

**DESAIN PRODUK *SPLINT* UNTUK TERAPI KONSERVATIF PASIEN  
FRAKTUR DIAFISIS *METACARPAL* DENGAN METODE *REVERSE*  
*ENGINEERING***

**TESIS**

**Oleh:**

**SATRIO DARMA SUPRIYADI  
NPM 2125021012**



**MAGISTER TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG  
2023**

**DESAIN PRODUK *SPLINT* UNTUK TERAPI KONSERVATIF PASIEN  
FRAKTUR DIAFISIS *METACARPAL* DENGAN METODE *REVERSE*  
*ENGINEERING***

**Oleh:**

**SATRIO DARMA SUPRIYADI**

**Tesis**

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar  
MAGISTER TEKNIK**

**Pada**

**Program Pascasarjana Magister Teknik Mesin  
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**PROGRAM PASCASARJANA MAGISTER TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG  
2023**

## ABSTRAK

### DESAIN PRODUK *SPLINT* UNTUK TERAPI KONSERVATIF PASIEN FRAKTUR DIAFISIS *METACARPAL* DENGAN METODE *REVERSE ENGINEERING*

Oleh

**SATRIO DARMA SUPRIYADI**

Seiring dengan perkembangan dan penggunaan teknologi scanner 3D dan *additive manufacturing* (printer 3D) semakin meningkat dalam dunia medis, dengan teknologi tersebut dan dipadukan dengan metode rekayasa terbalik (*reverse engineering*) maka memungkinkan pembuatan produk terapi *splint* yang bentuk dan ukurannya mengikuti anatomi tangan pasien. Ada beberapa kelemahan saat melakukan *splinting/casting* bagian tangan yang mengalami fraktur dengan menggunakan POP atau kombinasi POP dan alumunium *splint*. Diantaranya adalah apabila menggunakan *splint* palmar (anterior) ada kemungkinan jari dan sendi yang sehat ikut terimobilisasi. Selain itu, *splint* konvensional memiliki keterbatasan yakni *cast splint* yang tidak boleh terkena air, bau tidak sedap *cast splint* ketika kondisi lembab dan rasa gatal yang ditimbulkan dari pemakaian *cast splint* dalam waktu lama. Maka dari itu perlu dilakukan pembuatan *splint* yang sesuai dengan anatomi tangan pasien, kuat, ringan dan tahan air. Dalam proses rekayasa terbalik (*reverse engineering*) ini, tangan dan jari pasien awalnya direkonstruksi dengan pemindai 3 (tiga) Dimensi (3D *scanner*) menjadi data digital. Untuk membangun model 3D yang baik perlu dilakukannya perbaikan kualitas permukaan hasil pemindaian yaitu menghilangkan *noise*, menghilangkan objek sekitar yang ikut terpindai kemudian menentukan ketelitian *meshing* permukaan. Pemodelan *splint* dilakukan dengan metode *surface offset* pada perangkat lunak desain. Kemudian dilakukan serangkaian percobaan simulasi pada perangkat lunak desain untuk mengoptimalkan bentuk dari *splint*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa model 3d *splint* dapat dilakukan pemodelan berdasarkan hasil pemindaian 3d dan menghasilkan bentuk yang optimal dari proses optimalisasi. Dengan pemilihan material berdasarkan kebutuhan pasien maka didapatkan berat *splint* sebesar 99,65 gr. Hasil penelitian tersebut maka *splint* dapat di cetak menggunakan mesin 3D *Printing* dan menjadi alat terapi konservatif pasien dengan fraktur diafisis metacarpal yang bentuk dan ukurannya mengikuti anatomi tangan pasien.

Kata Kunci: Rekayasa Terbalik, Fraktur diafisis metacarpal, *Splint*, 3D *Scanner*

## ABSTRACT

### **SPLINT PRODUCT DESIGN FOR CONSERVATIVE THERAPY OF METACARPAL DIAPHYSIC FRACTURE PATIENTS USING REVERSE ENGINEERING METHOD**

Along with the development and use of 3D scanner technology and additive manufacturing (3D printers) which is increasing in the medical field, this technology and combined with reverse engineering methods makes it possible to manufacture splint therapy products whose shapes and sizes follow the anatomy of the patient's hand. There are several drawbacks when splinting/casting the part of the hand that has a fracture using a POP or a combination of POP and an aluminum splint. Among them is when using a palmar (anterior) splint there is a possibility that healthy fingers and joints will also be immobilized. In addition, conventional splints have limitations, namely the cast splint which cannot be exposed to water, the cast splint's unpleasant odor when conditions are damp and the itching sensation caused by using a cast splint for a long time. Therefore, it is necessary to make a splint that is suitable for the anatomy of the patient's hand, strong, lightweight and waterproof. In this reverse engineering process, the patient's hands and fingers are initially reconstructed with a 3 (three) Dimensional scanner (3D scanner) into digital data. To build a good 3D model, it is necessary to improve the quality of the scanned surface, namely removing noise, removing surrounding objects that are also scanned and then determining the accuracy of the surface meshing. Splint modeling was carried out using the surface offset method in design software. Then a series of simulation experiments were carried out in the design software to optimize the shape of the splint. The results of the research show that the 3d splint model can be modeled based on the results of the 3d scan and produces an optimal shape from the optimization process. By selecting the material based on the patient's needs, a splint weight of 99,65 gr is obtained. The results of this study indicate that splints can be printed using a 3D printing machine and become a conservative therapy tool for patients with metacarpal diaphyseal fractures whose shape and size follow the anatomy of the patient's hand.

Keyword : Reverse Engineering, Fracture of Metacarpal Diaphysis, Splint, 3D Scanner

Judul Tesis : **DESAIN PRODUK *SPLINT* UNTUK TERAPI KONSERVATIF PASIEN FRAKTUR DIAFISIS *METACARPAL* DENGAN METODE *REVERSE ENGINEERING***

Nama Mahasiswa : **Satrio Darma Supriyadi**

Nomor Pokok Mahasiswa : 2125021012

Program Studi : Magister Teknik Mesin

Fakultas : Teknik

**MENYETUJUI**

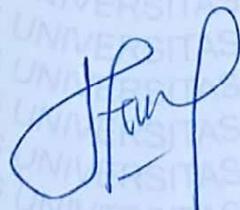
1. Komisi Pembimbing



**Dr. Eng. Suryadiwansa Harun, M.T**  
NIP. 197005012000031001

**Dr. Eng. Shirley Savetlana, S.T., M.Met**  
NIP. 197402021999102001

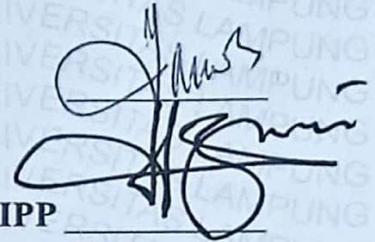
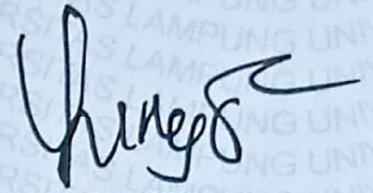
2. Ketua Program Studi Magister Teknik Mesin



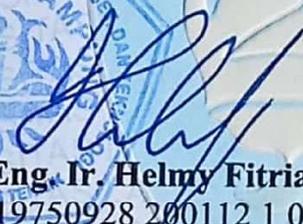
**Dr. Harmen, S.T., M.T**  
NIP. 196906202000031001

**MENGESAHKAN**

## 1. Tim Penguji

Ketua : **Dr. Eng. Suryadiwansa Harun, M.T**Anggota Penguji : **Dr. Eng. Shirley Savetlana, S.T., M.Met**Penguji Utama I : **Dr. Ir. Yanuar Burhanuddin, M.T**Penguji Utama II : **Ir. Gusri Akhyar Ibrahim, M.T., Ph.D., IPP**

## 2. Dekan Fakultas Teknik

  
**Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc.3**  
NIP 19750928 200112 1 002

## 3. Direktur Program Pascasarjana Universitas Lampung

  
**Prof. Dr. Ir. Murhadi, M.Si.**  
NIP 196403261989021001Tanggal Lulus Ujian Tesis : **28 Juli 2023**

## SURAT PERNYATAAN

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Satrio Darma Supriyadi

NPM : 2125021012

Fakultas : Teknik

Jurusan : Teknik Mesin

Program Studi : Magister Teknik Mesin

Menyatakan bahwa tesis dengan judul “**DESAIN PRODUK *SPLINT* UNTUK TERAPI KONSERVATIF PASIEN FRAKTUR DIAFISIS *METACARPAL* DENGAN METODE *REVERSE ENGINEERING*”** adalah karya saya sendiri dan bukan hasil plagiat sebagaimana diatur didalam Pasal 27 Peraturan Akademik Universitas Lampung dengan Surat Keputusan Rektor Nomor 3187/H26/DT/2010.

