

SKRIPSI

**EVALUASI STRUKTUR TELAPAK KAKI
PROSTETIK TIPE *SOLID ANKLE CUSHION*
HEEL DENGAN *FINITE ELEMENT ANALYSIS*
BERDASARKAN STANDAR ISO 10328**



Oleh :

ACHMAD IMAM GHOZALI

NPM. 21036010042

**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK DAN SAINS
UNIVERSITAS PEMBANGUNAN NASIONAL "VETERAN"
JAWA TIMUR
2025**

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

EVALUASI STUKTUR TELAPAK KAKI PROSTETIK TIPE *SOLID ANKLE CUSHION HEEL* DENGAN *FINITE ELEMENT ANALYSIS* BERDASARKAN STANDAR ISO 10328

Disusun oleh:

ACHMAD IMAM GHOZALI
NPM. 21036010042

Telah diuji, dipertahankan dan diterima oleh Tim Penguji Skripsi Program Studi
Teknik Mesin Fakultas Teknik & Sains
Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Jawa Timur
Pada Hari Jum'at, 28 November 2025

Dosen Penguji 1

Dosen Pembimbing


Ndaru Adveno, S.Si., M.T.
NIP. 199001252024061001


Dr. Wahyu Dwi Lestari, S.Pd., MT.
NIP. 199101142025062005

Dosen Penguji 2

Koordinator Program Studi Teknik Mesin


Radissa Dzaky Issafira, S.T., M.Sc.
NIP. 199404282022032011


Dr. T. Ir. Luluk Edahwati, MT.
NIP. 19640611 199203 2 001

Mengetahui,
Dekan Fakultas Teknik Dan Sains
Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Jawa Timur


Prof. Dr. Dra. Jarivah, M.P.
NIP. 19650403 199103 2 001



KEMENTERIAN PENDIDIKAN TINGGI, SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS PEMBANGUNAN NASIONAL "VETERAN" JAWA TIMUR
FAKULTAS TEKNIK DAN SAINS
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN

Jalan Raya Rungkut Madya, Gunung Anyar, Surabaya 60294 Telp. 031-8782179
Email: teknikmesin@upnjatim.ac.id, Laman : http://tekmesin.upnjatim.ac.id/

KETERANGAN BEBAS REVISI

Mahasiswa di bawah ini:

Nama : Achmad Imam Ghozali
NPM : 21036010042
Program Studi : Teknik Mesin
Tanggal Sidang ~~Sempro~~/Semhas : 28 November 2025

Telah mengerjakan revisi / ~~tidak ada revisi~~ *) ~~PRA RENCANA (DESAIN) / SEMINAR PROPOSAL /~~
SKRIPSI /TUGAS AKHIR Ujian Lisan Periode II, TA . 2025/2026.

Dengan judul : **EVALUASI STRUKTUR TELAPAK KAKI PROSTETIK TIPE *SOLID ANKLE***
***CUSHION HEEL* DENGAN *FINITE ELEMENT ANALYSIS* BERDASARKAN**
STANDAR ISO 10328

Dosen Penguji yang memerintahkan revisi:

1. Ndaru Adyono, S.Si., M.T.
2. Radissa Dzaky Issafira, S.T., M.Sc.

Surabaya, 05 Desember 2025

Menyetujui,
Dosen Pembimbing

Dr. Wahyu Dwi Lestari, S.Pd., MT.

NIP. 199101142025062005

Catatan: *) coret yang tidak perlu

SURAT PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Achmad Imam Ghozali
NPM : 21036010042
Program : Sarjana (S1)
Program Studi : Teknik Mesin
Fakultas : Teknik & Sains

Menyatakan bahwa dalam dokumen ilmiah Skripsi ini tidak terdapat bagian dari karya ilmiah lain yang telah diajukan untuk memperoleh gelar akademik di suatu lembaga Pendidikan Tinggi, dan juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang/lembaga lain, kecuali yang secara tertulis disitasi dalam dokumen ini dan disebutkan secara lengkap dalam daftar pustaka.

Dan saya menyatakan bahwa dokumen ilmiah ini bebas dari unsur-unsur plagiasi. Apabila dikemudian hari ditemulan indikasi plagiat pada Skripsi ini, saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya tanpa ada paksaan dari siapapun juga dan untuk dipergunakan sebagaimana mestinya.

