

**OPTIMASI PROSES *INJECTION MOLDING* DENGAN  
SIMULASI PERILAKU MEKANIK DALAM PEMBUATAN  
*BONE SCREW* BERBASIS POLIMER *BIODEGRADABLE***

**TESIS**

**Disusun untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan Mencapai Gelar Magister  
Program Studi Teknik Industri  
Minat Utama Sistem Manufaktur dan Manajemen Operasi**



**Oleh**

**NANO KOES ARDHIYANTO**

**S801602005**

**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK INDUSTRI  
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS SEBELAS MARET  
SURAKARTA**

**2020**  
*copyright to user*

**OPTIMASI PROSES *INJECTION MOLDING* DENGAN  
SIMULASI PERILAKU MEKANIK DALAM PEMBUATAN  
*BONE SCREW* BERBASIS POLIMER *BIODEGRADABLE***

**TESIS**

**Oleh**

**NANO KOES ARDHIYANTO**

**S801602005**



**Komisi  
Pembimbing**

**Nama**

**Tanda  
Tangan**

**Tanggal**

Pembimbing I

Dr. Eko Pujiyanto, S.Si., M.T.  
NIP. 197006121997021001

*[Handwritten signature]*

29/1/2020

Pembimbing II

Dr. Bambang Suhardi, S.T., M.T.  
NIP. 197405202000121001

*[Handwritten signature]*

2/7/2020

**Telah dinyatakan memenuhi syarat  
pada tanggal 17-01-2020**

**Kepala Program Studi Magister Teknik Industri  
Fakultas Teknik Universitas Sebelas Maret**

*[Handwritten signature]*

**Dr. Eko Pujiyanto, S.Si., M.T.**

**NIP. 197111041999031001**

**OPTIMASI PROSES INJECTION MOLDING DENGAN SIMULASI  
PERILAKU MEKANIK DALAM PEMBUATAN BONE SCREW  
BERBASIS POLIMER BIODEGRADABLE**

**TESIS**

Oleh

**NANO KOES ARDHIYANTO**

**S801602005**

**Jabatan**

**Nama**

**Tanda Tangan**

**Ketua**

Dr. Ir. Lobes Herdiman, M.T.  
NIP. 196410071997021001

**Sekretaris**

Dr. Eko Liquidanu, S.T., M.T.  
NIP. 197101281998021001

**Anggota  
Penguji**

Dr. Eko Pujiyanto, S.Si., M.T.  
NIP. 197006121997021001  
Dr. Bambang Suhardi, S.T., M.T.  
NIP. 197405202000121001

**Telah dinyatakan memenuhi syarat  
pada tanggal 17-01-2020**

**Kepala Program Studi Magister Teknik Industri**

**Fakultas Teknik Universitas Sebelas Maret**

**Dr. Eko Pujiyanto, S.Si., M.T.**

**NIP. 197111041999031001**

iii

*commit to user*

**PERNYATAAN KEASLIAN DAN PERSYARATAN PUBLIKASI**

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa:

1. Tesis yang berjudul: “OPTIMASI PROSES *INJECTION MOLDING* DENGAN SIMULASI PERILAKU MEKANIK DALAM PEMBUATAN *BONE SCREW* BERBASIS POLIMER *BIODEGRADABLE*” ini adalah karya penelitian saya sendiri dan tidak terdapat karya ilmiah yang pernah yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar akademik serta tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang tertulis sebagai acuan yang disebutkan sumbernya, baik dalam naskah karangan dan daftar pustaka. Apabila ternyata di dalam naskah tesis ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur plagiasi, maka saya bersedia menerima sanksi, baik Tesis beserta gelar Magister saya dibatalkan serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku.
2. Publikasi sebagian atau keseluruhan isi Tesis pada jurnal atau forum ilmiah harus menyertakan tim pembimbing sebagai *author* dan Pascasarjana UNS sebagai institusinya. Apabila saya melakukan pelanggaran dari ketentuan publikasi ini, maka saya bersedia mendapatkan sanksi akademik yang berlaku.

