adalah permukaan *workpiece* terhadap

permukaan cetakan *preforging*. Sehingga membuat dua kontak, yaitu *upper die* dengan bagian atas *workpiece* dan *lower die* dengan bagian bawah *workpiece*. Jenis kontak yang digunakan adalah *frictional steel to steel* dengan *friction coefficient* sebesar 0,5.[32]



**Gambar 3.13** Penentuan jenis kontak (a) body interaction 1 (b) body interaction 2

#### 4. Uji konvergensi

Validasi *meshing* dilakukan untuk mengetahui seberapa akurat *meshing* yang digunakan pada model pada simulasi. Semakin akurat *meshing*, berarti hasil simulasinya mendekati dengan kondisi nyata. Validasi *meshing* yang digunakan adalah dengan uji konvergensi. Dengan uji ini kita dapat mengetahui ukuran *meshing* yang paling akurat. Semakin kecil ukuran elemen atau semakin banyak elemen memang hasil yang dihasilkan akan lebih valid, akan tetapi hal ini akan berpengaruh pada proses simulasi yang memakan waktu lebih lama. Oleh karena itu, uji konvergensi juga diperlukan untuk mengoptimasi validitas hasil dan lama proses simulasi. Uji konvergensi dilakukan dengan cara membuat grafik hubungan antara ukuran mesh dengan besar tegangan hasil simulasi model.

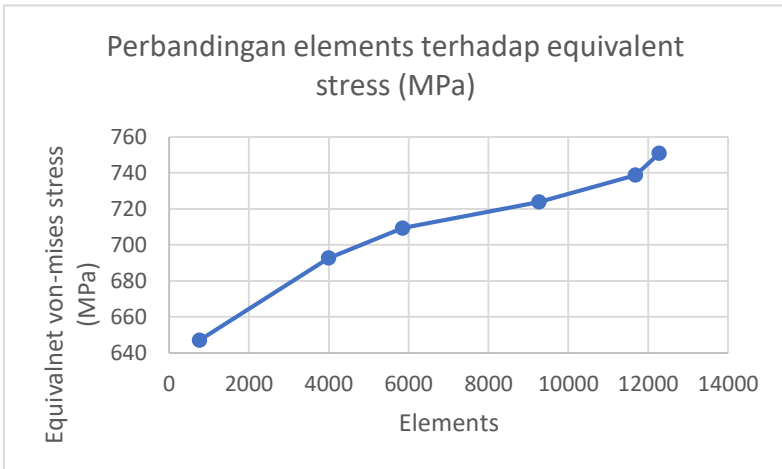
Diskritisasi (*meshing*) dilakukan pada geometri *workpiece preforging*. Bentuk ini akan menggunakan *meshing* dengan *method*



*multizone* karena memiliki akurasi elemen pada segi kualitas yang lebih baik dibandingkan *method* lain. Bentuk *meshing* menggunakan *size function* berupa *uniform-proximity*. Konvergensi tes dilakukan secara manual dengan variasi ukuran elemen dan nodes. Konvergensi ini menggunakan *output solver probe stress* dikarenakan agar nilai tegangan yang didapatkan berfokus pada satu titik body. Nilai yang dijadikan acuan pada uji konvergensi adalah nilai maksimum dari Von-Mises Equivalent Stress dengan pembebanan sesuai nilai maksimum yang diijinkan dari desain untuk geometri yang telah disederhanakan. Berikut hasil uji konvergensi berdasarkan variasi ukuran elemen:

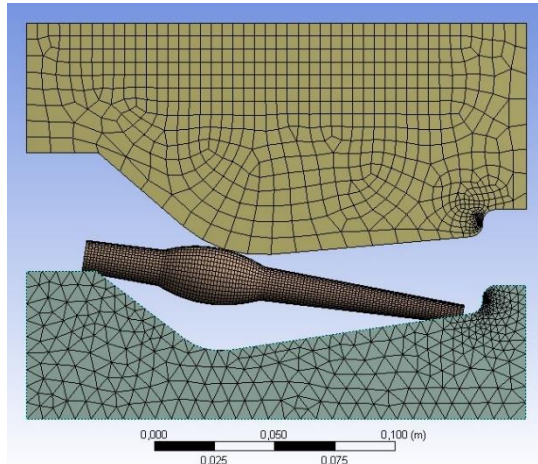
**Tabel 3. 4** Uji Konvergensi *workpiece preforging* dengan size *uniform* dan variasi ukuran elemen

Nodes	Element	Quality	Equivalent Stress Max. (MPa)	Max er-stress error (%)
1066	760	0,8054	647,01	
5025	3996	0,8552	692,69	6,594581
7280	5850	0,877	709,36	2,350006
11220	9265	0,8873	723,85	2,001796
14042	11682	0,8876	738,7	2,010288
14750	12276	0,8925	750,84	1,616856



**Gambar 3.14** Grafik uji konvergensi elements terhadap equivalent stress (MPa)

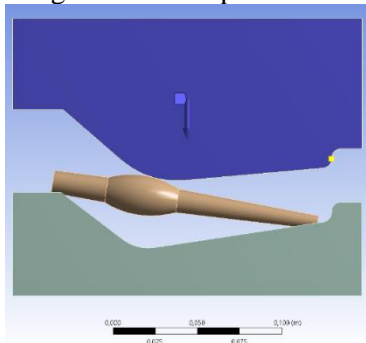
Dari data pada tabel 3.3 didapatkan grafik pada gambar 3.14. Dari grafik tersebut, dinyatakan bahwa *equivalent stress von-mises* menaik seiring dengan berkurangnya jumlah *elements*. Pada hasil simulasi ini, didapatkan titik optimal pada meshing yang berjumlah 14750 node dan 12276 element dengan meshing size 1,3 mm dengan hasil tegangan von mises maksimum bernilai 750,84 MPa dengan memiliki *error* terkecil dengan nilai 1,618. Selain itu, *quality meshing* pada size tersebut senilai 0,8925.



**Gambar 3.15** Meshing pada simulasi

## 5. Menentukan letak pembebanan

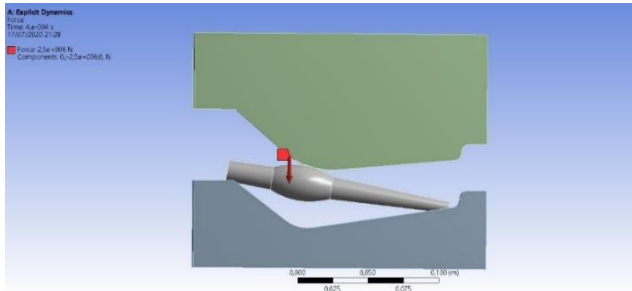
Proses *forging* menggunakan 2 bagian cetakan, *upper (punch)* dan *lower*. *Lower die* sebagai dukungan dengan *workpiece* berada di atasnya dan *upper die* yang bekerja menempa *workpiece*. Sehingga dalam pengaturannya, *upper die (punch)* dipilih sebagai komponen yang bergerak dan yang memberikan beban. *Upper die* disini diatur dengan diberikan kecepatan kearah bawah menuju *workpiece* sesuai dengan koordinat pada ANSYS.



**Gambar 3.16** Menentukan letak pembebanan

## 6. Menentukan letak kecepatan awal

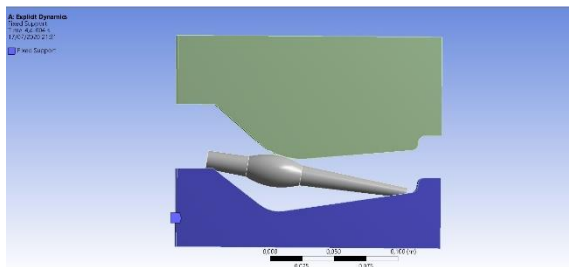
*Body upper die* diberi kecepatan awal agar *die* diatur untuk menempa benda kerja dengan kecepatan awal tertentu.



**Gambar 3.17** Penentuan letak kecepatan awal

## 7. Menentukan letak tumpuan (*fixed support*)

*Lower die* sebagaiudukan dimana cetakan tidak bergerak (statis) atau *fixed support*.

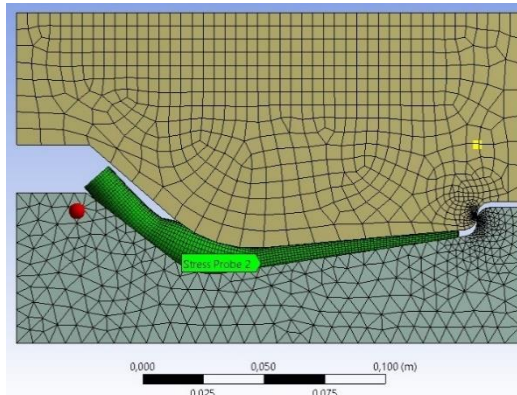


**Gambar 3.18** Penentuan letak tumpuan

## 8. Mendefinisikan hasil

Hasil simulasi akan menghasilkan proses *filling workpiece* terhadap *dies*. Tegangan yang muncul pada kedua *dies* diabaikan atau dianggap *rigid* dan *dies* di modelkan untuk tidak mengalami

deformasi. Berikut merupakan hasil *preforming* dengan *output solver probe equivalent stress* pada satu *body* benda kerja. *Preforming* dilakukan dengan tujuan membuat billet berbentuk tekukan sebelum dilakukan proses *last forging*. *Preforming* menggunakan gaya pembebanan 2.500 kN dan kecepatan awal sebesar 15 mm/s tanpa menggunakan variasi.