Surabaya, 05 Desember 2025

Yang Membuat pernyataan



Achmad Imam Ghozali
NPM. 21036010042

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis hanturkan kepada Allah SWT atas segala berkah dan karunianya penulis dapat menyelesaikan penelitian ini yang berjudul **“EVALUASI STRUKTUR TELAPAK KAKI PROSTETIK TIPE *SOLID ANKLE CUCHION HEEL* DENGAN *FINITE ELEMENT ANALYSIS* BERDASARKAN STANDAR ISO 10328”**.

Penulis menyadari bahwa dalam menyelesaikan penelitian ini banyak pihak yang telah membantu memberi bimbingan, arahan, dan do’a yang akan selalu Penulis kenang dan syukuri. Oleh karena itu, Penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada :

1. **Ibu Prof. Dr. Dra. Jariyah, M.P** selaku Dekan Fakultas Teknik Dan Sains Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur.
2. **Ibu Dr. Ir. Luluk Edahwati, M.T.** selaku Koordinator Program Studi Teknik Mesin Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur.
3. **Ibu Dr. Wahyu Dwi Lestari, S.Pd.,MT.** Selaku Dosen Pembimbing Tugas Akhir yang telah memberikan bimbingan, ilmu, motivasi, serta koreksi dalam penulisan dan pengerjaan tugas akhir.
4. **Bapak Ndaru Adyono, S.Si., M.T.** dan **Ibu Radissa Dzaky Issafira, S.T., M.Sc.** selaku Dosen Penguji Tugas Akhir yang telah meluangkan waktu untuk memberikan arahan dan koreksi dalam penulisan dan pengerjaan Tugas Akhir.
5. **Orang Tua terutama Ibu** yang telah memberikan motivasi, perhatian dan doa terbaiknya.
6. **Teman – teman seluruh angkatan Program Studi Teknik Mesin** yang telah memberikan dukungan selama pelaksanaan pengerjaan Tugas Akhir.

Penulis sangat berharap adanya kritik dan saran demi kesempurnaan Tugas Akhir ini. Terakhir, penulis juga berharap semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat dan motivasi bagi pengembangan ilmu pengetahuan di masa yang akan datang.

Surabaya, 28 November 2025

Achmad Imam Ghozali
NPM. 21036010024

ABSTRAK

Ketersediaan kaki prostetik tipe *Solid Ankle Cushion Heel* (SACH) yang ekonomis namun tetap aman secara biomekanik merupakan tantangan utama rehabilitasi fisik di Indonesia. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja struktur rancangan telapak kaki prostetik SACH melalui pendekatan simulasi numerik murni (*computational study*) tanpa melibatkan pengujian eksperimental fisik, menggunakan metode *Finite Element Analysis* (FEA) yang mengacu pada standar uji statis ISO 10328 level P3. Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi data *Ground Reaction Force* (GRF) aktual pada tiga fase *gait* utama dengan pembebanan ekstrem ISO 10328 level P3 untuk mengevaluasi performa beberapa varian material *core* SACH dalam satu kerangka simulasi numerik yang komprehensif. Studi ini membandingkan pengaruh variasi material inti (*core*), yaitu logam Aluminium 7075 T6 dengan material polimer ekonomis *nylon series 6* serta UHMWPE terhadap distribusi deformasi, tegangan *von Mises*, dan faktor keamanan. Hasil analisis menunjukkan adanya *trade-off* karakteristik mekanik yang signifikan antar material. Aluminium 7075 T6 menghasilkan nilai rigiditas dan faktor keamanan tertinggi, sedangkan material berbasis polimer menunjukkan karakteristik deformasi elastis yang lebih besar yang berperan krusial dalam mekanisme peredaman guncangan (*shock absorption*) untuk kenyamanan pengguna. Namun, analisis batas aman menunjukkan bahwa material UHMWPE memiliki risiko kegagalan struktural pada pembebanan ekstrem. Penelitian ini menyimpulkan bahwa *nylon series 6* merupakan material alternatif paling optimal yang menawarkan keseimbangan antara kekuatan, bobot ringan, dan biaya rendah. Secara keseluruhan, hasil simulasi membuktikan bahwa material *nylon series 6* dan aluminium 7075 T6 memiliki nilai kekuatan yang memenuhi kriteria batas aman pada standar uji statis ISO 10328.