Bandar Lampung, 28 Juli 2023

Yang membuat pernyataan,



**Satrio Darma Supriyadi**

NPM. 2125021012

## RIWAYAT HIDUP



Satrio Darma Supriyadi lahir di Bandung, 13 Agustus 1998 anak pertama dari tiga bersaudara pasangan orangtua Ayah Sugeng Supriyadi, BSc dan Ibu Sri Djuarningsih. Pendidikan dasar ditempuh mulai tahun 2004-2010 di SDN Panyileukan 2. Pendidikan menengah pertama di SMPN 8 Bandung pada tahun 2010-2013. Pendidikan menengah kejuruan ditempuh pada tahun 2013-2016 di SMKN 6 Bandung. Kemudian melanjutkan studi di program studi D4 Mekanik Industri dan Desain Politeknik TEDC Bandung dalam waktu 4 (empat) tahun yang lulus pada tahun 2020. Tahun 2021 melanjutkan program pasca-sarjana pada program studi Magister Teknik Mesin Universitas Lampung

Pengalaman kerja sebagai Research and Development Engineer di PT. Sanbe Farma tahun 2017-2019. Tahun 2019-2021 bekerja di perusahaan bergerak di bidang Pekerjaan Kayu (Woodworking) sebagai Operational Manager, PT. Abadi Senigitar Indonesia Asia. Saat ini berkarya sebagai *freelancer* dan konsultan kebutuhan teknik dan manufaktur.

**Bandar Lampung, 28 Juni 2023**

**Penulis**

## MOTTO

“Sesungguhnya bersama kesulitan ada kemudahan. Maka apabila engkau telah selesai (dari satu urusan), tetaplah bekerja keras (untuk urusan yang lain). Dan hanya kepada Tuhanmulah engkau berharap.”

(QS. Al-Insyirah [94] : 6-8)

“Demi masa. Sungguh, manusia berada dalam kerugian, kecuali orang-orang yang beriman dan mengerjakan kebajikan serta saling menasihati untuk kesabaran.”

(QS. Al-‘Asr [103] : 1-3)

خَيْرُ النَّاسِ أَنْفَعُهُمْ لِلنَّاسِ

**“Sebaik-baik manusia adalah yang paling bermanfaat bagi manusia ”**

(HR. Ahmad, ath-Thabrani, ad-Daruqutni. Hadits ini dihasankan oleh al-Albani di dalam Shahihul Jami' no:3289)"

## PERSEMBAHAN



*“Dengan menyebut nama Allah Yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang”*

*Kupersembahkan karya kecilku ini untuk untuk orang-orang yang aku sayang*

### Ayah dan Ibuku

*Kedua orang tuaku tercinta, Bapak Sugeng Supriyadi, BSc dan Ibu Sri Djuarningsih yang tiada pernah hentinya selama ini memberiku doa, semangat, dorongan, nasehat dan kasih sayang serta pengorbanan yang tak dapat tergantikan.*

### Adik Tercinta

*Adik M. Suryo dan Shafwan Farid Kepadanya yang telah membantu dan memberikan dorongan moral.*

### dr. Kiki Mulyawati

*Orang yang tersayang yang akan melengkapi separuh iman ku, yang selalu memberikan motivasi untuk segera menyelesaikan tesis ini, terimakasih untuk doanya.*

**Dosen Magister Teknik Mesin Universitas Lampung**

*Yang telah membimbing, mengajarkan, memberikan saran, baik*

*secara akademis maupun non akademis*

**Teman-Teman Magister Teknik Mesin 2021**

*Teman seperjuangan suka-duka yang selalu memberi semangat, dukungan, dan*

*motivasi untuk terus yakin berjuang menyelesaikan permasalahan apapun.*

## UCAPAN TERIMAKASIH

*Assalamu'alaikum Warahmatulahi Wabarokatuh*

*Alhamdulillah* rabbi'l alamin, puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT, yang senantiasa mencurahkan rahmat dan karunia-Nya. Sholawat dan salam kepada junjungan Nabi Muhammad SAW yang telah menjadi panutan serta membawa umat manusia dari lembah kegelapan menuju dunia yang terang benderang. Penulis mengucapkan syukur *alhamdulillah* karena dapat menyelesaikan penelitian dan menyusunnya menjadi sebuah karya ilmiah dengan judul “Desain Produk Splint Untuk Terapi Konservatif Pasien Fraktur Diafisis Metacarpal Dengan Metode Reverse Engineering”. Karya ilmiah ini merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Teknik di Program Studi Magister Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Lampung.

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya, dengan segala keikhlasan dan kerendahan hati kepada:

1. Direktur Program Pascasarjana Universitas Lampung Prof. Dr. Ir. Murhadi, M.Si.
2. Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
3. Dr. Harmen, S.T., M.T. selaku Ketua Program Magister teknik Mesin Universitas Lampung.
4. Dr. Eng. Suryadiwansa Harun, M.T. selaku dosen pembimbing utama yang telah menyempatkan waktu, memberikan motivasi dan bimbingan serta saran kepada saya untuk selesainya tesis ini.

5. Dr. Eng. Shirley Savetlana, S.T., M.Met. selaku dosen pembimbing kedua, yang telah menyempatkan waktu memberikan sumbangsih saran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan tesis ini.
6. Dr. Ir. Yanuar Burhanuddin, M.T.. selaku dosen penguji I, yang telah memberikan saran dan masukan untuk tesis ini.
7. Ir. Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T., Ph.D., IPP selaku dosen penguji II, yang telah memberikan saran dan masukan untuk tesis ini.
8. dr. Helmi Ismunandar, Sp.OT selaku pembimbing medis, yang telah meluangkan waktu dan memberikan ilmu kedokteran terkait topik bahasan tesis.
9. Dosen pengajar Program Studi Magister Teknik Mesin Universitas Lampung: Prof. Sugiyanto, Prof. Moh. Badaruddin, Amrizal, Ph.D, Dr. M. Irsyad, Ir. Irza Sukmana, Ph.D, Dr. Harmen, Dr. Asnawi, Dr. Akmal, Dr. Amrul, yang telah memberikan ilmu kepada penulis selama menekuni perkuliahan magister teknik mesin.
10. Sujud dan terima kasih yang dalam penulis persembahkan kepada Ibunda Sri Djuarningsih, Ayahanda Sugeng Supriyadi, BSc dan adik tercinta M. Suryo dan Shafwan Farid atas dorongan yang kuat, do'a, kebijaksanaan serta dukungan yang diberikan tanpa pamrih.
11. Ucapan terima kasih secara khusus penulis sampaikan kepada yang tersayang yang akan melengkapi separuh iman ku dr. Kiki Mulyawati terimakasih atas waktu dan motivasi yang kau berikan sehingga terselesaikannya karya ini.
12. Rekan-rekan penulis Magister Teknik Mesin Konsentrasi Manufaktur Universitas Lampung angkatan 2021. Andriyanto, Atiq Pramono, Sahabman

T. P. Naibaho, Suraya, dan Yulius Riansa, yang telah memberikan support dalam segala hal. Canda, tawa, kegelisahan dalam perkuliahan dan penyusunan tesis semoga menjadikan persahabatan ini makin erat terjaga.

13. Semua pihak yang secara langsung maupun tidak langsung telah membantu dalam penyelesaian Tesis ini.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan tesis ini masih banyak terdapat kesalahan serta kekurangan. Menyadari hal tersebut dengan segala kerendahan hati penulis akan menerima segala kritik dan saran yang bersifat membangun dari pembaca untuk kesempurnaan tesis ini, yang tentunya akan lebih mendorong kemajuan penulis dikemudian hari. Semoga tesis ini dapat berguna bagi penulis khususnya dan pembaca pada umumnya. Akhir kata penulis ucapkan terimakasih.

*Wassalamu'alaikum Warahmatulahi Wabarokatuh*

Bandar Lampung, 28 Juni 2023

Penulis,

Satrio Darma Supriyadi

## KATA PENGANTAR

Dengan memanjatkan puji syukur ke hadirat Allah SWT, atas limpahan rahmat dan hidayah-Mu penulis dapat menyajikan tulisan tesis yang berjudul: “Desain Produk Splint Untuk Terapi Konservatif Pasien Fraktur Diafisis Metacarpal Dengan Metode Reverse Engineering”. Di dalam tulisan ini, disajikan pokok-pokok bahasan yang meliputi : Metode pengambilan data, logaritma penelitian berdasarkan kebutuhan pasien, pemrosesan data dari pemindaian 3 (tiga) dimensi di ubah menjadi data digital 3D *splint*, Optimasi bentuk dan parameter pencetakan 3D. Adapun tujuan dari penelitian ini yaitu untuk mendapatkan produk *splint* yang sesuai dengan anatomi tangan dan jari pasien.