Surakarta, 17 Januari 2020  
Mahasiswa,



**NANO KOES ARDHIYANTO**  
**S801602005**

---

Nano Koes Ardhiyanto/ S801602005. 2020. **Optimasi Proses Injection Molding dengan Simulasi Perilaku Mekanik dalam Pembuatan Bone Screw Berbasis Polimer Biodegradable**. TESIS: Pembimbing I: Dr. Eko Pujiyanto, S.Si., M.T. Pembimbing II: Dr. Bambang Suhardi, S.T., M.T. Program Studi Teknik Industri, Program Pascasarjana, Universitas Sebelas Maret, Surakarta.

## ABSTRAK

Sekrup tulang (*Bone Screw*) merupakan sebuah alat yang digunakan untuk menyambung tulang yang mengalami patah melalui proses operasi. Pada umumnya bahan sekrup tulang berasal dari logam, namun sekarang dikembangkan sekrup tulang berbahan polimer *biodegradable*. Polimer *biodegradable* memiliki kelebihan dapat menguraikan dirinya sendiri sehingga tidak memerlukan operasi untuk mengambil sekrup tulang. Selama ini polimer *biodegradable* seperti PLA dan PGA telah banyak digunakan sebagai bahan sekrup tulang sedangkan PMMA dan PVOH belum ada penelitian yang dilakukan pada material tersebut. Penelitian ini menggunakan bahan PLA, PGA, PMMA dan PVOH dengan parameter proses yang berbeda guna mengetahui pengaruh material dan parameter prosesnya serta dibuktikan dengan analisa kekuatan struktur tiap materialnya. Parameter proses yang digunakan dalam penelitian ini antara lain suhu cetakan (*mold temperature*) untuk PLA (20°C, 23,3°C, 26,7°C, 30°C), PGA (60°C, 93,3°C, 126,7°C, 160°C), PMMA (35°C, 50°C, 65°C, 80°C), PVOH (60°C, 66,7°C, 73,3°C, 80°C), suhu leleh (*melt temperature*) untuk PLA (145°C, 160°C, 175°C, 190°C) PGA (220°C, 236,7°C, 253,3°C, 270°C), PMMA (240°C, 253,3°C, 266,7°C, 280°C), PVOH (220°C, 226,7°C, 233,3°C, 240°C), waktu injeksi (*injection time*) untuk PLA (2 detik, 4 detik, 6 detik, 8 detik), PGA ((2 detik, 4 detik, 6 detik, 8 detik), PMMA (2 detik, 4 detik, 6 detik, 8 detik), PVOH (2 detik, 4 detik, 6 detik, 8 detik), waktu pendinginan (*cooling time*) untuk PLA (4 detik, 8 detik, 12 detik, 16 detik), PGA (4 detik, 8 detik, 12 detik, 16 detik), PMMA (4 detik, 8 detik, 12 detik, 16 detik), PVOH (4 detik, 8 detik, 12 detik, 16 detik). Metodologi penelitian dimulai dengan pembuatan produk menggunakan Autodesk Inventor dan dilanjutkan dengan simulasi proses injeksi menggunakan Autodesk Moldflow untuk mendapatkan nilai *warpage* dan *shrinkage*. Setelah mendapatkan faktor dan level optimal melalui metode Taguchi – TOPSIS kemudian diakhiri dengan simulasi kekuatan mekanik menggunakan Autodesk Simulation Mechanical untuk mendapatkan nilai *Von-misses stress* dan *safety factor*. Dari optimasi multi respon didapatkan nilai optimal suhu cetakan (*mold temperature*) PLA 30°C, PGA 60°C, PMMA 65°C, PVOH 66,7°C, suhu leleh (*melt temperature*) PLA 145°C, PGA 220°C, PMMA 240°C, PVOH 233,3°C, waktu injeksi (*injection time*) PLA 6 detik, PGA 6 detik, PMMA 8 detik, PVOH 8 detik, waktu pendinginan (*cooling time*) PLA 8 detik, PGA 12 detik, PMMA 8 detik, PVOH 16 detik. Simulasi *injection molding* mendapatkan nilai optimal *warpage* PLA 1,119 mm, PGA 1,119 mm, PMMA 1,118 mm, PVOH 1,120 mm. Simulasi kekuatan mekanik mendapatkan nilai *Von misses stress* PLA 821,7383 N/mm<sup>2</sup>, PGA 3434,306 N/mm<sup>2</sup>, PMMA 46790,83 N/mm<sup>2</sup>, PVOH 8002,26 N/mm<sup>2</sup> dan nilai *Safety factor* PLA 2,8575, PGA 1,5327, PMMA 0,2204, PVOH 0,8714. Hasil analisa pada penelitian ini membuktikan adanya pengaruh *defect* terhadap kekuatan material. Nilai *Von misses stress* tertinggi terdapat pada material PMMA sebesar 46790,83 N/mm<sup>2</sup>, terendah pada material PLA sebesar 821,7383 N/mm<sup>2</sup> sedangkan *Safety factor* tertinggi terdapat pada material PLA sebesar 2,8575, terendah pada material PMMA sebesar 0,2204.