Kata Kunci: kaki prostetik SACH, *finite element analysis*, ISO 10328, material *core*, faktor keamanan.

ABSTRACT

The availability of cost-effective yet biomechanically safe Solid Ankle Cushion Heel (SACH) prosthetic feet presents a major challenge for physical rehabilitation in Indonesia. This study aims to evaluate the structural performance of a SACH prosthetic foot design using Finite Element Analysis (FEA) in accordance with the ISO 10328 level P3 static test standard. This study compares the effects of core material variations, namely aluminum 7075 T6 against economical nylon series 6 and UHMWPE polymers, on stress distribution, deformation, and Safety Factors (SF) during gait cycle phases and maximum loading. The simulation was conducted under frictional contact boundary conditions to represent realistic interactions between the foot and the support. The analysis results showed a significant trade-off in mechanical characteristics between materials. Aluminum 7075 T6 produced the highest rigidity and Safety Factor, making it highly effective for heavy load applications and high-activity users. In contrast, polymer-based materials exhibited greater elastic deformation compared to metal. This deformation phenomenon in polymer materials plays a crucial role in the shock absorption mechanism to enhance user comfort. However, the safety limit analysis indicated that UHMWPE poses a risk of structural failure under extreme loading conditions. This study concludes that nylon series 6 is the most optimal alternative material, offering a balance between strength, lightweight properties, and cost-efficiency. Overall, the simulation results demonstrate that nylon series 6 and aluminum 7075 T6 possess strength values that meet the safety criteria of the ISO 10328 level P3 standard.

Keywords: SACH prosthetic foot, finite element analysis, ISO 10328, core material, safety factor

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI	ii
KETERANGAN BEBAS REVISI.....	iii
SURAT PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	iv
KATA PENGANTAR	v
ABSTRAK.....	vi
<i>ABSTRACT</i>	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Batasan Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Penelitian Terkait Riset Material dan Analisis Kaki Prostetik.....	5
2.2 Konsep Kaki Prostetik.....	6
2.2.1 Jenis – Jenis Kaki Prostetik	7
2.2.1.1 Kaki Prostetik Konvensional.....	8
2.2.1.2 Kaki Prostetik <i>Energy Storing and Recovery</i> (ESR).....	9
2.2.1.3 Kaki Prostetik Bionik	9
2.3 <i>Solid Ankle Cushion Heel</i> (SACH)	9
2.3.1 Komponen Kaki Prostetik SACH	10
2.3.1.1 <i>Core</i>	10
2.3.1.2 <i>Cushion</i>	11
2.3.1.3 <i>Foot Shell</i>	11
2.3.1.4 <i>Adaptor Pyramid</i>	11
2.3.1.5 <i>Adaptor Receiver</i>	12
2.3.1.6 <i>Pylon</i>	12
2.3.1.7 <i>Cap</i>	12
2.3.2 Kelebihan dan Kekurangan Kaki Prostetik SACH	13

2.4	<i>Gait Cycle</i>	13
2.4.1	<i>Heel Strike</i>	14
2.4.2	<i>Mid-stance</i>	14
2.4.3	<i>Toe-off</i>	14
2.5	<i>Ground Reaction Force</i>	15
2.6	Konsep Dasar Mekanika	17
2.6.1	Gaya (<i>Force</i>)	17
2.6.2	Tegangan dan Regangan	18
2.6.3	Deformasi	20
2.6.4	Tegangan <i>von Mises</i>	21
2.6.5	<i>Faktor Keamanan</i>	22
2.7	<i>Finite Element Analysis</i>	23
2.7.1	Pengaplikasian <i>Finite Element Analysis</i>	23
2.7.2	<i>Software</i> Simulasi untuk <i>Finite Element Analysis</i>	24
2.7.3	Teori <i>Mesh Convergence Study</i>	25
2.7.4	Definisi <i>Contact</i> dalam Simulasi.....	27
2.7.5.1	Tipe Kontak (<i>Contact Type</i>).....	27
2.7.5.2	Formulasi Kontak (<i>Contact Formulation</i>)	29
2.8	Standar Pengujian.....	30
2.9	Pemilihan Material untuk <i>Core</i> Kaki Prostetik SACH	31
2.9.1	Aluminium 7075 T6	32
2.9.2	<i>Ultra High Molecular Weight Polyethylene</i> (UHMWPE)	33
2.9.3	<i>Nylon Series 6</i>	34
2.10	<i>Hipotesis</i>	35
BAB III METODE PENELITIAN		36
3.1	Lokasi dan Waktu Penelitian.....	36
3.2	Alat dan Bahan	36
3.3	Diagram Alir Penelitian	36
3.4	Variabel Penelitian	38
3.5	Metode Pengambilan Data	38
3.5.1	Studi Literatur	38
3.5.2	<i>Pre-Processing</i>	38
3.5.2.1	Pembuatan Kontur Telapak Kaki	39
3.5.2.2	Optimasi Topologi <i>Core</i>	41