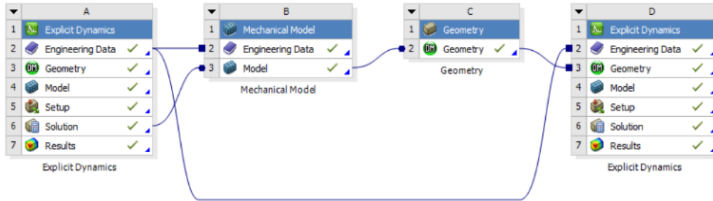


**Gambar 3.19** Hasil *preforming*

### 3.3.3.2 Simulasi *Last Forging*

Setelah proses *pre-forming* selesai, hasil simulasi yang berupa benda kerja terdeformasi dengan bentuk tekukan akan menjadi benda kerja awal untuk proses *last forging*. Rangkaian *workflow* seperti pada gambar 3.20 diperlukan untuk mengeksport hasil simulasi. Tegangan sisa dan nilai deformasi pada *pre-forming* diabaikan tidak dikonversikan ke material *last forging*. Hal ini dikarenakan ekspor material pada *explicit dynamic* hanya terbatas pada model tanpa tegangan yang terjadi tanpa adanya ekspor tegangan. Lalu selanjutnya rangkaian set up yang meliputi pendefinisian kontak, *symmetric region*, tumpuan, beban, kecepatan, dan *meshing* diperlukan kembali dengan cara yang sama seperti proses *pre-forming* diatas namun dengan geometri

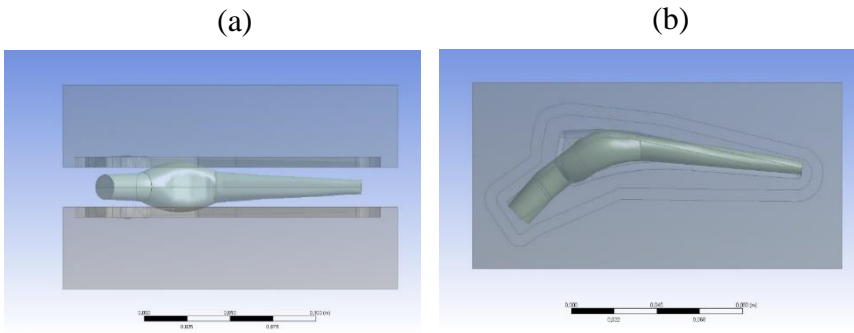
benda kerja yang telah terdeformasi dan menggunakan parameter *last forging* pada tabel 3.4.



**Gambar 3.20** Skema diagram material *pre-forging* ke *last-forging*

### 1. Mengimpor geometri cetakan *last-forging*

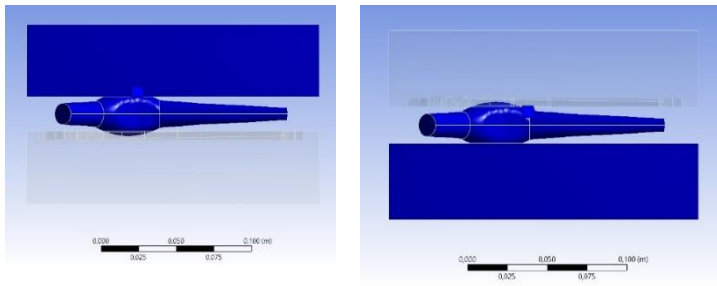
Setelah melakukan proses *preforging*, hasil material yang sudah ditebuk akan di-*export* menjadi benda kerja *last forging*. Geometri *dies* yang sudah didesain akan diimpor dengan format .IGS yang akan dimasukkan ke dalam program ANSYS *design modeller*. Setelah mengimpor material *dies* dan hasil material *preforging*, selanjutnya akan diatur koordinat lokasi dengan melakukan *translate* pada *create transformation* pada *dies* agar sesuai dengan koordinat *dies* dengan *workpiece*. Jarak antar *dies* sejauh 19 mm.



**Gambar 3.21** Desain *dies* dan *workpiece* pada proses *last-forging* (a) tampak depan (b) tampak atas

## 2. Menentukan jenis kontak

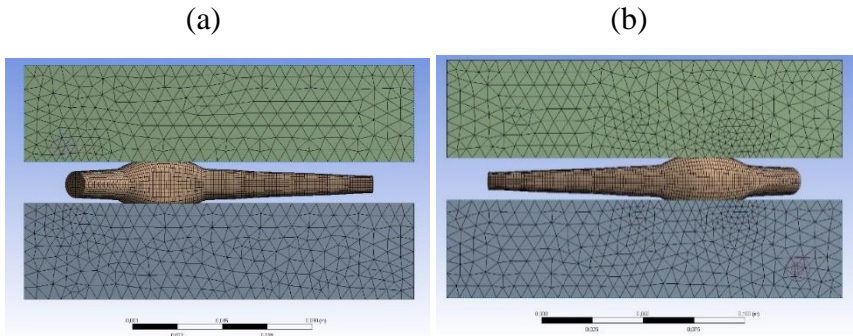
Simulasi ini terdapat interaksi antara dua benda, maka jenis kontak atau interaksi tersebut didefinisikan terlebih dahulu. Pendefinisian kontak menggunakan batasan *body interaction*. Permukaan yang mengalami kontak adalah permukaan *workpiece* terhadap permukaan cetakan *preforging*. Sehingga membuat dua kontak, yaitu *upper die* dengan bagian atas *workpiece* dan *lower die* dengan bagian bawah *workpiece*. Jenis kontak yang digunakan adalah *frictional steel to steel* dengan *friction coefficient* variasi sebesar 0,5, 0,7, dan 1.



**Gambar 3.22** Penentuan jenis kontak (a) *body interaction 1* (b) *body interaction 2*

## 3. Meshing

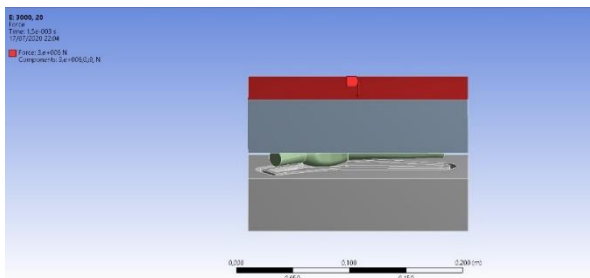
Proses *meshing* dilakukan pada material *last-forging* dengan *body size meshing* 1,5 mm menggunakan *methode tetrahedrons* dengan ukuran *uniform-proximity* mengikuti konvergensi yang sudah dilakukan pada tahap *pre-forging*. *Meshing* dilakukan hanya pada benda kerja dan tidak mempengaruhi pada *upper* dan *lower die*.



**Gambar 3.23** Meshing pada simulasi *last-forging* (a) tampak depan (b) tampak belakang

#### 4. Menentukan letak pembebanan

*Upper die* diatur dengan diberikan gaya kearah bawah menuju *workpiece* sesuai dengan koordinat pada ANSYS.

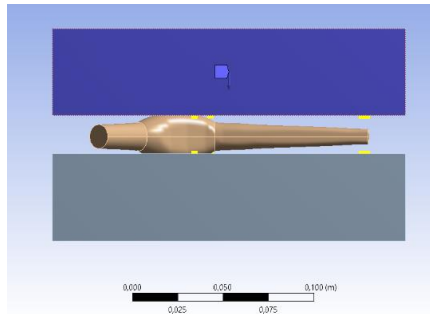


**Gambar 3.24** Penentuan letak pembebanan pada *last-forging*

#### 5. Menentukan letak kecepatan awal

*Body upper die* diberi kecepatan awal agar *die* diatur untuk menempa benda kerja dengan kecepatan awal tertentu

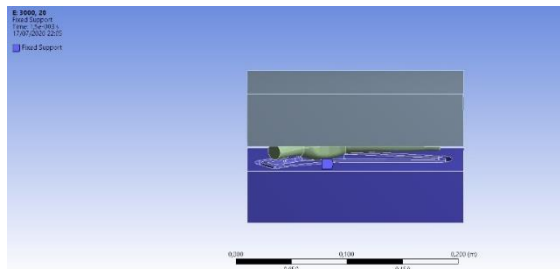




**Gambar 3. 25** Penentuan letak kecepatan awal

## 6. Menentukan letak tumpuan (*fixed support*)

*Lower die* sebagai dudukan dimana cetakan tidak bergerak (statis) atau *fixed support*.



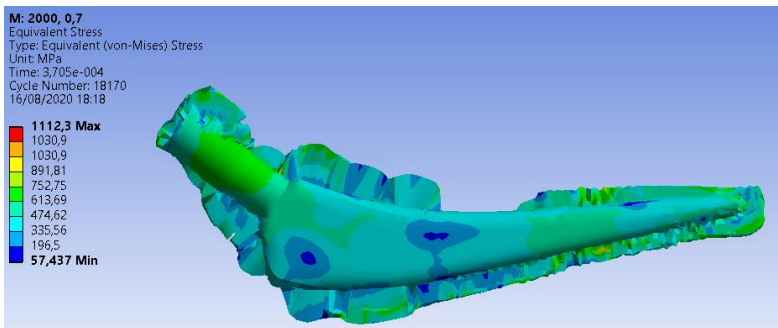
**Gambar 3. 26** Penentuan letak tumpuan

### 3.3.4 Analisis Hasil

Setiap proses manufaktur logam akan menghasilkan tegangan terhadap benda kerjanya. Untuk mengetahui tegangan efektif yang timbul akibat proses *forging*, maka *equivalent von-mises stress* sebagai *output solver*. Hal ini dikarenakan untuk mengetahui nilai tegangan luluh yang dialami benda kerja saat berdeformasi plastis. Selain itu, *directional deformation* dipilih sebagai *output solver* untuk mengetahui perpindahan *upper die*.

*Output solver damage* dipilih untuk mengetahui apakah benda kerja mengalami kegagalan saat berdeformasi plastis.

Dari simulasi percobaan yang telah dilakukan, akan disimulasikan kembali dengan beban penekanan dan koefisien gesek yang bervariasi. Tahapan simulasi ini sama persis dengan simulasi sebelumnya. Selain itu variasi ini juga dilakukan untuk menemukan konfigurasi input beban dan koefisien gesek pada mesin *forging* yang paling optimal untuk membentuk *hip prosthesis*.