*commit to user*

**Kata Kunci:** Sekrup tulang, polimer *biodegradable*, simulasi, *injection molding*, metode Taguchi-TOPSIS, *defect*, analisa struktur.

---

---

Nano Koes Ardhiyanto/ S801602005. 2020. **Process Optimization of Injection Molding with Mechanical Behaviour Simulation for Bone Screw Manufacturing based of Biodegradable Polymers**. THESIS: Principal Advisor: Dr. Eko Pujiyanto, S.Si., M.T. Co-Advisor: Dr. Bambang Suhardi, S.T., M.T. Master Program of Industrial Engineering, Sebelas Maret University, Surakarta.

## ABSTRACT

*Bone screw is a device used to connect broken bones through surgery. Bone screw material is generally derived from metal, but now developed bone screw made from biodegradable polymers. Biodegradable polymers have the advantage of being able to decompose themselves so that they do not require surgery to remove bone screws. So far, biodegradable polymers such as PLA and PGA have been widely used as bone screw materials while PMMA and PVOH have not been conducted studies on these materials. This study uses PLA, PGA, PMMA and PVOH materials with different process parameters to determine the effect of the material and its process parameters and is proven by analyzing the structural strength of each material. Process parameters used in this study include mold temperature for PLA (20°C, 23.3°C, 26.7°C, 30°C) PGA (20°C, 23.3°C, 26.7°C, 30°C), PMMA (60°C, 93.3°C, 126.7°C, 160°C), PMMA (35°C, 50°C, 65°C, 80°C), PVOH (60°C, 66.7°C, 73.3°C, 80°C), melt temperature for PLA (145°C, 160°C, 175°C, 190°C) PGA (220°C, 236.7°C, 253.3°C, 270°C), PMMA (240°C, 253.3°C, 266.7°C, 280°C), PVOH (220°C, 226.7°C, 233.3°C, 240°C), injection time for PLA (2 seconds, 4 seconds, 6 seconds, 8 seconds), PGA (2 seconds, 4 seconds, 6 seconds, 8 seconds), PMMA (2 seconds, 4 seconds, 6 seconds, 8 seconds), PVOH (2 seconds, 4 seconds, 6 seconds, 8 seconds), cooling time for PLA (4 seconds, 8 seconds, 12 seconds, 16 seconds), PGA (4 seconds, 8 seconds, 12 seconds, 16 seconds), PMMA (4 seconds, 8 seconds, 12 seconds, 16 seconds), PVOH (4 seconds, 8 seconds, 12 seconds, 16 seconds). The research methodology begins with the manufacture of products using Autodesk Inventor and continues with the simulation of the injection process using Autodesk Moldflow to obtain warpage and shrinkage values. After obtaining the optimal factors and levels through the Taguchi - TOPSIS method, it is then terminated by mechanical strength simulation using Autodesk Mechanical Simulation to obtain the value of Von-misses stress and safety factor. From the multi-response optimization, the optimal mold temperature (PLA 30°C, PGA 60°C, PMMA 65°C, PVOH 66.7°C, melt temperature) PLA 145°C, PGA 220°C, PMMA 240°C, PVOH 233.3°C, injection time (melt temperature) PLA 145°C, PGA 220°C, PMMA 240°C, PVOH 233.3°C, injection time (melt temperature) injection time) PLA 6 seconds, PGA 6 seconds, PMMA 8 seconds, PVOH 8 seconds, cooling time (PLA cooling time) 8 seconds, PGA 12 seconds, PMMA 8 seconds, PVOH 16 seconds. Injection molding simulation obtained the optimal value of PLA warpage 1,119 mm, PGA 1,119 mm, PMMA 1,118 mm, PVOH 1,120 mm. Mechanical strength simulations get Von misses stress PLA 821.7383 N/mm<sup>2</sup>, PGA 3434,306 N/mm<sup>2</sup>, PMMA 46790.83 N/mm<sup>2</sup>, PVOH 8002.26 N/mm<sup>2</sup> and Safety factor PLA value 2.8575, PGA 1.5327, PMMA 0.2204, PVOH 0.8714. The results of the analysis in this study prove the effect of defects on material strength. The highest Von misses stress value is in PMMA material at 46790.83 N/mm<sup>2</sup>, the lowest is in PLA material at 821.7383 N/mm<sup>2</sup> while the highest safety factor is in PLA material at 2.8575, the lowest in PMMA material at 0.2204.*