3.5.2.3 Definisi Material	42
3.5.2.4 Pengaturan <i>Contact</i>	43
3.5.2.5 Penerapan Beban	43
3.5.2.6 <i>Meshing</i>	45
3.5.3 <i>Processing</i>	46
3.5.3.1 <i>Solving</i>	46
3.5.3.2 <i>Mesh Convergence Study</i>	47
3.5.4 <i>Post-Processing</i>	48
3.5.5 Evaluasi Hasil Akhir Simulasi	48
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	49
4.1 Perancangan dan Validasi Model Telapak Kaki SACH.....	49
4.1.1 Metodologi Simulasi	50
4.1.1.1 Pengaturan Tumpuan (<i>Fixed Support</i>)	50
4.1.1.2 Pengaturan Pembebanan (<i>Loading</i>)	51
4.1.2 Uji Konvergensi <i>Mesh</i>	51
4.1.2.1 Hasil Uji Konvergensi <i>Mesh</i>	52
4.1.2.2 Validasi <i>Meshing</i>	54
4.1.3 Verifikasi Metodologi Menggunakan Studi Kasus Sederhana	54
4.2 Analisis Distribusi Gaya dan Kinerja Mekanik pada Fase <i>Gait Cycle</i>	57
4.2.1 Distribusi Deformasi Total.....	57
4.2.2 Distribusi Deformasi Residual	59
4.2.3 Distribusi Tegangan <i>von Mises</i>	60
4.2.4 Distribusi Faktor Keamanan.....	62
4.3 Analisis Hasil Simulasi	63
4.3.1 Analisis Deformasi dan Kekakuan (<i>Stiffness</i>).....	63
4.3.2 Analisis Tegangan Internal (<i>Internal Stress</i>)	66
4.3.3 Analisis Faktor Keamanan dan Kelayakan Desain	67
4.3.4 Evaluasi Akhir dan Implikasi Desain.....	69
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	71
5.1. Kesimpulan.....	71
5.2. Saran.....	72
DAFTAR PUSTAKA	73
LAMPIRAN.....	79

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Jenis Kaki Prostetik	8
Gambar 2.2	Kaki Prostetik Jenis <i>Solid Ankle Cushion Heel</i>	10
Gambar 2.3	<i>Gait Cycle</i> pada Kondisi Normal.....	14
Gambar 2.4	Pengambilan Data GRF Menggunakan <i>Force Plate</i>	16
Gambar 2.5	Grafik Hasil Pengambilan Data GRF	16
Gambar 2.6	Diagram Hubungan Tegangan dan Regangan	19
Gambar 2.7	Contoh Hasil Deformasi yang Terjadi.....	21
Gambar 2.8	Contoh Hasil Tegangan <i>von Mises</i> yang Terjadi.....	22
Gambar 2.9	Contoh dari Penerapan <i>Mesh Convergence Study</i> dalam Simulasi	25
Gambar 2.10	Rekomendasi Nilai <i>Mesh Quality</i>	26
Gambar 2.11	Contoh Perlakuan <i>Contact</i> pada Model Simulasi.....	27
Gambar 2.12	Kondisi Pembebanan Seusai Standar ISO 10328	31
Gambar 2.13	Tabel Rekomendasi Gaya ISO 10328.....	31
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian.....	37
Gambar 3.2	Einstar 3D <i>Scanner</i>	39
Gambar 3.3	Diagram Skematik dari Proses <i>Photogrammetry</i>	39
Gambar 3.4	(a) Mengimpor Model Telapak Kaki dari format STL menjadi Format SolidWork, (b) Pemberian Lubang Diantara Ibu Jari dan Telunjuk Kaki.....	40
Gambar 3.5	Model 3D Telapak Kaki Setelah Melalui Proses <i>Cavity</i>	41
Gambar 3.6	Konsep Desain <i>Core</i>	41
Gambar 3.7	<i>Free Body Diagram</i> dari Penerapan Beban untuk (A) <i>Heel Strike</i> , (B) <i>Mid-stance</i> , (C) <i>Toe-off</i> dan (D) ISO 10328 P3	44
Gambar 4.1	Desain Model 3D Kaki Prostetik SACH	49
Gambar 4.2	Pengapikasian <i>Fixed Support</i>	50
Gambar 4.3	Visualisasi Pembebanan <i>Displacement</i>	51
Gambar 4.4	Grafik Hasil Konvergensi <i>Mesh</i> Terhadap Tegangan <i>von Mises</i>	53
Gambar 4.5	Nilai <i>Skewness</i> dan <i>Orthogonal Quality</i>	54
Gambar 4.6	Aplikasi <i>Fixed Support</i> dan <i>Force</i> pada <i>Cantilever Beam</i>	55
Gambar 4.7	Kontur <i>Equivalent</i> Tegangan <i>von Mises</i> dan Deformasi Total pada <i>Cantilever Beam</i>	55
Gambar 4.8	Komparasi Deformasi Total untuk 3 Varian Material pada kondisi (a) <i>Heel Strike</i> , (b) <i>Mid-stance</i> , (c) <i>Toe-off</i> dan (d) ISO 10328 P3	58