**Gambar 3. 27** Contoh hasil *last-forging*

### 3.3.5 Rencana Penelitian

Setelah mendapatkan hasil simulasi *hot forging*, akan dilakukan variasi terhadap koefisien gesek antara cetakan & benda kerja dan besar gaya pembebanan pada *upper die (punch)*. Variasi koefisien gesek berubah dari 0,5 hingga 1 dan gaya pembebanan dilakukan pada 2.000 kN hingga 3.000 kN. Sehingga dari variasi ini akan didapatkan nilai yang pas untuk pembuatan *femoral stem* melalui proses *hot forging*.

**Tabel 3. 5** Rencana Penelitian *Last-forging*

Variasi	Nilai	Satuan
<i>Friction Coefficient</i>	0,5 - 1	-
Besar gaya pembebanan	2000 – 3000	kN

### 3.3.6 Verifikasi Penelitian

Hasil penelitian ini akan diverifikasi dengan hasil penelitian Hojjat Ghahramanzadeh Asl, Sinan Sezek, dan Akgün Alsanar pada tahun 2015 yang berjudul “*Analysis Of Hip Prosthesis Production With Forging Using The Finite Element Method*”. Hasil grafik perpindahan *upper die* terhadap tegangan *effective (equivalent von-mises)* pada kecepatan awal dan besar gaya pembebanan tertentu akan dibandingkan dengan hasil grafik pada jurnal tersebut. Tren kurva pada jurnal tersebut menunjukkan tegangan akan meningkat seiring dengan perpindahan *upper die* saat menempa benda kerja. Selain itu, perpindahan *upper die* menempa benda kerja akan diatur sedemikian rupa agar ketebalan sisa material tidak melebihi toleransi yang diberikan. Menurut ASM Handbook Volume 14A tentang Metalworking: Bulk Forming, toleransi yang diberikan pada benda kerja dengan luas permukaan  $9 \text{ mm}^2$ , toleransi ketebalan antara  $-0,79 \text{ mm}$  hingga  $+1,57 \text{ mm}$ . Oleh karena itu, perpindahan *upper die* diatur untuk menempa dengan jarak antar kedua *die* berjarak kurang dari sama dengan  $1,57 \text{ mm}$ .

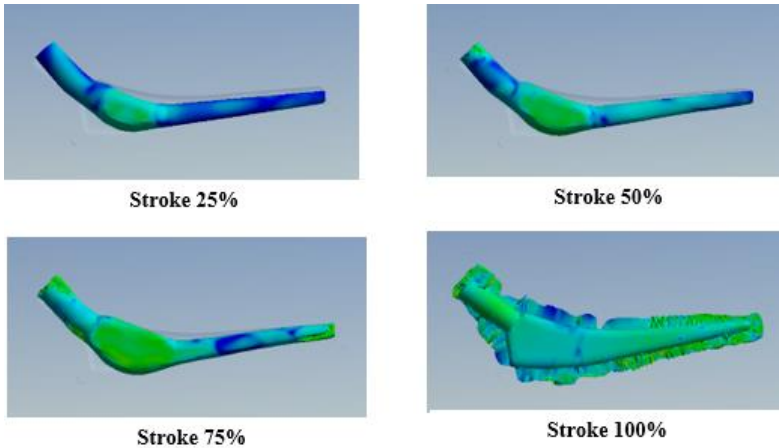
## **BAB IV DATA DAN ANALISA**

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode elemen hingga dengan menggunakan aplikasi ANSYS. Setelah dilakukan simulasi *preforging* dengan gaya pembebanan sebesar 2500 kN, hasil benda kerja ditransfer ke model kerja *explicit dynamic* yang baru. Simulasi dilakukan dengan menggunakan variasi gaya pembebanan (2000 kN, 2500 kN, dan 3000 kN) dan variasi koefisien gesek antara cetakan dan benda kerja (0,5, 0,7, dan 1). Seiring meningkatnya variasi gaya pembebanan pada *upper die* dan koefisien gesek akan membuat tegangan *equivalent* pada benda kerja semakin tinggi.

Nilai tegangan *effective (equivalent von-misses)* didapatkan dari aplikasi workbench ANSYS setelah menyelesaikan simulasi dengan langkah-langkah yang telah dijelaskan pada bab sebelumnya. Nilai perpindahan *upper die* didapatkan dari hasil *output solver directional deformation* pada *upper die* dan juga disesuaikan dengan waktu simulasi. Hasil simulasi dari aplikasi ANSYS berupa grafik tegangan yang terjadi berbanding dengan *displacement* dari *upper die*. Analisis terjadinya titik *failure* akan dibahas pada *subbab* analisis menggunakan *output solver damage* pada ANSYS. Analisis yang dilakukan akan membandingkan kontur *damage* yang terjadi dan pembahasan mengenai daerah yang mengalami regangan yang mendekati titik *failure*.

### **4.1 Analisis Hasil Kontur Tegangan dan Path**

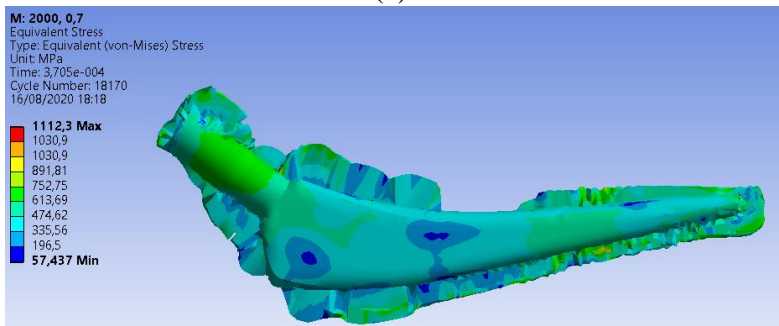
Hasil gambar yang ditampilkan berupa tampak depan kontur *workpiece* hasil *last forging* pada *equivalent von-mises stress*. Tabel perubahan waktu terhadap perpindahan *upper die* ditampilkan sesuai dengan tegangan benda kerja yang diberikan. Tabel perubahan waktu terhadap tegangan rata-rata pada benda kerja didapatkan dari *output solver equivalent von-mises stress*. Berikut akan ditampilkan perubahan bentuk benda kerja hasil *last forging*.



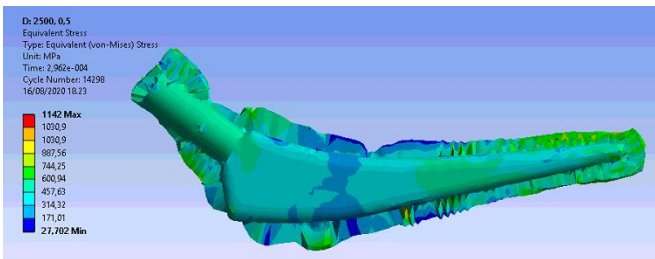
**Gambar 4. 1** Kontur deformasi benda kerja hasil penempaan pada gaya pembebanan sebesar 2.000 kN dan koefisien gesek 0,5

Distribusi tegangan equivalent bervariasi pada setiap bagian *hip prosthesis* hasil proses *last forging*. Bagian *head stem*, *body stem*, dan *tail stem* memiliki kontur warna tegangan yang berbeda tergantung nilai tegangan *equivalent*. Hasil dari simulasi *forging femoral stem* dengan kontur tegangan ditunjukkan pada gambar 4.2. Bagian *head stem* memiliki tegangan *equivalent* yang lebih tinggi dibandingkan bagian lainnya seiring dengan perpindahan *upper die* menempa benda kerja.

(a)



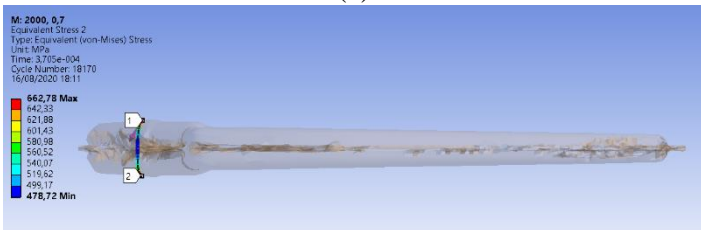
(b)



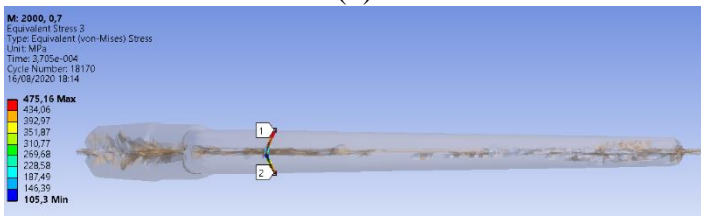
**Gambar 4. 2** Kontur Tegangan (a) gaya beban 2000 kN koefisien gesek 0,7 (b) gaya beban 2500 kN & koefisien gesek 0,5

Selain pengamatan dengan visual kontur, perlu dilakukannya pengamatan dengan meninjau salah satu titik dari bagian *head stem*, *body stem*, & *tail stem*. Pengamatan tiga titik ini akan ditinjau pada waktu yang sama saat penempaan dengan menggunakan *path*. *Path* akan menampilkan kontur tegangan dengan satu garis dari permukaan hingga ke dalam benda kerja hingga menemui permukaan pada sisi lain. Lokasi pengamatan terbentuknya tegangan ditunjukkan pada gambar 4.3.