Keywords: Bone screw, biodegradable polymers, simulation, injection molding, Taguchi method-TOPSIS, defect, structural analysis

---

## PRAKATA

Puji syukur kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis dengan judul “Optimasi Proses *Injection Molding* dengan Simulasi Perilaku Mekanik dalam Pembuatan *Bone Screw* Berbasis Polimer Biodegradable”. Adapun tesis ini disusun sebagai salah satu syarat mendapatkan gelar Magister Teknik Industri di Program Pascasarjana Universitas Sebelas Maret.

Pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih sebesar-besarnya atas dukungan, bimbingan, nasihat, yang tak ternilai kepada pihak-pihak berikut.

1. Allah SWT atas limpahan rahmat dan karunia-Nya.
2. Lilin Royani, S.H., M.Kn., istriku yang selalu menemani dan memberikan dukungan serta dorongan untuk menyelesaikan studi.
3. Bapak Dr. Eko Pujiyanto, S.Si., M.T. selaku Kepala Program Studi Magister Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret.
4. Bapak Dr. Eko Pujiyanto, S.Si., M.T., dan Bapak Dr. Bambang Suhardi, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing serta Bapak Dr. Ir. Lobes Herdiman, M.T., dan Bapak Dr. Eko Liquiddanu, S.T., M.T. selaku dosen penguji yang telah memberikan motivasi, bimbingan ilmu, arahan, kritik, dan saran kepada penulis demi penyelesaian tesis ini.
5. Seluruh dosen Program Studi Magister Teknik Industri Universitas Sebelas Maret yang telah memberikan ilmu dan motivasi berharga selama penulis mengikuti proses perkuliahan.
6. Mbak Yayuk, Mbak Tutik, Mbak Rina, Pak Agus, dan Mas Agus selaku pengurus Tata Usaha (TU) Teknik Industri UNS, serta Mas Ipin selaku admin S2 FT UNS, terima kasih atas segala bantuan administrasi sehingga penulis dapat menyelesaikan urusan administrasi dengan lancar.
7. Keluarga besar Bapak Tikno Sentono dan Ibu Sudaryah, serta keponakan Alif Fauzan Perdana.
8. Mas Mahendra, Beni, Anin, Mega, Mas Andhy, Arinda, Virdha, Garnet dan Rekan-rekan Program Magister Teknik Industri Universitas Sebelas Maret atas doa, dukungan, dan kerja sama yang telah diberikan.
9. Diriku sendiri karena tidak menyerah dalam menyelesaikan studi dan terus menuntut ilmu.
10. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa tesis ini masih jauh dari sempurna dan banyak memiliki kekurangan. Oleh karena itu penulis membuka diri atas segala kritik, masukan dan saran yang membangun. Akhir kata, semoga tesis ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca sekalian.