Sangat disadari bahwa dengan kekurangan dan keterbatasan yang dimiliki penulis, walaupun telah dikerahkan segala kemampuan untuk lebih teliti, tetapi masih dirasakan banyak kekurang tepatan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran membangun agar tulisan ini bermanfaat bagi yang membutuhkan.

Bandar Lampung, 28 Juni 2023

Penulis,

Satrio Darma Supriyadi

## DAFTAR ISI

Halaman

<b>COVER</b> .....	<b>ii</b>
<b>ABSTRAK</b> .....	<b>iii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>iv</b>
<b>JUDUL TESIS</b> .....	<b>v</b>
<b>MENGESAHKAN</b> .....	<b>vi</b>
<b>SURAT PERNYATAAN</b> .....	<b>vii</b>
<b>RIWAYAT HIDUP</b> .....	<b>viii</b>
<b>MOTTO</b> .....	<b>ix</b>
<b>PERSEMBAHAN</b> .....	<b>x</b>
<b>UCAPAN TERIMAKASIH</b> .....	<b>xii</b>
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	<b>xv</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>xvi</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>xviii</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>xix</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 Latar Belakang Masalah</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2 Perumusan Masalah</b> .....	<b>9</b>
<b>1.3 Tujuan Penelitian</b> .....	<b>9</b>
<b>1.4 Manfaat Penelitian</b> .....	<b>10</b>
<b>1.5 Batasan Masalah</b> .....	<b>10</b>
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	<b>11</b>
2.1 Osteologi Tangan .....	11
2.2 Fraktur Metakarpal dan Prinsip Penatalaksanaan.....	12
2.3 Ortesis <i>Splint</i> .....	15
2.4 Rekayasa Terbalik ( <i>reverse engineering</i> ).....	17
2.5 Pemindaian 3D .....	18

2.6	Manufaktur Aditif 3D <i>Printing Fused Deposition Modeling</i> (FDM) .....	22
2.7	<i>Surface Offsetting</i> .....	26
2.8	<i>Finite Element Method</i> (Metode Elemen Hingga) .....	29
2.9	<i>Topology Optimization</i> .....	30
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....</b>		<b>32</b>
3.1	Waktu dan tempat penelitian .....	32
3.2	Alat dan bahan penelitian .....	32
3.2.1	Sampel Spesimen Penelitian .....	32
3.2.2	Peralatan penelitian .....	33
3.2.3	<i>Software</i> Pemodelan & Pengolahan Data .....	35
3.3	Prosedur penelitian .....	37
3.3.1	Pemilihan Material <i>Printing</i> .....	42
3.3.2	Pengujian Material <i>Printing</i> .....	47
3.3.3	Perancangan <i>Splint</i> .....	48
3.3.4	Optimasi Bentuk <i>Splint</i> .....	48
3.3.5	Optimasi Manufaktur Aditif ( <i>Additive Manufacturing</i> ) .....	50
<b>BAB V PENUTUP .....</b>		<b>51</b>
5.1	Kesimpulan .....	51
5.2	Saran .....	53
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>		<b>54</b>

## DAFTAR GAMBAR

	Halaman
<b>Gambar 2. 1</b> Tulang pada tangan [13] .....	11
<b>Gambar 2. 2</b> Algoritma penatalaksanaan fraktur metakarpal[2] .....	12
<b>Gambar 2. 3</b> Contoh Fraktur Metakarpal (kiri), Contoh Akibat Malrotasi yang tidak terkoreksi[3].....	13
<b>Gambar 2. 4</b> Reduksi fraktur metacarpal.....	14
<b>Gambar 2. 5</b> Pilihan immobilisasi: Imobilisasi dengan anterior splint (atas kiri), Immobilisasi casting dan aluminium splint (atas kanan), dan Attelle Fonctionelle (bawah) [3].....	14
<b>Gambar 2. 6</b> (A) contoh splint, (B) contoh casting keliling penuh, (C) Contoh gips yang telah dibelah dan dibalut kembali dengan perban kasa agar tidak terjadi pembengkakan, (D) Contoh ortosis yang menunjukkan penyangga fraktur di mana tali velcro memungkinkan untuk melepas dan menyesuaikan kembali kekencangannya. [15] .....	16
<b>Gambar 2. 7</b> Ilustrasi proses fisik ke digital (sumber : dok. pribadi) .....	18
<b>Gambar 2. 8</b> Proses akuisisi data [19] .....	19
<b>Gambar 2. 9</b> Gambaran umum perangkat pemindai 3D [19] .....	20
<b>Gambar 2. 10</b> Prinsip dari layer manufacturing. Lapisan berkontur (kiri), Objek 3D yang dibuat dari lapisan staggered (kanan). .....	22
<b>Gambar 2. 11</b> Ilustrasi alur proses manufaktur aditif [11] .....	23
<b>Gambar 2. 12</b> Ilustrasi layer/lapisan pada proses 3D Printing. ....	24
<b>Gambar 2. 13</b> Skematik mesin 3D printing FDM [22].....	25
<b>Gambar 2. 14</b> Proses pencetakan FDM [22] .....	26
<b>Gambar 2. 15</b> (a) Gap antara dua permukaan yang di-offset. (b) Titik potong antara dua permukaan yang di-offset [24] .....	27
<b>Gambar 2. 16</b> Mesh kasar 2D pada sebuah penampang gigi pada roda gigi [28]. .....	29
<b>Gambar 3. 1</b> Sampel spesimen penelitian berupa tangan seorang pasien .....	33
<b>Gambar 3. 2</b> Software Ansys Discovery SpaceClaim. ....	35
<b>Gambar 3. 3</b> Tampilan utama Software Solidworks Premium versi 2018.....	36
<b>Gambar 3. 4</b> Tampilan utama Software Minitab Statistical versi 2016.....	36
<b>Gambar 3. 5</b> Diagram alir pemrosesan data .....	42
<b>Gambar 3. 6</b> Skematik House of Quality.....	43
<b>Gambar 3. 7</b> Matriks pemilihan bahan .....	44
<b>Gambar 3. 8</b> Diagram alir proses optimasi topologi.....	49

## DAFTAR TABEL

Halaman

Tabel 3. 1 Matriks seleksi .....	46
Tabel 4. 1 Persyaratan rancangan material produk <i>splint</i> ....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Tabel 4. 2 Bobot Persyaratan .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Tabel 4. 3 Filament Properties [40].....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Tabel 4. 4 Normalisasi Filament Properties.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Tabel 4. 5 Keterkaitan fungsi dengan persyaratan material.	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Tabel 4. 6 Matriks penilaian.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Tabel 4. 7 Matriks seleksi .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Tabel 4. 8 Sifat Material PETG [41].....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Tabel 4. 9 Sifat Material PP [42] .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Tabel 4. 10 Detail ukuran standard Uji Tarik Polimer ASME D638-03 Type I. .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Tabel 4. 11 Parameter 3D Print FDM (Additive Manufacturing).....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Tabel 4. 12 Rancangan percobaan spesimen pengujian.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Tabel 4. 13 Data hasil pengujian tarik material PETG .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Tabel 4. 14 Rata-rata populasi data pengujian tarik material PETG.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Tabel 4. 15 PETG Material Properties .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Tabel 4. 16. Parameter Optimasi Topologi .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Tabel 4. 17 Perbandingan Desain Awal dengan Optimasi Topologi.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Tabel 4. 18 ANOVA Kekuatan material Tensile Strength ( $\sigma$ )....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Tabel 4. 19 ANOVA Kekuatan material Yield Strength ( $\varepsilon$ )	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Tabel 4. 20 ANOVA Kekuatan material Elastic Modulus (E)....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>



## **BAB I PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang Masalah**

Fraktur merupakan terputusnya kontinuitas dari struktur tulang. Fraktur bisa saja hanya berupa retakan pada permukaan korteks tulang. Namun, kebanyakan terputusnya kontinuitas tulang ini terjadi secara komplis. Fraktur dapat mengakibatkan fragmen-fragmen tulang tetap berada pada posisinya atau berubah posisi (*displaced/undisplaced*). Apabila permukaan kulit pada fraktur masih intak maka disebut sebagai fraktur tertutup. Apabila terdapat luka pada kulit atau terbukanya kavitas dari tubuh, maka disebut sebagai fraktur terbuka. Fraktur terbuka ini beresiko terkontaminasi dan mengalami infeksi [1].

Menurut penelitian Court-Brown [2], fraktur dan dislokasi pada area tangan cukup sering terjadi pada cedera muskuloskeletal. Di Kanada, insiden cedera ini annualnya sekitar 29 kejadian per 10.000 orang dengan usia 20 tahun ke atas, dan 61 kejadian per 10.000 orang dengan usia di bawah 20 tahun. Pria memiliki resiko 2,08 kali lebih tinggi terkena cedera muskuloskeletal daripada wanita sampai usia 65 tahun. Tetapi wanita berusia diatas 65 tahun memiliki resiko lebih tinggi terkena cedera muskuloskeletal dibandingkan dengan pria.