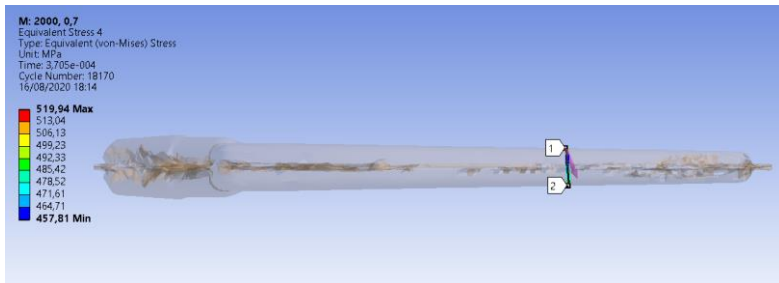
(a)



(b)

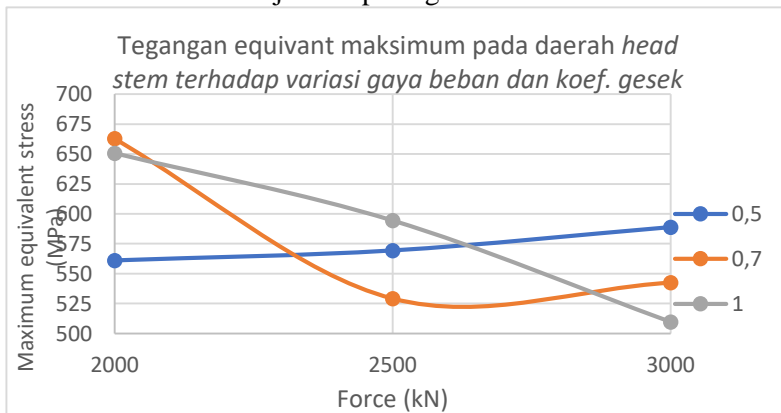


(c)



**Gambar 4. 3** tinjauan path terhadap tegangan (a) head stem (b) body stem (c) tail stem

Gambar 4.3 merupakan hasil proses *last forging* dengan gaya pembebanan sebesar 2000 kN dengan koefisien gesek sebesar 0,7. Pengamatan terhadap tegangan equivalent dilakukan dengan mengamati nilai maksimum setiap titik pada satu bagian. Pada gambar 4.3(a) atau bagian *head stem*, didapatkan hasil nilai tegangan equivalent maksimum sebesar 662,78 MPa. Pada gambar 4.3(b) atau bagian *body stem*, didapatkan hasil nilai tegangan equivalent maksimum sebesar 475,16 MPa. Pada gambar 4.3(c) atau bagian *tail stem*, didapatkan hasil nilai tegangan equivalent maksimum sebesar 519,94 MPa. Hasil salah satu analisis pada *head stem* akan ditunjukkan pada grafik dibawah ini.



**Gambar 4. 4** Grafik Tegangan equivalent maksimum pada daerah *head stem* terhadap variasi gaya beban dan koef. gesek

Gambar 4.4 menunjukkan grafik perbandingan tegangan *equivalent* pada benda kerja dengan diberi gaya pembebanan dengan variasi gaya beban dan koefisien gesek. Pada grafik tersebut, terdapat tiga jenis kurva dengan warna yang berbeda dengan variasi koefisien gesek. Kurva terlihat fluktuatif seiring dengan penambahan gaya beban. Kurva berwarna biru menunjukkan hasil tegangan *equivalent* pada variasi koefisien gesek sebesar 0,5. Nilai tegangan maksimal yang didapat yaitu 588,78 MPa pada gaya pembebanan sebesar 3.000 kN. Kurva berwarna jingga menunjukkan hasil tegangan *equivalent* pada variasi koefisien gesek sebesar 0,7. Nilai tegangan maksimal yang didapat yaitu 662,78 MPa pada gaya pembebanan sebesar 2.000 kN. Kurva berwarna abu-abu menunjukkan hasil tegangan *equivalent* pada variasi koefisien gesek sebesar 1. Nilai tegangan maksimal yang didapat yaitu 650,61 MPa pada gaya pembebanan sebesar 2.000 kN. Hasil analisis nilai maksimum tegangan *equivalent* dari setiap variasi pada penelitian ini akan dituliskan pada tabel 4.1

**Tabel 4. 1** Hasil tegangan equivalent maksimal dari tinjauan *path*

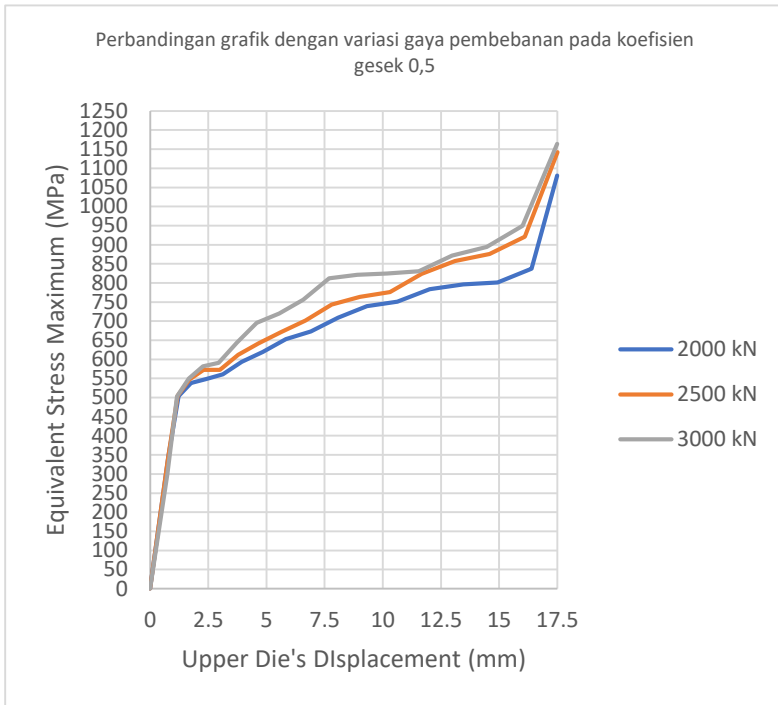
Koefisien gesek	Gaya (kN)	Equivalent stress (MPa)		
		Head Stem	Body Stem	Tail Stem
0,5	2.000	561,01	415,28	546,84
	2.500	569,33	418,12	466,35
	3.000	588,78	365,06	439,07
0,7	2.000	662,78	475,16	519,94
	2.500	529,23	379,25	438,61
	3.000	542,47	315,84	376,49
1	2.000	650,61	475,68	542,14
	2.500	594,39	345,58	456,36
	3.000	509,71	322,76	362,49



Dari data tersebut dapat disimpulkan bahwa tegangan equivalent fluktuatif dengan pengaruh koefisien gesek dan gaya beban. Faktor yang mempengaruhi hasil yang tidak konsisten adalah penggunaan *path* pada setiap lokasi pengamatan yang hanya bentuknya merupakan garis saja. Penggunaan *path* dimaksudkan sebagai lokasi pengamatan dari setiap bagian untuk mengamati secara detajl lokasi pengamatan dari *surface* satu ke *surface* lainnya. Kekurangan dari penggunaan *path* adalah daerah pengamatan yang terbatas bergantung pada elemen dan node terdekat yang dilalui. Selain itu, penggunaan *path* dimaksudkan agar memberikan hasil yang spesifik terhadap lokasi-lokasi pengamatan selain mendukung pengamatan secara kontur visual tegangan *equivalent*. Alasan lain menggunakan *path* adalah ingin membandingkan daerah pada femoral stem tanpa mempertimbangkan tegangan pada sisa material. Tetapi, jika dibandingkan antara daerah *femoral stem*, nilai maksimal tegangan *equivalent* pada *head stem* memiliki range tegangan sekitar 500-700 MPa dimana lebih tinggi dibandingkan daerah *body stem* dan *tail stem*. Sehingga dapat disimpulkan analisis secara kualitatif dengan melihat kontur dan *path* bahwa daerah *head stem* memiliki tegangan yang lebih tinggi dibandingkan daerah lainnya. Daerah *head stem* perlu diperhatikan karena menjadi titik kritis.

#### **4.2 Analisis Tegangan terhadap Perpindahan *Upper Die* dengan variasi gaya pembebanan dan koefisien gesek**

Pada penelitian ini, variasi yang digunakan adalah variasi gaya pembebanan dan koefisien gesek. Grafik dibawah ini merupakan grafik dengan data variasi gaya beban 2.000 kN, 2.500 kN, dan 3.000 kN pada koefisien gesek yang sama. Grafik tersebut akan menjelaskan kurva tegangan equivalent maksimal pada satu *body femoral stem* terhadap perpindahan upper die.

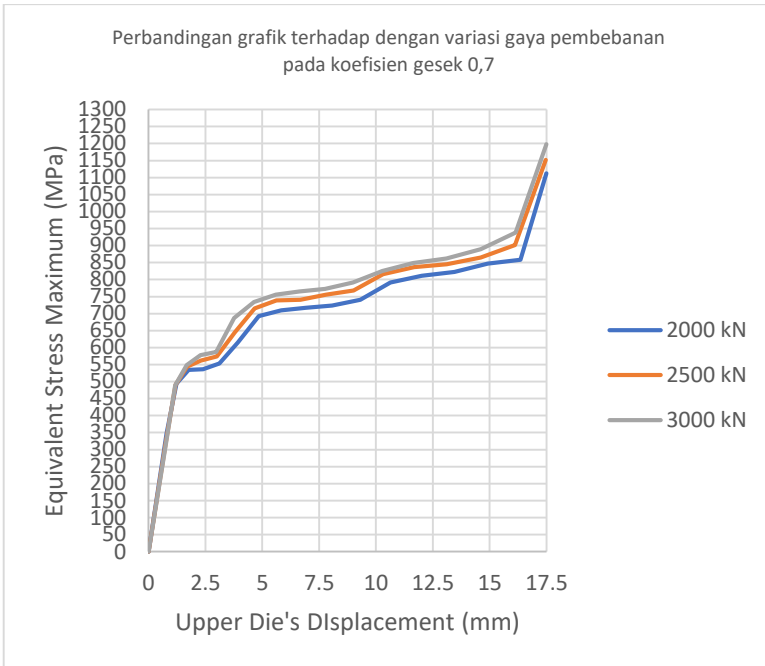


**Gambar 4.5** Grafik equivalent stress terhadap dengan perpindahan *upper die* dengan variasi gaya pembebanan pada koefisien gesek 0,5