Surakarta, Januari 2020

*commit to user*

Penulis

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	i
<b>LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING TESIS</b> .....	ii
<b>LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI TESIS</b> .....	iii
<b>SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TESIS</b> .....	iv
<b>ABSTRAK</b> .....	v
<b>PRAKATA</b> .....	vii
<b>DAFTAR ISI</b> .....	viii
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	x
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xii
<b>DAFTAR ISTILAH</b> .....	xiii
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	xiv
<b>BAB I PENDAHULUAN</b>	
A. Latar Belakang .....	1
B. Kebaruan Penelitian .....	3
C. Rumusan Masalah .....	4
D. Tujuan Penelitian .....	4
E. Manfaat Penelitian .....	4
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b>	
A. Landasan Teori .....	5
1. Sekrup Tulang ( <i>Bone Screw</i> ) .....	5
2. Polimer Biodegradable .....	5
3. Metode Taguchi .....	8
4. TOPSIS .....	18
5. Simulasi <i>Injection Molding</i> .....	19
6. Analisis Struktur Mekanik .....	21
B. Posisi Penelitian .....	21
C. Kerangka Berpikir .....	24
D. Hipotesis .....	25
<b>BAB III METODE PENELITIAN</b>	
A. Jenis Penelitian .....	26
B. Tatalaksana Penelitian .....	26
C. Tahap Identifikasi Awal .....	29



D. Tahap Analisis dan Penarikan Kesimpulan .....	31
<b>BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN</b>	
A. Penentuan Variabel Respon .....	32
B. Penentuan Faktor dan Level .....	33
C. Penentuan <i>Orthogonal Array</i> .....	34
D. Pengujian Untuk <i>Memperoleh</i> Nilai Respon .....	36
E. Perhitungan Nilai SNR .....	39
F. Perhitungan TOPSIS .....	41
G. Perhitungan Level Terbaik .....	44
H. Analisis Struktural .....	46
I. Analisis Hasil Simulasi .....	47
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN</b>	
A. Simpulan .....	53
B. Saran .....	54
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	55
<b>LAMPIRAN</b> .....	57