Menurut survey didapatkan bahwa fraktur phalang (23%) dan fraktur metakarpal (18%) merupakan fraktur distal dari siku kedua dan ketiga terbanyak yang ditemukan [2]. Selain itu, dari 1358 fraktur, didapatkan distribusi fraktur yaitu 57,4% fraktur phalang proksimal, 30,4% phalang tengah, dan 12,2% metakarpal. Kebanyakan fraktur stabil pada area metafisis dan diafisis dari metakarpal dapat diterapi secara konservatif (non-operatif). Berdasarkan penelitian [2], [3], dari 27 fraktur metakarpal ke-5 dengan sudut fraktur sekitar 40° yang direduksi dan diimobilisasi dengan *casting plaster of paris* (pop) selama 4 minggu, hanya 3 pasien yang kehilangan sudut reduksi lebih dari 15°. Sementara, untuk fraktur tidak stabil dengan perubahan posisi (*displaced*) signifikan, baik rotasi maupun pemendekan tidak efektif apabila dilakukan terapi nonoperatif.

Terapi konservatif dilakukan dengan reduksi tertutup dan dilanjutkan dengan imobilisasi fraktur dengan menggunakan *splinting/casting*. Penggunaan POP atau kombinasi antara POP dan aluminium *splint* dilakukan pada saat *splinting/casting*. Pada saat reduksi dan *splinting/casting*, tangan diarahkan pada posisi intrinsik plus (posisi Edinburg). Pada posisi ini pergelangan tangan ekstensi 20°-30°, sendi metakarpal 90°, sementara untuk sendi interphalang proksimal dan distal pada posisi 0° [3].

Ada beberapa kelemahan saat melakukan *splinting/casting* bagian tangan yang mengalami fraktur dengan menggunakan POP atau kombinasi POP dan aluminium *splint*. Diantaranya adalah apabila menggunakan *splint* palmar (anterior) ada kemungkinan jari dan sendi yang sehat ikut terimobilisasi. Apabila

menggunakan kombinasi antara *casting* pergelangan tangan dan alumunium *splint* sulit untuk menjaga sudut lekukan dan fiksasi alumunium *splint* pada *casting*, padahal ini adalah suatu hal yang esensial. Walaupun selektif terhadap jari yang mengalami cedera, namun cara ini sulit untuk melakukan kontrol terhadap rotasi jari [3]. Selama proses *splinting* konvensional, pemasangan *splint* sangat tergantung pada keterampilan dan pengalaman dokter karena bahan-bahan ini tidak dapat diubah dan modelnya berbasis bentuk tubuh. Konsekuensinya, tingkat kepuasan pasien selama perawatan juga sangat bervariasi tergantung pada keterampilan dokter saat melakukan *splinting*. Tenaga ahli yang tidak berpengalaman dapat menyebabkan lebih banyak rasa sakit atau menyebabkan imobilisasi yang buruk. Selain itu, *splint* konvensional berukuran besar dan tidak sedap dipandang, sehingga menyebabkan ketidaknyamanan yang nyata bagi pasien selama perawatan. Menjaga *splint* tetap bersih dan kering itu sulit, karena itu risiko penyebaran infeksi juga meningkat [4].

Seiring dengan perkembangan dan penggunaan teknologi *scanner* 3D dan *additive manufacturing* (printer 3D) semakin meningkat dalam dunia medis, dengan teknologi tersebut dan dipadukan dengan metode rekayasa terbalik (*reverse engineering*) maka memungkinkan pembuatan produk terapi *splint* yang bentuk dan ukurannya mengikuti anatomi tangan pasien. Bagaimanapun, belum banyak studi mengenai penerapan teknologi ini dalam pembuatan (*manufacturing*) *cast/splint* sebagai peralatan medis terapi konservatif pasien fraktur diafisis metacarpal. Padahal dengan penerapan teknologi ini, produk terapi *splint* yang dihasilkan bersifat spesifik untuk setiap individu pasien dimana bentuk dan ukurannya sesuai

anatomi tangan pasien, sehingga dapat mempertahankan hasil reduksi fraktur dengan baik. Karena bentuk dan ukuran produk splint yang sesuai sehingga komplikasi yang ditimbulkan akibat tingginya tekanan lokal pada permukaan kulit dapat dihindari. Oleh karena itu, tim peneliti [4] telah melakukan penelitian rancang bangun *cast/splint* dalam penanganan fraktur dengan memanfaatkan teknologi *printer 3D*. Dari hasil penelitian ini, desain dan produk splint yang berventilasi sehingga menyebabkan produk ini menjadi ringan sehingga tidak membebani organ tangan, juga memudahkan pengguna dalam aktifitas keseharian. Selain itu ventilasi menurunkan komplikasi pada kulit [5].

Penelitian terdahulu tentang produk *splint* ortosis telah dilakukan oleh beberapa peneliti, Harya Nugraha, L. dalam penelitiannya [6] bahwa dari hasil wawancara dengan narasumber yaitu pengguna *cast splint* pada 28 Juli 2019, disimpulkan dari hasil wawancara adalah keluhan terhadap keterbatasan *cast splint* yang tidak boleh terkena air, bau tidak sedap *cast splint* ketika kondisi lembab dan rasa gatal yang ditimbulkan dari pemakaian *cast splint* dalam waktu lama. Hasil dari wawancara dengan ahli ortopedi Dr. Bambang Purwanto, dr., M.Kes. juga mendukung adanya peningkatan kualitas *splint* khususnya pada penggantian material menjadi material tahan air dan penambahan lubang-lubang yang berfungsi sebagai sirkulasi udara. Material yang umum digunakan sebagai bahan pembuatan *splint* yaitu PLA, ABS dan PP. Namun pada penelitian ini kekuatan dari *splint* belum dioptimalkan dan pemilihan bahan lain perlu dipertimbangkan.

Choo Y. dkk. dalam penelitiannya [7] menyimpulkan bahwa pembuatan ortosis dengan metode rekayasa terbalik (*reverse engineering*) dan dipadukan dengan pemrosesan manufaktur aditif 3D *printing*, menunjukkan parameter biomekanik dan parameter kinematik yang serupa atau lebih unggul seperti fungsi pergelangan tangan dan kelenturan pergelangan tangan. Selain itu, pembuatan ortosis dengan teknik 3D *printing* memiliki tingkat kepuasan yang tinggi dibandingkan dengan ortosis konvensional. Ortosis adalah alat yang digunakan untuk membantu fungsi tubuh manusia. Alat ini biasanya memiliki tujuan untuk perlindungan tubuh, membatasi gerakan, bantuan menahan beban dan koreksi kelainan bentuk. Dengan demikian, ortosis banyak diterapkan pada pasien dengan disfungsi fisik dan disabilitas akibat disfungsi otot, maupun patah tulang.

Rekayasa Terbalik (*reverse engineering*) adalah proses pemodelan dari data asli (yang sering di digitalkan adalah objek) yang menghasilkan model geometris ringkas yang dapat diekspor ke CAD/CAM. Saat ini Rekayasa Terbalik sedang berubah dari proses pengukuran atau *tracking* manual yang melelahkan menjadi sistem rekayasa canggih yang menggunakan peralatan digitalisasi modern dan sistem CAD/CAM. Peralatan digitalisasi yang paling umum digunakan adalah optik dan mekanik. Pemilihan peralatan mempertimbangkan akurasi yang dibutuhkan, kompleksitas permukaan dan kecepatan pemindaian [8]. Rekayasa terbalik digunakan sebagai metode desain pembuatan *splint* untuk meminimalisir perbedaan ukuran bentuk tangan pasien dan mengurangi resiko ketidaksesuaian antara tangan pasien dan produk *splint*.

Blaya, F. dkk. dalam penelitiannya [9] melakukan modeling pada tangan pasien menggunakan pemindaian 3D SENSE menggunakan *software* Geomagic®DesignX untuk menghasilkan model 3D. Rotasi 360° dilakukan di sekitar anggota tubuh yang cedera dengan pemindai (melakukan pemindaian vertikal secara bersamaan untuk menangkap semua area). Langkah ini meski cepat, sangatlah penting. Faktanya, ini mempercepat prosedur dan mengoptimalkan produk saat dilakukan kostumisasi. Setelah model lengan dihasilkan, kemudian dilakukan pemrosesan lanjutan untuk merubah model ke dalam format *file* CAD dan menghilangkan *noise* dengan cara mengubah *point cloud* ke *mesh* yang lebih sederhana dan membatasi area anatomi tubuh yang diinginkan.