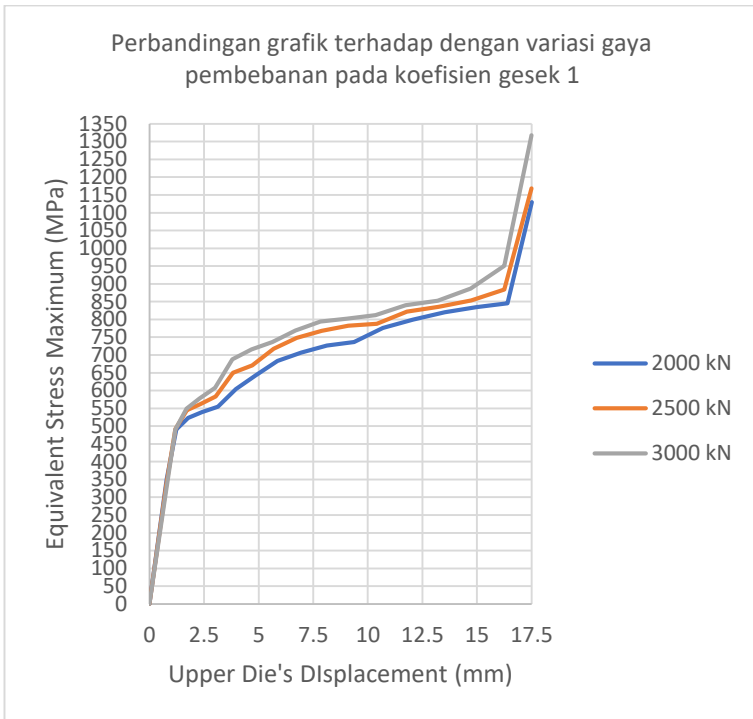
Gambar 4.5 menunjukkan perbandingan grafik tegangan *equivalent von-mises* pada benda kerja dengan diberi koefisien gesek sebesar 0,5 mm/s dengan variasi gaya pembebanan sebesar 2.000 kN, 2.500 kN, dan 3.000 kN. Pada grafik tersebut, terdapat tiga jenis kurva dengan warna yang berbeda. Ketiga kurva menunjukkan trend yang menaik seiring dengan perpindahan *upper die* menempa benda kerja. Kurva berwarna biru menunjukkan hasil tegangan *equivalent von-mises* pada variasi gaya pembebanan sebesar 2.000 kN. Nilai tegangan maksimal yang

didapat yaitu 1081,2 MPa pada perpindahan *upper die* sebesar 17,5 mm. Kurva berwarna jingga menunjukkan hasil tegangan *equivalent von-mises* pada variasi gaya pembebanan sebesar 2.500 kN. Nilai tegangan maksimal yang didapat yaitu 1142 MPa pada perpindahan *upper die* sebesar 17,5 mm. Kurva berwarna abu-abu menunjukkan hasil tegangan *equivalent von-mises* pada variasi gaya pembebanan sebesar 3.000 kN. Nilai tegangan maksimal yang didapat yaitu 1164,3 MPa pada perpindahan *upper die* sebesar 17,5 mm.

Berdasarkan grafik pada gambar 4.5 yang didapat dari hasil simulasi, dapat terlihat dari tiga kurva tegangan *equivalent* meningkat seiring dengan perpindahan *upper die* menempa benda kerja. Hal ini dapat terjadi dikarenakan benda kerja yang semakin menerima gaya beban *compressive* dari *upper die*. Dari perbandingan tiga kurva, bahwa terlihat bahwa trendline dari kurva dengan pembebanan 3.000 kN lebih tinggi dibandingkan kurva 2.000 & 2.500 kN. Hal ini dikarenakan deformasi pada benda kerja dipengaruhi gaya pembebanan yang dimana semakin menempa benda kerja untuk mengisi rongga pada cetakan. Sehingga meningkatkan tegangan kontak yang terjadi pada benda kerja dan cetakan. Selain itu pengaruh perbedaan gaya pembebanan menyebabkan peningkatan laju regangan plastis sehingga menimbulkan peningkatan tegangan alir untuk berdeformasi plastis. Perpindahan *upper die* yang mampu menempa hingga 17,5 mm dari jarak awal 19 mm membuat ketebalan sisa material dibawah toleransi ASM dimana sekitar kurang lebih tidak boleh melebihi 1,57mm. Dapat diamati pula bahwa hasil yang ditunjukkan oleh Gambar 4.6 dan Gambar 4.7 memiliki kecenderungan yang sama seperti yang ada pada hasil yang ditunjukkan oleh Gambar 4.5.



**Gambar 4. 6** Grafik equivalent stress terhadap dengan perpindahan *upper die* dengan variasi gaya pembebanan pada koefisien gesek 0,7



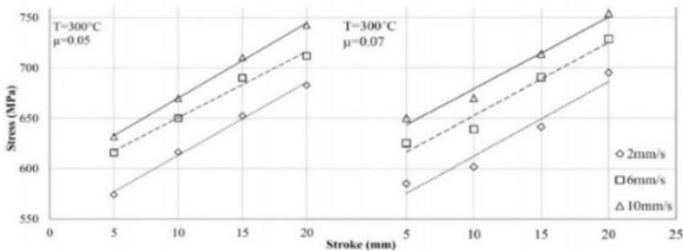
**Gambar 4.7** Grafik equivalent stress terhadap dengan perpindahan *upper die* dengan variasi gaya pembebanan pada koefisien gesek 1

Pada gambar 4.6 dan gambar 4.7 dapat terlihat kurva yang sebanding terhadap perpindahan *upper die* terhadap tegangan. Selain itu, perbandingan variasi koefisien gesek juga mempengaruhi tegangan. Tingginya angka koefisien gesek mempengaruhi permukaan cetakan dan membuat penempaan benda kerja dengan beban yang lebih besar untuk membentuk benda kerja. Hal ini dapat dibuktikan pada perbandingan nilai tegangan equivalent maksimal disaat penempaan maksimal dimana hasilnya meningkat pada setiap koefisien gesek. Koefisien gesek bernilai 1 dengan variasi beban 3.000 kN mampu menghasilkan

tegangan sebesar 1317,6 MPa dimana hasil tegangan tertinggi dibandingkan dengan variasi beban lainnya. Selain itu, koefisien gesek bernilai 0,5 dengan variasi beban 2.000 mampu menghasilkan tegangan sebesar 1081,2 MPa dimana hasil tegangan terendah dibandingkan dengan variasi lain. Namun, koefisien gesek dengan nilai minimum sangat dibutuhkan agar tegangan yang terjadi lebih kecil dan meningkatkan *life expectancy* cetakan tersebut. Pemberian lubrikasi pada cetakan merupakan salah satu metode agar mengurangi kontak gesekan pada cetakan dan benda kerja.

### 1.2.1 Komparasi Displacement Upper Die

Dalam hal ini akan dilakukan komparasi terhadap penelitian serupa yang menghasilkan data grafik berupa pengaruh perpindahan *upper die* terhadap tegangan *equivalent*. Pengaruh tegangan terhadap perpindahan *upper die* pada penelitian ini akan dikomparasikan dengan penelitian Hojjat Ghahramanzadeh Asl, dkk.(2015)



**Gambar 4. 8** Hubungan antara perpindahan *upper die* dengan tegangan *equivalent* (Hojjat Ghahramanzadeh Asl, dkk.2015)

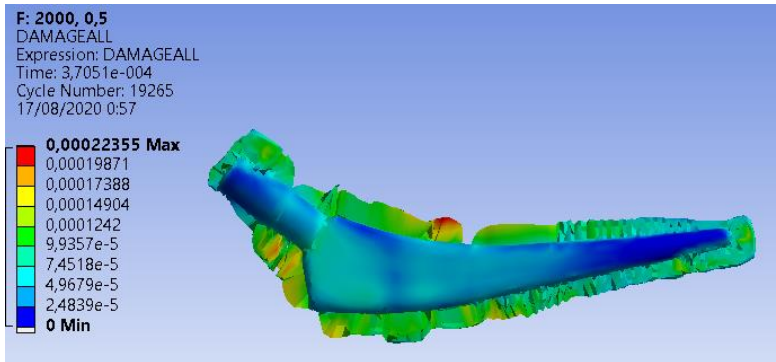
Gambar 4.8 di atas merupakan hasil grafik hubungan antara perpindahan *upper die* terhadap tegangan *equivalent*. Penelitian yang dilakukan Hojjat Ghahramanzadeh Asl, dkk dengan judul *Analysis Of Hip Prosthesis Production With Forging Using*

*Thefinite Element Method* menggunakan amterial Ti6AL4V. Komparasi yang dapat dilakukan hanya perbandingan tren grafik yang dihasilkan antara perbandingan tegangan terhadap perpindahan *upper die* dengan varaisi koefisien gesek pada temperatur konstan. Gaya pembebanan berperan sama seperti kecepatan pada penelitian sebelumnya yaitu memberikan peengaruh perpindahan *upper die*. Hal tersebut dikarenakan menggunakan material yang digunakan berbeda dengan penelitian ini. Selain itu, perbedaan model pada *hip prosthesis* juga berpengaruh pada data yang didapatkan.

Berdasarkan komparasi pada penelitian terdahulu, maka hasil yang didapatkan menunjukkan tren yang sesuai, yaitu hubungan yang berbanding lurus antara tegangan terhadap perpindahan *upper die* pada proses *forging*.

#### **4.3 Verifikasi Failure pada Hasil *Last-Forging Hip Prosthesis***

Setiap material memiliki batasan kemampuan untuk berdeformasi plastis. Kemampuan material untuk berdeformasi plastis sebelum mengalami titik *fracture (failure)*. Untuk melakukan analisis tersebut, nilai *johnson-cook failure* ditentukan pada material. ANSYS dapat mendeteksi apakah material mengalami *failure* dengan menggunakan *output solver "damage"*. Material dikategorikan mengalami *failure* jika nilai "*damage*" bernilai satu dari skala nol hingga satu. Berikut merupakan salah satu kontur *damage* pada salah satu variasi gaya pembebanan 2.000 kN dengan koefisien gesek sebesar 0,5.