## DAFTAR TABEL

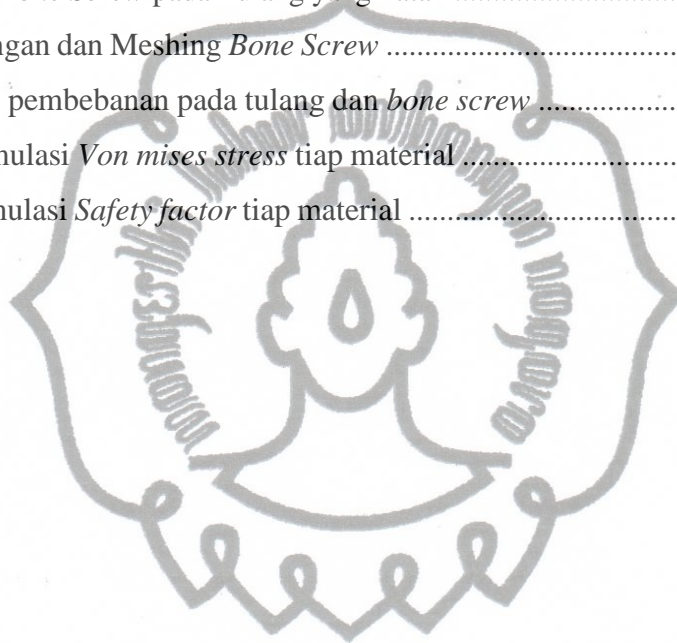
Tabel 2.1 <i>Orthogonal Array</i> $L_4(2^3)$ .....	14
Tabel 2.2 Pola pembaur desain .....	15
Tabel 2.3 Posisi Penelitian .....	22
Tabel 3.1 Material data sheet dari masing-masing polimer <i>biodegradable</i> .....	30
Tabel 4.1 Faktor material PLA .....	33
Tabel 4.2 Faktor material PGA .....	33
Tabel 4.3 Faktor material PMMA .....	34
Tabel 4.4 Faktor material PVOH .....	34
Tabel 4.5 Data trial PLA .....	35
Tabel 4.6 Data trial PGA .....	35
Tabel 4.7 Data trial PMMA .....	36
Tabel 4.8 Data trial PVOH .....	36
Tabel 4.9 Data respon simulasi Moldflow PLA .....	37
Tabel 4.10 Data respon simulasi Moldflow PGA .....	37
Tabel 4.11 Data respon simulasi Moldflow PMMA .....	38
Tabel 4.12 Data respon simulasi Moldflow PVOH .....	38
Tabel 4.13 Hasil perhitungan nilai SNR PLA .....	39
Tabel 4.14 Hasil perhitungan nilai SNR PGA .....	40
Tabel 4.15 Hasil perhitungan nilai SNR PMMA .....	40
Tabel 4.16 Hasil perhitungan nilai SNR PVOH .....	41
Tabel 4.17 Hasil perhitungan <i>Relative Closeness to The Idea Solution</i> PLA .....	42
Tabel 4.18 Hasil perhitungan <i>Relative Closeness to The Idea Solution</i> PGA .....	42
Tabel 4.19 Hasil perhitungan <i>Relative Closeness to The Idea Solution</i> PMMA .....	43
Tabel 4.20 Hasil perhitungan <i>Relative Closeness to The Idea Solution</i> PVOH .....	43
Tabel 4.21 Tabel Respon TOPSIS PLA .....	44
Tabel 4.22 Tabel Respon TOPSIS PGA .....	44
Tabel 4.23 Tabel Respon TOPSIS PMMA .....	44
Tabel 4.24 Tabel Respon TOPSIS PVOH .....	45
Tabel 4.25 Level Terbaik Masing-masing Faktor .....	45
Tabel 4.26 Nilai optimal .....	45
Tabel 4.27 Properties untuk material yang digunakan dalam penelitian .....	46

Tabel 4.28 Nilai <i>Von misses stress</i> .....	49
Tabel 4.29 Nilai <i>Safety factor</i> .....	51



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Sekrup Tulang ( <i>Bone Screw</i> ) .....	5
Gambar 2.2 Faktor-faktor yang mempengaruhi karakteristik kualitas .....	10
Gambar 2.3 L4 <i>Linear Graph</i> .....	14
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian .....	28
Gambar 3.2 Dimensi <i>Bone Screw</i> .....	30
Gambar 4.1 <i>Gating System</i> Cetakan .....	32
Gambar 4.2 Aplikasi <i>Bone Screw</i> pada Tulang yang Patah .....	46
Gambar 4.3 Perancangan dan Meshing <i>Bone Screw</i> .....	47
Gambar 4.4 Simulasi pembebanan pada tulang dan <i>bone screw</i> .....	48
Gambar 4.5 Hasil simulasi <i>Von mises stress</i> tiap material .....	49
Gambar 4.6 Hasil simulasi <i>Safety factor</i> tiap material .....	51



## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Hasil <i>Running</i> Optimasi Menggunakan <i>Autodesk Moldflow</i> .....	57
Lampiran 2 Hasil <i>Running</i> Analisis Struktural Menggunakan <i>Autodesk Simulation Mechanical</i> .....	61



*commit to user*