Garcia-Garcia, dalam penelitiannya [10] menggunakan Metode Digitalisasi objek pergelangan tangan menggunakan Metode *Magnetic Resonance Imaging* (MRI). Metode ini memindai pergelangan tangan dengan cara merubah sinyal magnetik yang diputar sekeliling anggota tubuh menjadi model penampang pergelangan tangan berupa irisan sebanyak 150 irisan dengan ketebalan 0,97 mm. Lalu perangkat lunak segmentasi SCANIP digunakan untuk merubah model irisan tadi kedalam model tiga dimensi. Model tiga dimensi tersebut kemudian diekspor sebagai *point cloud* dan diproses pada aplikasi SOLIDWORKS untuk menghasilkan model tangan yang *solid*. Penerapan metodologi rekayasa terbalik yang digunakan untuk pengembangan ortosis menunjukkan bahwa penggunaan rekayasa terbalik layak dilakukan. Kustomisasi menurut anatomi tubuh pasien dapat dilakukan, namun uji klinis lanjutan masih diperlukan pada penelitian selanjutnya. Penggunaan pemindaian MRI dalam pembuatan model 3D untuk

pembuatan ortosis pergelangan tangan terbukti layak. Namun waktu pemrosesan hasil pemindaian MRI untuk menghasilkan model CAD lebih lama dari yang diharapkan yaitu sekitar 5 jam. Dalam hal ini, metode akuisisi objek tiga dimensi kedalam model CAD tiga dimensi yang lain perlu dipertimbangkan untuk mengurangi waktu pengambilan data anatomi tubuh.

Ismunandar, H. dalam penelitian [11] berhasil memperoleh suatu desain *splint* untuk fraktur diafisis metakarpal tertutup dan stabil menggunakan metode rekayasa terbalik. Langkah pertama yang dilakukan adalah pengukuran tangan pasien, bagian yang diukur meliputi panjang lengan, panjang telapak tangan, diameter lengan dan diameter tangan dan diameter ruas pertama jari telunjuk. Selain itu ditentukan juga ketebalan dari ortosis yang akan dibuat. Model lengan yang digunakan adalah lengan peneliti, diperoleh hasil pengukuran lengan peneliti adalah : panjang lengan 12cm, diameter lengan dan pergelangan tangan sebesar 21cm dan 16,5cm, panjang telapak tangan 9cm, dan diameter ruas pertama jari telunjuk 2cm. Ditentukan juga ketebalan *splint* sebesar 3mm. Lalu selanjutnya dilakukan pembuatan ilustrasi dari ide desain yang ada kemudian dilakukan pembuatan desain model 3D menggunakan *Software* SOLIDWORKS. Selanjutnya dilakukan pencetakan menggunakan mesin cetak 3D selama kurang lebih 30 jam untuk 2 bagian *splint* seberat 300 gr. Metode rekayasa terbalik ini telah berhasil dilakukan, akan tetapi masih perlu dilakukan evaluasi dari perancangan *splint* tersebut, seperti parameter pencetakan dan bentuk *splint* yang belum optimal. Terutama untuk masalah durabilitas, ergonomis, dan kenyamanan dalam penggunaan sehari-hari.

Pengembangan juga perlu dilakukan untuk merancang model *splint* yang lain menggunakan metode rekayasa terbalik.

Dari penjabaran penelitian sebelumnya, menghasilkan rumusan masalah akan pentingnya dilakukan penelitian ini. (1) Tidak nyamannya *splint* konvensional terhadap penggunaan sehari-hari yang akan berdampak pada kondisi psikologis pada pasien. (2) Standar *cast splint* konvensional juga menyebabkan tekanan tidak merata pada tangan pasien akibat penggunaan plester *casting* yang tidak sesuai dengan anatomi tangan pasien yang akan menimbulkan sindrom tekanan Südeck's Algodistrophy [12]. (3) Kemungkinan meningkatnya resiko iritasi pada kulit meningkat akibat tidak adanya ventilasi pada *cast splint*. (4) Pencetakan *splint* menggunakan mesin cetak 3D sudah banyak dilakukan namun masih sedikit literatur yang membahas tentang optimasi rancangan dari ortosis *splint*. Padahal hal ini sangat penting untuk mencapai harapan pasien dalam rangka mendapatkan produk *splint* yang kuat, nyaman, ringan, sedap dipandang dan juga mempertimbangkan penggunaan material cetak yang tahan air.

Perumusan masalah di atas menarik penulis untuk melakukan penelitian terkait ortosis *splint*. Penulis mengambil judul **“Desain Produk *Splint* Untuk Terapi Konservatif Pasien Fraktur Diafisis Metakarpal Dengan Metode *Reverse Engineering*”** penelitian ini berbeda dengan penelitian sebelumnya, metode rekayasa terbalik yang digunakan dan dipadukan dengan manufaktur aditif diharapkan dapat menghilangkan ketidak sesuaian produk *splint* konvensional dengan anatomi tangan pasien. Penelitian ini nantinya menjawab tujuan dari

penelitian ini, yaitu mendapat desain *splint* yang optimal dan sesuai dengan bentuk tangan pasien menggunakan pemindai 3D, serta mendapat parameter optimasi pencetakan 3D dalam pembuatan *splint*. Diharapkan hasil penelitian ini mampu mendapatkan model basis data *splint* yang dapat disesuaikan oleh pasien terkhusus masyarakat Indonesia.

## 1.2 Perumusan Masalah

1. Apakah dapat dihasilkan model *splint* yang nyaman ketika digunakan dalam aktivitas sehari-hari oleh pasien ?
2. Apa saja tahapan yang perlu dilakukan untuk mendapatkan model *splint* yang sesuai dengan anatomi tangan pasien ?
3. Bagaimana merancang *splint* yang dapat mengurangi resiko iritasi pada kulit ketika pasien menggunakan *splint* ?
4. Bagaimana logaritma optimasi pada proses perancangan dan pembuatan *splint* ?

## 1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan yang ingin dicapai penulis yaitu :

- a. Mengakuisisi model nyata tiga dimensi tangan pasien kedalam bentuk tiga dimensi CAD.
- b. Melakukan perancangan/pemodelan *splint*.
- c. Mendapatkan algoritma pemilihan material sesuai dengan kriteria pasien dengan metode *Quality Function Deployment* (QFD).
- d. Melakukan *Topology Optimization* pada model *splint*.

- e. Melakukan optimasi parameter pencetakan tiga dimensi (*3D Printing*).
- f. Mendapatkan model *splint* yang sesuai dengan anatomi tangan dan jari pasien.

#### 1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini bertujuan untuk menghasilkan model *splint* 3D menggunakan metode *Reverse Engineering*. Metode ini diharapkan mampu menyelesaikan permasalahan produk *splint* seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya. Gejala nyeri karena tekanan yang berasal dari tidak sesuainya model *splint* dengan anatomi tangan pasien dapat dihindarkan dengan membuat model *splint* yang sesuai dengan anatomi tangan pasien. Pengukuran tangan pasien yang sebelumnya dilakukan secara manual dan kurang presisi, memerlukan waktu yang lama dan cukup rumit akan menjadi lebih presisi, sederhana dan relatif lebih cepat. Optimasi yang dilakukan akan menjadikan proses pencetakan pada mesin cetak 3D akan lebih cepat dan menghasilkan produk dengan kekuatan yang lebih baik sesuai dengan sifat material yang digunakan.

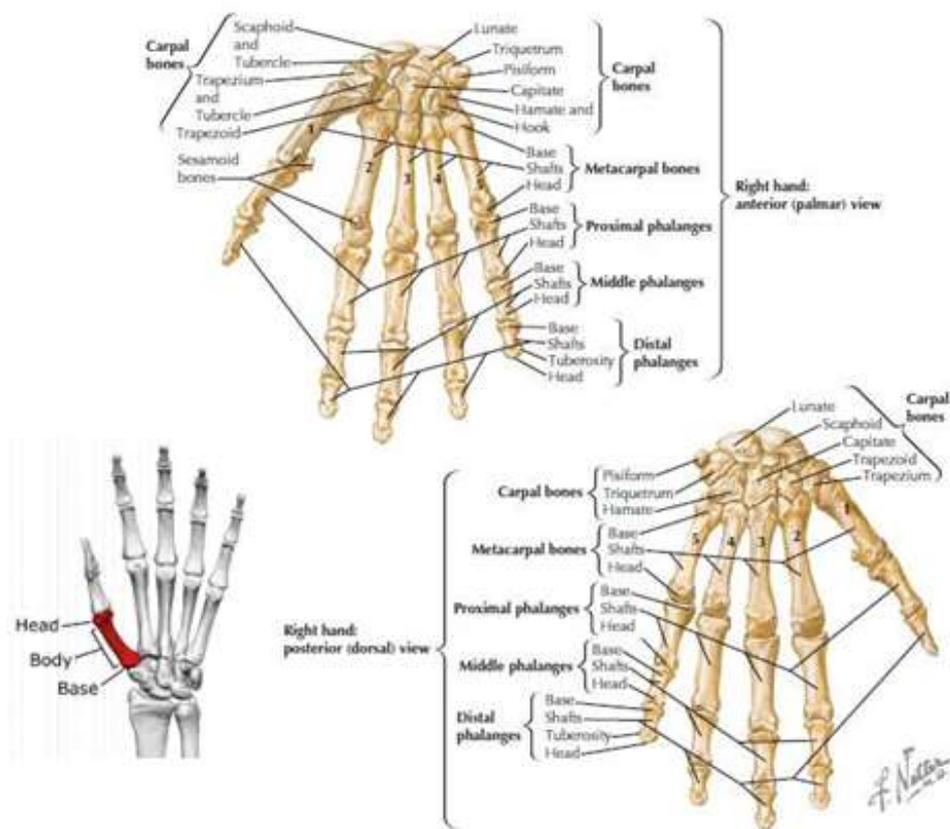
#### 1.5 Batasan Masalah

Adapun Batasan masalah pada tesis ini adalah:

- a. Pemodelan dilakukan dengan metode *reverse engineering* dan *offsetting*.
- b. Pemodelan *splint* menggunakan *software* Ansys SpaceClaim dan Solidworks 2018, hanya pada bagian jari yang akan diimobilisasi.
- c. Validasi dilakukan antara hasil desain *splint* dengan data tangan pasien yang sudah berbentuk digital dari pemindai 3D.
- d. Optimasi dilakukan berdasarkan hasil pengujian material

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Osteologi Tangan



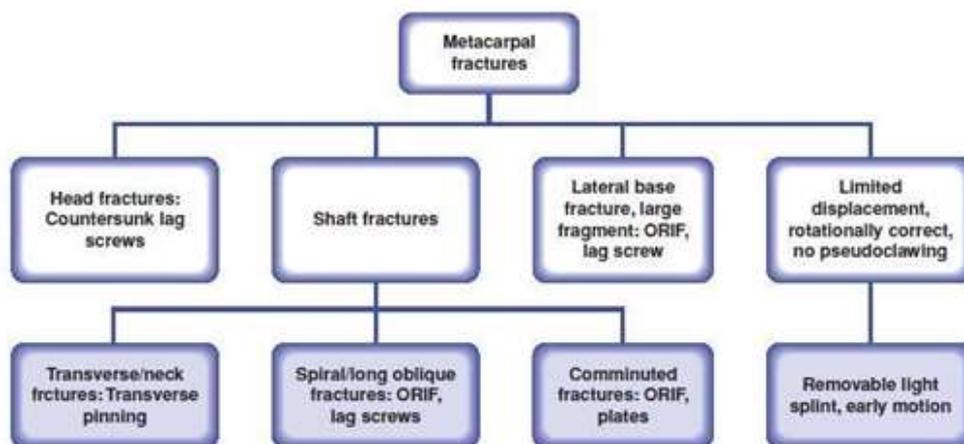
Gambar 2. 1 Tulang pada tangan [13]

Tulang pada tangan terdiri atas tulang karpal, tulang metakarpal, dan tulang phalang (lihat Gambar 2. 1), Tulang karpal tersusun atas 2 baris, baris proksimal dan baris distal. Pada baris proksimal terdiri atas tulang skafoid, lunatum, trikuetrum, dan fisiformis. Baris distal terdiri atas tulang *trapezium*, *trapezoid*,

*capitatum*, dan *hamatum*. Tulang metakarpal terdiri atas bagian kepala (*epifisis*), badan (*diafisis/shaft*), dan dasar (*metafisis*). Tulang phalang terdiri dari phalang proksimal, phalang tengah, dan phalang distal. Masing-masing tulang phalang tersusun atas bagian kepala (*epifisis*), badan (*diafisis/shaft*), dan dasar (*metafisis*) [13].

## 2.2 Fraktur Metakarpal dan Prinsip Penatalaksanaan

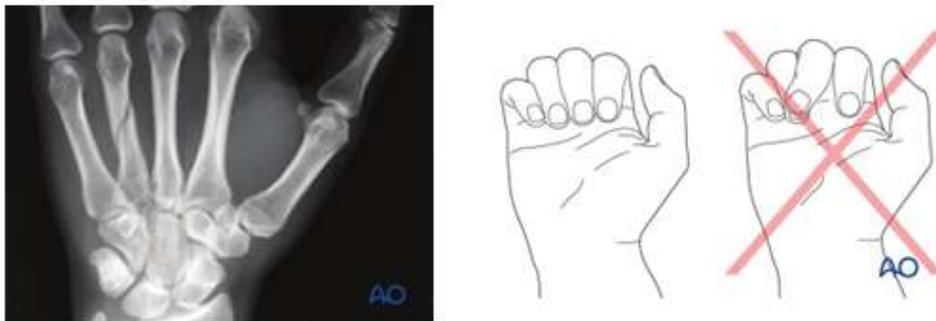
Fraktur pada diafisis metakarpal biasanya ditangani dengan metode tertutup. Namun apabila terjadi fraktur terbuka atau beberapa tulang metakarpal mengalami fraktur, dapat menjadi indikasi untuk dilakukan operasi. Manipulasi tertutup, pembidaian yang tepat, serta proteksi dari gerakan umumnya menghasilkan gerakan tangan fungsional yang baik [14].



Gambar 2. 2 Algoritma penatalaksanaan fraktur metakarpal[2]

Fraktur metakarpal stabil (*undisplaced, minimal displaced*) dapat ditangani secara konservatif seperti penatalaksanaannya pada Gambar 2. 2. Kebanyakan fraktur metakarpal menghasilkan deformitas fleksi (angulasi) dan pemendekan

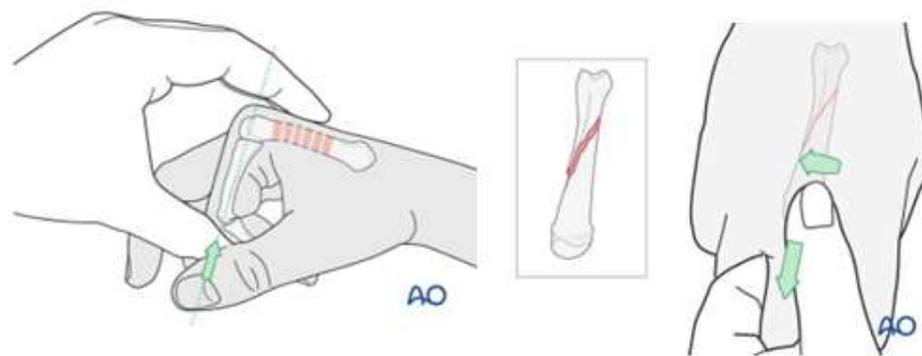
minimal (*shortening*) seperti terlihat pada Gambar 2. 3 Apabila deformitas fleksi yang terbentuk melebihi  $10^{\circ}$ - $20^{\circ}$  pada metakarpal 2 dan 3 serta melebihi  $20^{\circ}$ - $30^{\circ}$  pada metakarpal 4 dan 5, maka sudah indikasi untuk dilakukan Reduksi Terbuka dan Fiksasi Internal/*Open Reduction and Internal Fixation* (ORIF). Pemendekan kurang dari 2 mm tidak mempengaruhi fungsi tangan, tetapi apabila pemendekan melebihi 5 mm, maka sudah tidak dapat ditoleransi lagi, apabila tidak dapat dikoreksi maka merupakan indikasi dilakukan tindakan ORIF [3].