**Gambar 4. 9** Kontur damage pada gaya beban 2000 kN dan koefisien gesek 0,5

Pada gambar 4.9 tersebut ditampilkan kontur ditampilkan nilai damage. Nilai tersebut didapatkan dari perbandingan jumlah perubahan regangan plastis *equivalent* terhadap nilai regangan pada johnson cook damage. Dapat disimpulkan bahwa semakin nilai damage mendekati angka satu, maka daerah tersebut mengalami peningkatan pada nilai regangan plastis. Sisa material pada sisi yang mengelilingi *hip prosthesis* mengalami regangan plastis lebih tinggi dibandingkan *hip prosthesis*. Jika hasil *hip prosthesis* diamati, maka daerah *body stem* memiliki daerah damage yang lebih tinggi dibandingkan daerah *head stem* dan *tail stem*. Hal ini dikarenakan pemampatan volume pada daerah *body stem* lebih tinggi dibandingkan daerah lainnya. Oleh karena itu, perlu dianalisa bagian-bagian yang mengalami regangan plastis yang lebih besar dibandingkan daerah lainnya yang merupakan bagian kritis agar tidak terjadi inisiasi *crack* dan kegagalan. Dari hasil kontur tersebut, dapat dikatakan bahwa benda kerja mengalami regangan plastis tetapi tidak sampai pada titik *failure*. Dapat diamati pula hasil damage dari setiap variasi pada tabel 4.2.



**Tabel 4. 2** Nilai damage dan keterangan dari setiap variasi gaya beban dan koefisien gesek

Gaya beban (kN)	Koef. Gesek	Nilai damage maksimal	Keterangan
2.000	0,5	0,00022355	Aman
	0,7	0,00019301	Aman
	1	0,00019729	Aman
2.500	0,5	0,00018321	Aman
	0,7	0,00018903	Aman
	1	0,00023459	Aman
3.000	0,5	0,00016785	Aman
	0,7	0,00017731	Aman
	1	0,00018958	Aman

Dari tabel tersebut dapat diketahui bahwa dari setiap variasi gaya beban dan koefisien gesek, nilai damage tidak melebihi atau sama dengan nilai satu. Dapat disimpulkan bahwa material *stainless steel* 316L dikategorikan aman sebagai material dasar benda kerja *hip prosthesis* pada model tersebut.

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Kesimpulan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Terdapat hubungan lurus antara tegangan equivalent dengan gaya pembebanan, dimana gaya pembebanan 3.000 kN dibandingkan dengan beban 2.000 kN dan 2.500 kN.
2. Tegangan *equivalent* meningkat pada setiap variasi koefisien gesek. Koefisien gesek 1 dengan variasi beban 3.000 kN mampu menghasilkan tegangan sebesar 1317,6 MPa dimana hasil tegangan tertinggi. Koefisien gesek 0,5 dengan variasi beban 2.000 mampu menghasilkan tegangan sebesar 1081,2 MPa dimana hasil tegangan terendah dibandingkan variasi lain pada titik penempaan maksimal.
3. Material *Stainless Steel 316L* temperature 1000°C dikategorikan aman sebagai material benda kerja *forging* pada model *hip prosthesis*.

#### **5.2 Saran**

Berikut saran yang diberikan penulis untuk mengembangkan penelitian ini adalah:

1. Untuk mengembangkan penelitian ini, penelitian dilanjutkan dengan pengambilan data asli di lapangan (eksperimen).
2. Perlu dilakukan simulasi dengan perangkat lunak yang lebih spesifik dalam kegiatan manufaktur *forming*.
3. Sebagai pengembangan analisis pada benda kerja hasil penempaan, dapat dilakukan analisis dengan menggunakan parameter temperatur benda kerja.

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

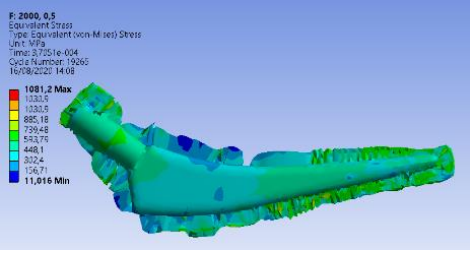
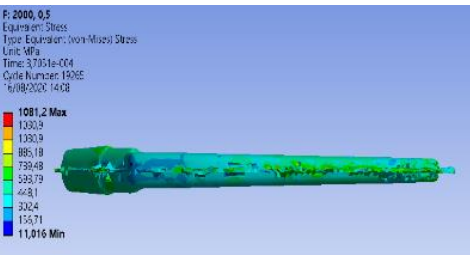
### DAFTAR PUSTAKA

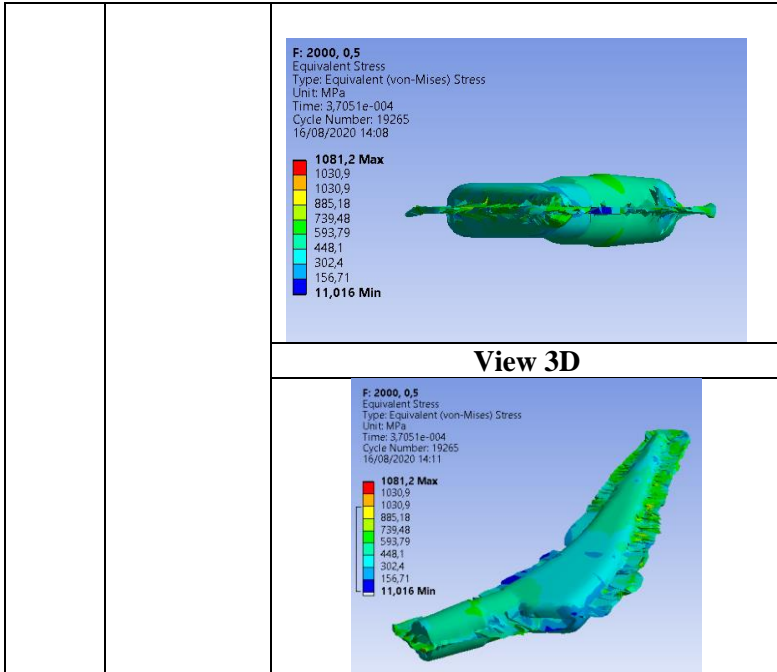
- Ahmed E., Ali A., M.Sabaer, and Ahmed Nassef. (2019). FEM-Based Study of Precision Hard Turning of Stainless Steel 316L. *Materials*
- Altan, T., Ngaile, G., & Shen, G. (2005). *Cold and Hot Forging : Fundamentals and Applications*. ASM International.
- Ambrosio, Luigi. 2017. *Biomedical Composites* 2nd Edition. Woodheat Publishing. India: Spi Global
- ASM International.2015. Volume 14A *Metalworking: Bulk Forming*. Ohio : ASM International
- ASTM F138-13a. 2013. *Standard Specification for Wrought 18Chromium – 14 Nickel – 2.5 Molybdenum Stainless Steel Bar and Wire for Surgical Implants (UNS S31673)*. *United States: Association of Standard Testing Materials*.
- Badan Penelitian dan Pengembangan Kesehatan Kementerian Kesehatan Republik Indonesia. 2018. *Riset Kesehatan Dasar*. Jakarta : Kementerian Kesehatan Republik Indonesia
- Battin A.A. 2009. *Finite Element Analysis of Forging*. The University of Texas Arlington.
- Cahyanto, Arief. 2009. *Makalah Biomaterial*. Bandung : Universitas Padjajaran
- Chandrasekaran, M. (2010). *Forging of metals and alloys for biomedical applications. 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*. Ohio : ASM International
- Fernández-Abia, A. I., García, J. B., & López de Lacalle, L. N. (2013). *High-performance machining of austenitic stainless steels. Machining and Machine-Tools*, 29–90
- Gardner, L., Insausti, A., Ng, K. T., & Ashraf, M. (2010). *Elevated temperature material properties of stainless steel alloys. Journal of Constructional Steel Research*, 66(5), 634–647.

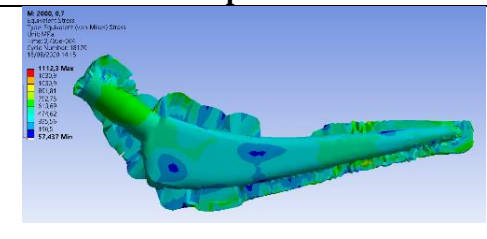
- Hojjat G.A., Sezek ,Sinan., Alsarani, Akgün. 2015. Analysis Of Hip Prosthesis Production With Forging Using The Finite Element Method. Atatürk University, Mechanical Engineering Department.  
[https://www.engineeringtoolbox.com/friction-coefficients-d\\_778.html](https://www.engineeringtoolbox.com/friction-coefficients-d_778.html) (diakses tanggal 15 Juli 2020)
- Hutton, D. V. (2004). *Fundamentals of Finite Element Analysis*. he McGraw–Hill Companies.
- Iskandar, Norman., Rusnaldy., & Haryanto, Ismoyo. 2012. Studi Analisis Pengaruh Variasi Beban Dan Kecepatan Terhadap Laju Keausan Dies Pada Proses Cold Upset Forging Aluminium Dengan Menggunakan Software Berbasis FEM. Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Diponegoro
- Jin, W., & Chu, P. K. (2017). Orthopedic Implants. *Reference Module in Biomedical Sciences*.
- Jones, L. C., Timmie Topoleski, L. D., & Tsao, A. K. (2017). *Biomaterials in orthopaedic implants. Mechanical Testing of Orthopaedic Implants, 17–32*
- Logan, D. L. (2012). *A First Course in the Finite Element Method* (T. Altieri (Ed.); Fifth Edit). Global Engineering: Christopher M. Shortt.
- M. Maarefdoust & M. Kadkhokayan.2010. *Simulation and analysis of hot forging process for industrial locking gear elevators. Journal of Department of Mechanical Engineering Ferdowsi University of Mashhad.*
- Maburi, Efendi. 2012. Aplikasi Severe Plastic Deformation (SPD) dan Heavy Cold Rolling pada Baja Tahan Karat Austenitik 316L. Tangerang : Pusat Penelitian Metalurgi – LIP
- Mondelson, 1983, Plasticity : Teory and Aplication, Publising Companies, Florida.)
- Raines, T. (2013). *Forging Vs. Casting : Wich is Better?*
- Rao, 1987, Manufacturing Technology, Foundry, Forming dan Welding, McGraw-Hill Company, New Delhi).