Gambar 4.9	Komparasi Deformasi Residual untuk 3 Varian Material pada kondisi (a) <i>Heel Strike</i> , (b) <i>Mid-stance</i> , (c) <i>Toe-off</i> dan (d) ISO 10328 P3	59
Gambar 4.10	Komparasi Tegangan <i>von Mises</i> untuk 3 Varian Material pada kondisi (a) <i>Heel Strike</i> , (b) <i>Mid-stance</i> , (c) <i>Toe-off</i> dan (d) ISO 10328 P3	61
Gambar 4.11	Komparasi Faktor Keamanan untuk 3 Varian Material pada kondisi (a) <i>Heel Strike</i> , (b) <i>Mid-stance</i> , (c) <i>Toe-off</i> dan (d) ISO 10328 P3	62
Gambar 4.12	Grafik Nilai Deformasi Total.....	64
Gambar 4.13	Grafik Nilai Deformasi Residual	65
Gambar 4.14	Grafik Nilai Tegangan <i>von Mises</i> Maksimal.....	66
Gambar 4.15	Grafik Nilai Faktor Keamanan Minimal.....	68

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu Tekait Analisis Kaki Prostetik	5
Tabel 2.2 Hasil Data GRF	17
Tabel 2.3 Derajat Kemiringan pada Kondisi Pembebanan.....	31
Tabel 2.4 <i>Mechanical Properties</i> dari Aluminium 7075 T6	32
Tabel 2.5 <i>Mechanical Properties</i> dari <i>Ultra High Molecular Weight Polyethylene</i>	33
Tabel 2.6 <i>Mechanical Properties</i> dari <i>Nylon Series 6</i>	34
Tabel 3.1 Dimensi <i>Core</i>	42
Tabel 3.2 Nama Material pada Setiap Komponen Kaki Prostetik SACH.....	42
Tabel 3.3 Properti Mekanik Material dan Referensi	43
Tabel 3.4 Pengaturan <i>Contact</i> pada Setiap Interaksi antar Komponen	43
Tabel 3.5 Detail <i>Input Mesh Control</i>	46
Tabel 3.6 Detail <i>Input</i> dari Pengaturan pada <i>Static Structural</i>	47

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. <i>Assembly</i> dan Keseluruhan <i>Part</i> Kaki Prostetik SACH.....	79
Lampiran 2. Gambar Teknik dari Setiap Komponen Kaki Protetik SACH	80
Lampiran 3. Definisi <i>Engineering</i> Data Material	85
Lampiran 4. Proses <i>Meshing</i>	88
Lampiran 5. Definisi Kontak (<i>Contact Region</i>)	90
Lampiran 6. Pengaturan <i>Boundary Condition</i>	94
Lampiran 7. Studi Konvergensi <i>Mesh</i>	97
Lampiran 8. Biodata Mahasiswa	98