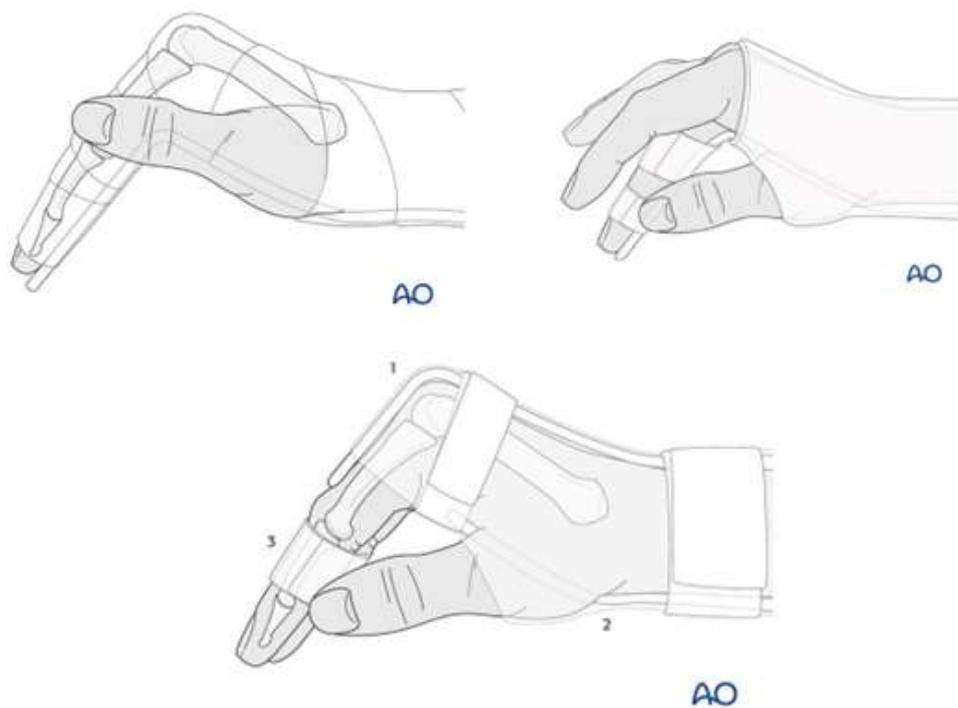
**Gambar 2. 3** Contoh Fraktur Metakarpal (kiri), Contoh Akibat Malrotasi yang tidak terkoreksi[3]

Pada penanganan secara tertutup diawali dengan melakukan tindakan reduksi, lihat Gambar 2. 4. Karena deformitas yang terjadi adalah deformitas fleksi, maka direduksi dengan cara memberikan tekanan kepala metakarpal dari arah palmar. Reduksi juga dapat dilakukan dengan menggunakan phalang proksimal sebagai piston [3].

Khusus untuk garis fraktur yang berbentuk oblik, lihat Gambar 2. 4. Apabila terjadi pemendekan, biasanya juga akan terjadi rotasi. Untuk mereduksinya perlu dilakukan kombinasi antara traksi longitudinal dan derotasi. Apabila reduksi gagal dilakukan, maka merupakan indikasi dilakukan ORIF [3].



**Gambar 2. 4** Reduksi fraktur metacarpal



**Gambar 2. 5** Pilihan immobilisasi: Immobilisasi dengan anterior *splint* (atas kiri), Immobilisasi casting dan aluminium *splint* (atas kanan), dan Attelle Fonctionelle (bawah) [3].

Pada Gambar 2. 5 atas kiri (imobilisasi dengan anterior palmar), pemilihan *splint* jenis ini mudah diaplikasikan dan tidak memerlukan terapi secara berkala selama imobilisasi berlangsung. Akan tetapi teknik ini akan mengimobilisasi

keseluruh jari yang tidak mengalami fraktur. Kemudian pemilihan imobilisasi selanjutnya pada Gambar 2. 5 atas kanan (imobilisasi *casting* dan aluminium *splint*), gips diaplikasikan mulai dari pergelangan tangan dengan ekstensi 30° lalu *splint* aluminium ditekuk hingga 90° pada jari yang mengalami fraktur. Jari tangan ditempelkan pada *splint* aluminium pada posisi *intrinsic plus*. Kemudian dilakukan *alignment* dan *derotasi* pada jari ke posisi yang benar. Pilihan imobilisasi jenis ini akan mengimobilisasi hanya pada jari tangan yang mengalami fraktur. Namun teknik ini, tidak dapat mengontrol *derotasi* dengan baik seperti yang dilakukan oleh pilihan imobilisasi dengan anterior palmar. Pada pilihan ketiga, Gambar 2. 5 (bawah), teknik imobilisasi ini menggunakan sekurangnya tiga komponen : (1) Dorsal *siplint* menjaga ekstensi 30° pada pergelangan tangan. (2) *Palmar siplint* menopang pergelangan dan telapak tangan pada posisi 30°. (3) *strapping* yang dipasang pada phalang tengah 2 sampai 5. Teknik ini memungkinkan imobilisasi pada hanya jari yang mengalami fraktur. Namun penerapan teknik ini sulit dan harus diawasi oleh tenaga medis yang berpengalaman untuk mencegah rotasi pada jari dan *malalignment*.

### 2.3 Ortosis *Splint*

Waktu dan inovasi telah membawa perubahan pada material dan teknik imobilisasi eksternal pada kasus fraktur tulang. Saat ini, plester mineral gips dan POP telah tergantikan oleh *splint* dan ortosis yang terbuat dari bahan sintetis dan teknik manufakturing aditif. *Splint* yang dihasilkan biasanya lebih ringan, lebih nyaman, dan mengakomodasi peningkatan fungsi. Kekakuan dari *splint* dapat disesuaikan dengan kebutuhan imobilisasi dan fungsionalitas penggunaan..

Peningkatan durabilitas, tahan air dan dalam beberapa kasus, kemampuan untuk dilepas oleh pasien atau keluarga [15].

Gips atau *casting splint* dibuat khusus untuk pasien menggunakan bahan seperti perban yang mengeras selama proses aplikasi, lihat Gambar 2. 6. Berbagai macam ortosis pre-fabrikasi dan *custom made* juga tersedia. *Plaster of Paris* (POP) dan bahan sintetik dapat digunakan untuk penanganan fraktur.



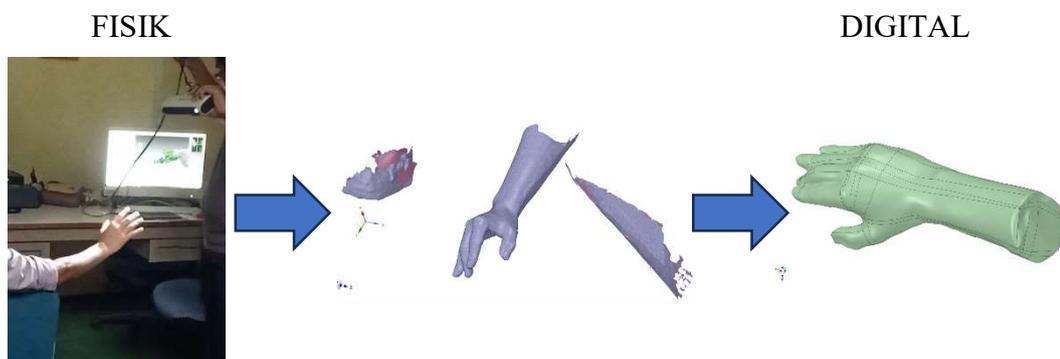
**Gambar 2. 6** (A) contoh *splint*, (B) contoh *casting* keliling penuh, (C) Contoh gips yang telah dibelah dan dibalut kembali dengan perban kasa agar tidak terjadi pembengkakan, (D) Contoh ortosis yang menunjukkan penyangga fraktur di mana tali velcro memungkinkan untuk melepas dan menyesuaikan kembali kekencangannya. [15]

Saat menggunakan POP atau bahan sintetis, lokasi cedera dan kekuatan pasien menentukan berapa banyak lapisan yang harus digunakan. Untuk meningkatkan stabilitas, *splint* harus menutupi sekitar dua pertiga keliling ekstremitas. Kemungkinan lain adalah penggunaan strip kecil material *splint* untuk memperkuat kekuatannya di area yang memerlukan stabilitas lebih, misalnya di sekitar sambungan. Saat menggunakan POP, ekstremitas atas biasanya terdiri dari 8-10 lapisan. Sedangkan karena kekakuan bahan sintetis lebih besar, jumlah lapisan yang dibutuhkan untuk ekstremitas atas hanya 6-8 lapisan.

#### **2.4 Rekayasa Terbalik (*reverse engineering*)**

Rekayasa terbalik memainkan peran penting dalam cabang desain mekanik dan industri berbasis manufaktur. Teknologi ini telah diakui secara luas sebagai teknologi penting dalam siklus desain produk. Dalam lingkungan manufaktur, urutan operasi biasanya dimulai dari desain produk dan diakhiri dengan pengoperasian mesin untuk merubah *raw material* menjadi produk akhir. Seringkali penting untuk membuat model CAD dari komponen yang ada menggunakan teknik digitalisasi. Ketika gambar atau dokumentasi mengenai suatu komponen asli tidak tersedia, akan tetapi analisis dan modifikasi diperlukan untuk membuat desain produk yang lebih baik, maka dilakukan pendekatan desain dan dokumentasi tersebut dengan metode rekayasa terbalik. Langkah penting yang terlibat dalam metode rekayasa terbalik adalah : (1) akuisisi data permukaan baik geometri maupun ukuran dari suatu objek nyata tiga dimensi, (2) segmentasi permukaan untuk membuat model CAD yang akurat [16].

Model yang berupa objek nyata tiga dimensi bagian tubuh akan membuat proses desain dalam CAD menjadi lebih menantang dan tidak ada jaminan bahwa desain yang sudah dibuat dapat merepresentasikan model tersebut dengan tepat. Rekayasa terbalik memberikan solusi untuk masalah ini karena model fisik akan diakuisisi secara digital dan menjadi sumber informasi untuk model CAD tiga dimensi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. 7. Dalam kata lain proses ini disebut sebagai proses fisik ke digital [17].