- Roque, C. M. O. L., & Button, S. T. (2000). Application of the finite element method in cold forging processes. *Revista Brasileira de Ciencias Mecanicas/Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences*, 22(2), 189–202.
- Singer, 1995, Ilmu Kekuatan Bahan edisi ke 2, Erlangga, Jakarta
- Sluzalec, Andrzej. 2003. Theory of Metal Forming Plasticity. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- 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
- Umbrello, D., M'Saoubi, R., & Outeiro, J. C. (2007). The influence of Johnson–Cook material constants on finite element simulation of machining of AISI 316L steel. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47(3-4), 462–470
- Williams, J., & Fatemi, A. (2007). Fatigue performance of forged steel and ductile cast iron crankshafts. *SAE Technical Papers*, 1–32.
- Yang, K., & Ren, Y. (2010). Nickel-free austenitic stainless steels for medical applications. *Science and Technology of Advanced Materials*, 11(1), 014105
- Z. Marcianak, J.L.Duncan, S.J, Hu, 2002, Mechanich of Sheet Metal Forming, LaserWord Private Limited, Chennai, India.)

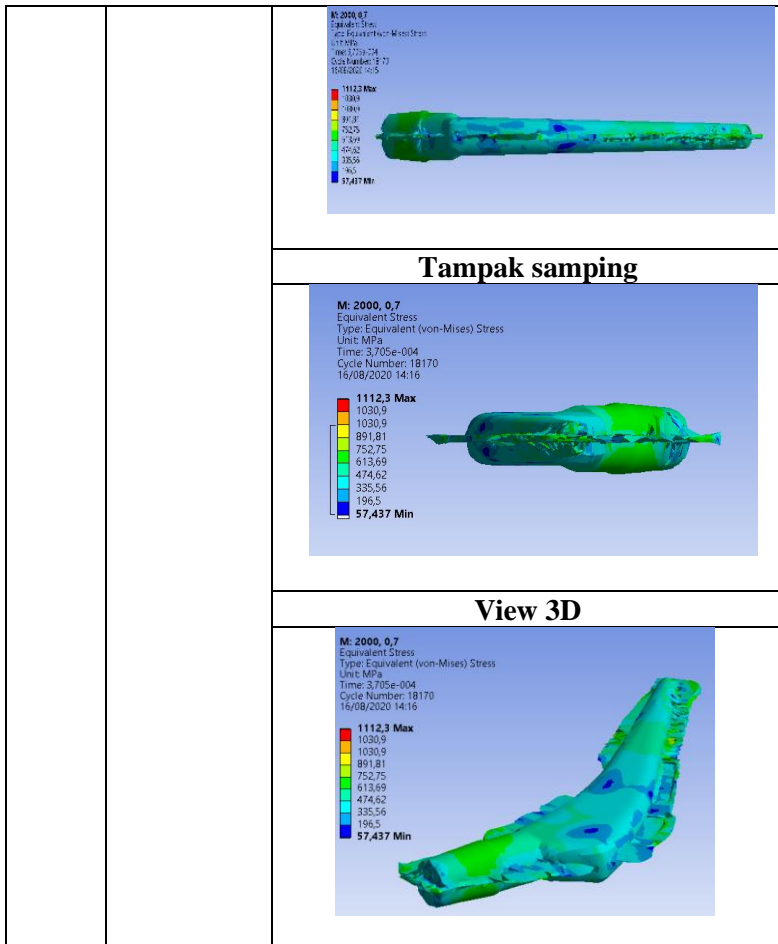
## LAMPIRAN

Gaya (kN)	Friction Coefficient	Keterangan
2.000	0,5	<b>Tampak atas</b>
		 <p>F: 2000, 0,5 Equivalent Stress Type: Equivalent (von-Mises) Stress Unit: MPa Time: 3,7051e-004 Cycle Number: 19265 16/08/2020, 14:08</p> <p>1081,2 Max 1330,5 885,18 739,48 593,79 448,1 302,4 156,71 11,016 Min</p>
		<b>Tampak depan</b>
 <p>F: 2000, 0,5 Equivalent Stress Type: Equivalent (von-Mises) Stress Unit: MPa Time: 3,7051e-004 Cycle Number: 19265 16/08/2020, 14:08</p> <p>1081,2 Max 1330,9 885,18 739,48 593,79 448,1 302,4 156,71 11,016 Min</p>		
<b>Tampak samping</b>		

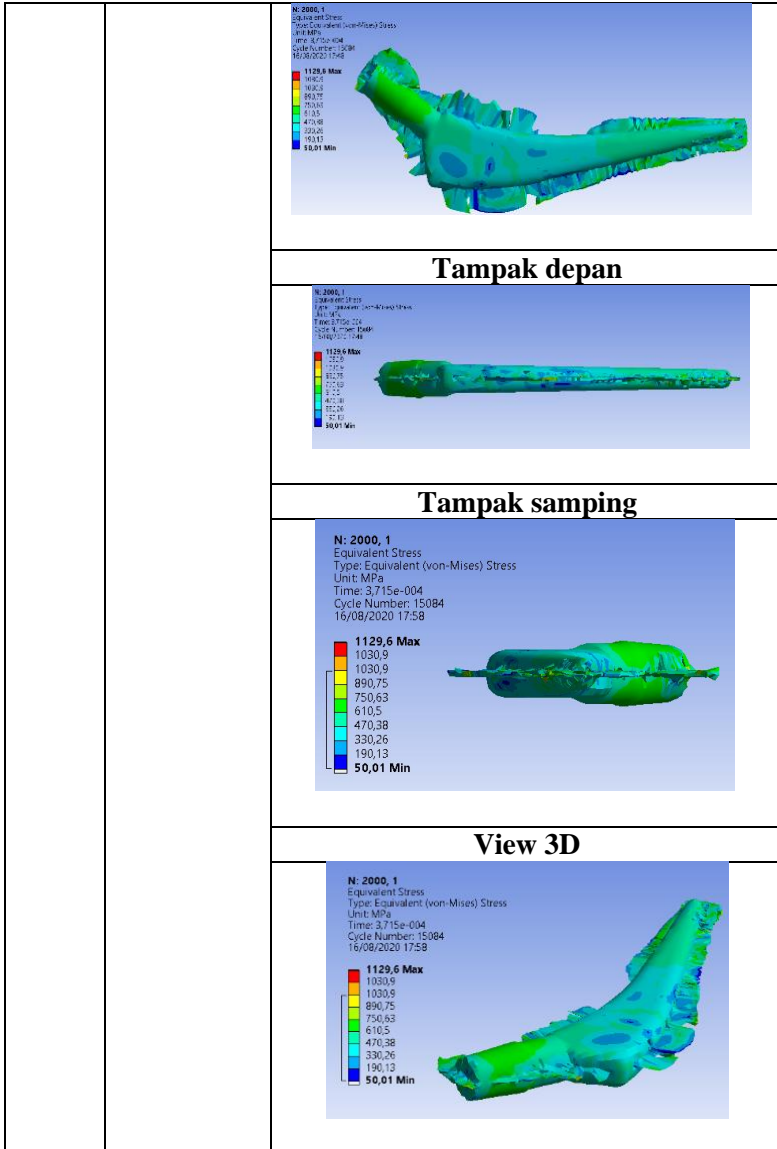


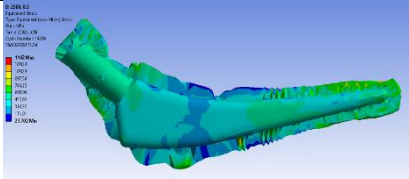
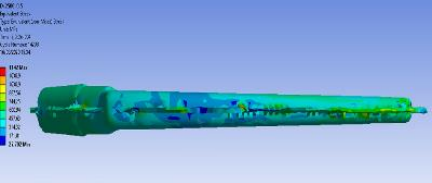
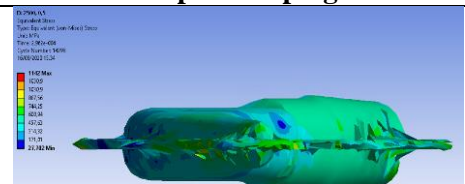
Gaya (kN)	Friction Coefficient	Keterangan
2.000	0,7	<p><b>Tampak atas</b></p>  <p><b>M: 2000, 0,7</b>          Equivalent Stress          Type: Equivalent (von-Mises) Stress          Unit: MPa          Time: 3,7051e-004          Cycle Number: 19265          16/08/2020 14:15</p> <p><b>1192,3 Max</b>          1030,9          885,18          739,48          593,79          448,1          302,4          156,71  <b>85,487 Min</b></p>
		<p><b>Tampak depan</b></p>

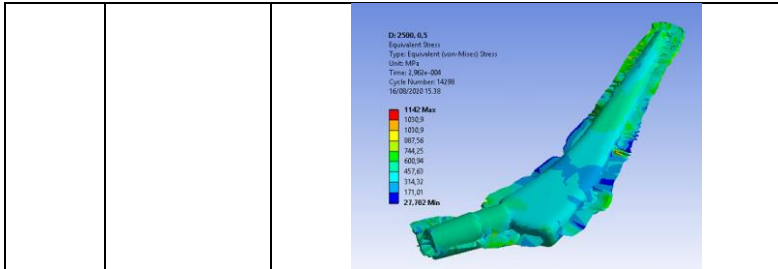




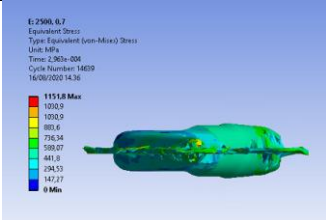
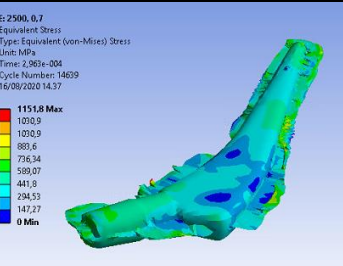
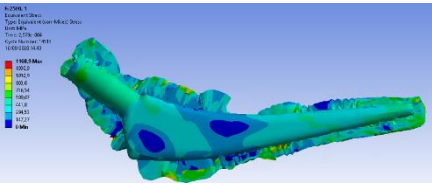
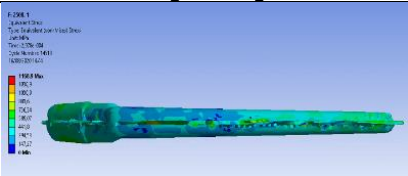
Gaya (kN)	Friction Coefficient	Keterangan
2.000	1	Tampak atas



Gaya (kN)	Friction Coefficient	Keterangan
2.500	0,5	<b>Tampak atas</b>
		
		<b>Tampak depan</b>
		
		<b>Tampak samping</b>
		
<b>View 3D</b>		

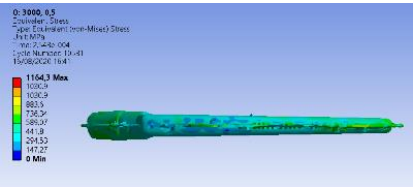
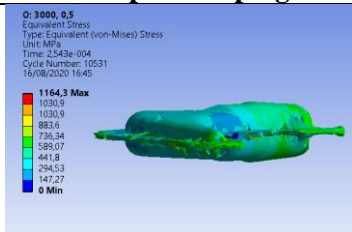
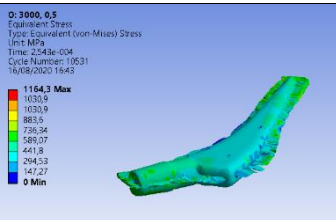


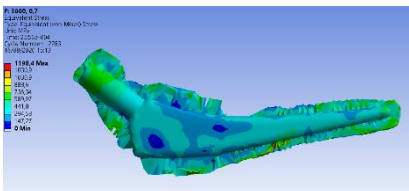
Gaya (kN)	Friction Coefficient	Keterangan
2.500	0,7	<b>Tampak atas</b>
		<b>Tampak depan</b>
		<b>Tampak samping</b>

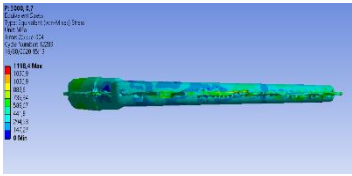
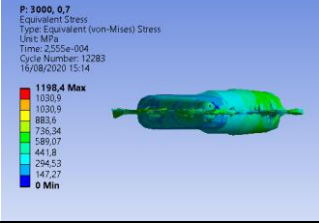
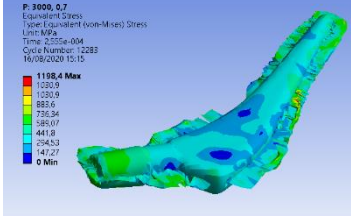
		 <p>E: 2500,07 Equivalent Stress Type: Equivalent (von-Mises) Stress Unit: MPa Time: 2,263e-004 Cycle Number: 14609 14/09/2020 14:30</p> <p>1151,8 Max 1020,9 883,6 736,34 589,07 441,8 294,53 147,27 0 Min</p>
		<p style="text-align: center;"><b>View 3D</b></p>  <p>E: 2500,07 Equivalent Stress Type: Equivalent (von-Mises) Stress Unit: MPa Time: 2,263e-004 Cycle Number: 14609 14/09/2020 14:37</p> <p>1151,8 Max 1020,9 883,6 736,34 589,07 441,8 294,53 147,27 0 Min</p>
<p><b>Gaya (kN)</b></p>	<p><b>Friction Coefficient</b></p>	<p style="text-align: center;"><b>Keterangan</b></p>
<p><b>2.500</b></p>	<p><b>1</b></p>	<p style="text-align: center;"><b>Tampak atas</b></p>  <p>E: 2500,07 Equivalent Stress Type: Equivalent (von-Mises) Stress Unit: MPa Time: 2,263e-004 Cycle Number: 14609 14/09/2020 14:40</p> <p>1151,8 Max 1020,9 883,6 736,34 589,07 441,8 294,53 147,27 0 Min</p> <p style="text-align: center;"><b>Tampak depan</b></p>  <p>E: 2500,07 Equivalent Stress Type: Equivalent (von-Mises) Stress Unit: MPa Time: 2,263e-004 Cycle Number: 14609 14/09/2020 14:41</p> <p>1151,8 Max 1020,9 883,6 736,34 589,07 441,8 294,53 147,27 0 Min</p> <p style="text-align: center;"><b>Tampak samping</b></p>

<b>View 3D</b>		

Gaya (kN)	Friction Coefficient	Keterangan
<b>3.000</b>	<b>0,5</b>	<b>Tampak atas</b>
		<b>Tampak depan</b>

		 <p>0: 3000, 0,0 Equivalent Stress Type: Equivalent (von-Mises) Stress Unit: MPa Time: 2,543e-004 Cycle Number: 10431 16/08/2020 16:41</p> <p>1164,3 Max 1030,9 1030,9 883,6 736,34 589,07 441,8 294,53 147,27 0 Min</p>
		<b>Tampak samping</b>
		 <p>0: 3000, 0,5 Equivalent Stress Type: Equivalent (von-Mises) Stress Unit: MPa Time: 2,543e-004 Cycle Number: 10531 16/08/2020 16:45</p> <p>1164,3 Max 1030,9 1030,9 883,6 736,34 589,07 441,8 294,53 147,27 0 Min</p>
		<b>View 3D</b>
		 <p>0: 3000, 0,5 Equivalent Stress Type: Equivalent (von-Mises) Stress Unit: MPa Time: 2,543e-004 Cycle Number: 10531 16/08/2020 16:43</p> <p>1164,3 Max 1030,9 1030,9 883,6 736,34 589,07 441,8 294,53 147,27 0 Min</p>

Gaya (kN)	Friction Coefficient	Keterangan
<b>3.000</b>	<b>0,7</b>	<b>Tampak atas</b>
		 <p>0: 3000, 0,7 Equivalent Stress Type: Equivalent (von-Mises) Stress Unit: MPa Time: 2,543e-004 Cycle Number: 10531 16/08/2020 15:11</p> <p>1164,3 Max 1030,9 1030,9 883,6 736,34 589,07 441,8 294,53 147,27 0 Min</p>
		<b>Tampak depan</b>

		 <p>P: 3000_0,7 Equivalent Stress Type: Equivalent (von-Mises) Stress Unit: MPa Time: 2,555e-004 Cycle Number: 12283 16/08/2020 15:14</p> <p>1198,4 Max 1030,9 885,6 736,34 589,07 441,8 296,53 147,27 0 Min</p>
<b>Tampak samping</b>		
 <p>P: 3000_0,7 Equivalent Stress Type: Equivalent (von-Mises) Stress Unit: MPa Time: 2,555e-004 Cycle Number: 12283 16/08/2020 15:14</p> <p>1198,4 Max 1030,9 885,6 736,34 589,07 441,8 296,53 147,27 0 Min</p>	<b>View 3D</b>	
 <p>P: 3000_0,7 Equivalent Stress Type: Equivalent (von-Mises) Stress Unit: MPa Time: 2,555e-004 Cycle Number: 12283 16/08/2020 15:14</p> <p>1198,4 Max 1030,9 885,6 736,34 589,07 441,8 296,53 147,27 0 Min</p>		

Gaya (kN)	Friction Coefficient	Keterangan
3.000	1	Tampak atas



		<p><b>Tampak depan</b></p>
		<p><b>Tampak samping</b></p>
		<p><b>View 3D</b></p>

## BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di kota Balikpapan pada tanggal 10 Juli 1998. Penulis merupakan anak pertama dari Pasangan Bagus Susetyo dan Siti Kotijah. Pendidikan formal yang ditempuh penulis diawali dengan bersekolah di TK Al-Kautsar (2002-2004), kemudian dilanjutkan dengan SD Muhammadiyah 1 Samarinda (2004-2010). Penulis melanjutkan jenjang pendidikan menengah pertama di SMP Negeri 2 Samarinda (2010-2013) dan pendidikan menengah akhir di SMA Swasta Kharisma Bangsa Tangerang Selatan (2013-2016). Penulis melanjutkan pendidikan ke perguruan tinggi negeri di Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya pada tahun 2016 di Departemen Teknik Mesin FTI-ITS. Fokus bidang studi yang penulis lalui yaitu bidang metalurgi. Dalam kesehariannya, penulis lebih akrab disapa dengan “Ghusti”. Selama menjalani perkuliahan di Departemen Teknik Mesin FTI-ITS, penulis menjabat sebagai Kepala Departemen Hubungan Luar Himpunan Mahasiswa Mesin FTI-ITS (2018-2019). Penulis juga mengikuti kepanduan LKMM Fakultas Teknologi Rekayasa dan Sistem Industri. Penulis juga aktif mengikuti panitia kegiatan organisasi mahasiswa tingkat jurusan hingga tingkat nasional. Selain kepanitiaan dan organisasi, penulis juga aktif sebagai asisten mata praktikum Laboratorium Metalurgi. Penulis terbuka untuk diskusi mengenai Tugas Akhir ini, penulis dapat dihubungi via email [muhammad.ghusti@gmail.com](mailto:muhammad.ghusti@gmail.com).