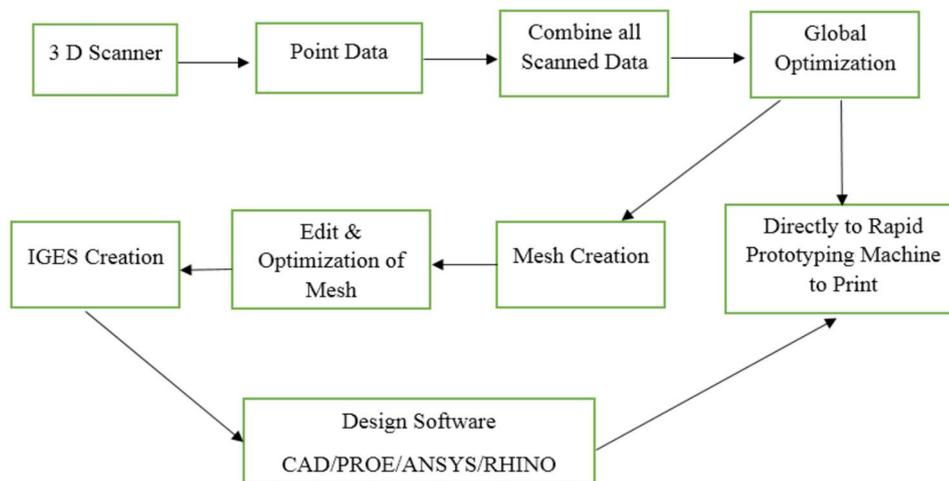


**Gambar 2. 7** Ilustrasi proses fisik ke digital (sumber : dok. pribadi)

## 2.5 Pemindaian 3D

Pemindai 3D pada dasarnya menangkap gambar objek dan menyimpannya dalam bentuk data digital dengan mengubah gambar permukaan suatu objek menjadi miliaran titik koordinat[18]. Dengan kata lain dapat dikatakan bahwa metode ini secara efektif mengubah objek 3D nyata apa pun menjadi format digital (koordinat XYZ) dalam urutan waktu yang cepat [19]. Pemindai 3D adalah perangkat dimana kita dapat memperoleh informasi digital dari model fisik apa pun. Teknologi ini dapat diterapkan dengan sukses dalam pengembangan prototipe suatu produk. Produk yang dipindai akan dimodelkan menjadi suatu kumpulan titik koordinat yang berjumlah miliaran dan disebut *cloud* data.

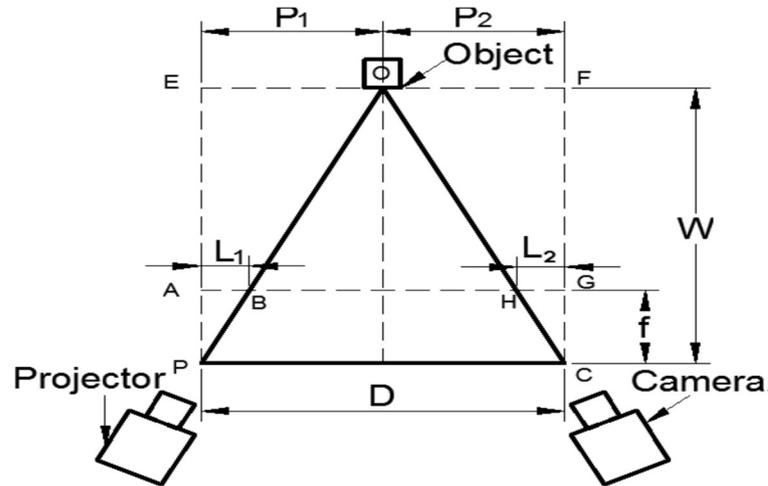
Pemindaian tiga dimensi adalah satu metode yang lebih sederhana untuk mendapatkan parameter 3D suatu objek menggunakan cahaya terstruktur berdasarkan *triangulation method* [19]. Kisi-kisi cahaya ditargetkan (diproyeksikan) pada permukaan objek untuk mendapatkan gambar yang jelas. Selain itu deformasi grid pada citra digunakan untuk menemukan kelengkungan 3D dari setiap titik objek yang ada dengan cara *triangulation*.



**Gambar 2. 8** Proses akuisisi data [19]

Aliran proses pemindaian dapat dilihat pada Gambar 2. 8. Pemindai menggunakan sinar *blue light* yang diproyeksikan oleh proyektor dan mengumpulkan *point data* dengan kamera beresolusi tinggi. Data yang diperoleh berupa *cloud* dengan jutaan titik yang diperoleh dari citra pemindai. Gambar pindaian ini didapatkan dari beberapa sudut area pemindaian agar mendapatkan semua informasi yang diperlukan tentang objek yang dipindai. Gambar-gambar yang didapatkan harus diselaraskan/digabungkan untuk mendapatkan informasi yang lebih baik. Penggabungan dapat dilakukan secara otomatis dengan

memberikan titik referensi. Setelah dilakukan penyelarasan, maka diperoleh gambar tiga dimensi (3D) objek yang terdiri dari informasi dimensi objek dan topografi [19].



**Gambar 2. 9** Gambaran umum perangkat pemindai 3D [19]

Posisi (koordinat) *data point* (titik) atau objek dari proses pemindaian dapat ditentukan seperti diilustrasikan dalam Gambar 2. 9. Pada Gambar 2. 9, menunjukkan penentuan posisi objek melalui pengukuran parameter dimensi, dengan asumsi  $\Delta PAB$  &  $\Delta PEO$  serupa. Panjang ( $L_1$  dan  $P_1$ ), maka kita memiliki suatu hubungan parameter, yaitu :

$$\frac{L_1}{P_1} = \frac{f}{W} \quad (1)$$

Dengan asumsi  $\Delta CHG$  &  $\Delta COF$  adalah serupa, maka diperoleh hubungan parameter Panjang  $L_2$  dan  $P_2$ , yaitu :

$$\frac{L_2}{P_2} = \frac{f}{W} \quad (2)$$

Dengan substitusi persamaan (1) dan (2) maka hubungan antara parameter Panjang dapat diketahui, yaitu :

$$\frac{L_1}{P_1} = \frac{f}{W} = \frac{L_2}{P_2} \quad (3)$$

Dari gambar 2.9 juga diketahui bahwa  $D=P_1+P_2$ , kemudian nilai disubstitusikan ke dalam persamaan (4), yaitu :

$$\frac{L_1}{P_1} = \frac{L_2}{D-P_1} \quad (4)$$

$$DL_1-L_1P_1=P_2L_2 \quad (5)$$

$$P_1 = \frac{DL_1}{L_1+L_2} \quad (6)$$

Oleh karena hubungan parameter panjang tersebut, maka dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut

$$Z = \frac{fP_1}{WL_1} = \frac{fD}{L_1+L_2} \quad (7)$$

$$X = \frac{L_1Z}{WL_1} = \frac{DL_1}{L_1+L_2} \quad (8)$$

$$Y = \frac{Y_1W}{f} = \frac{DY_1}{L_1+L_2} \quad (9)$$

Demikian dapat diketahui posisi setiap titik dari data objek yang ditangkap oleh kamera. Setelah mendapat suatu titik koordinat dari suatu objek pada sudut tertentu, kemudian kamera digerakan disekitar objek atau objek diputar (jika pemindaian menggunakan piring pemutar) dengan sudut baru. Kemudian data baru ditangkap dengan cara yang sama, penyelarasan data yang telah diperoleh akan memberikan informasi lengkap tentang objek tersebut. Dengan cara yang sama, proses ini diulangi hingga seluruh permukaan objek dipindai.

## 2.6 Manufaktur Aditif 3D *Printing Fused Deposition Modeling (FDM)*

Manufaktur aditif (*additive manufacturing/AM*) lahir sebagai teknologi *rapid prototyping* dengan proses menggabungkan bahan lapis demi lapis untuk membuat suatu objek [20], lihat Gambar 2. 10. Hal ini memungkinkan desainer untuk menghasilkan prototipe fisik yang akurat langsung dari model 3D CAD dalam waktu yang singkat. Proses ini sesuai untuk komponen yang pada umumnya rumit dengan desain kurva dan bentuk bebas yang memiliki geometri permukaan bidang yang terbatas. Pada proses manufaktur aditif, objek fisik tiga dimensi dibuat langsung pada mesin-mesin manufaktur aditif yang tidak bergantung pada peralatan pemroses seperti pada proses manufaktur subtraktif. Proses fabrikasi ini sering disebut dengan pencetakan tiga dimensi atau *3D Printing* [21].

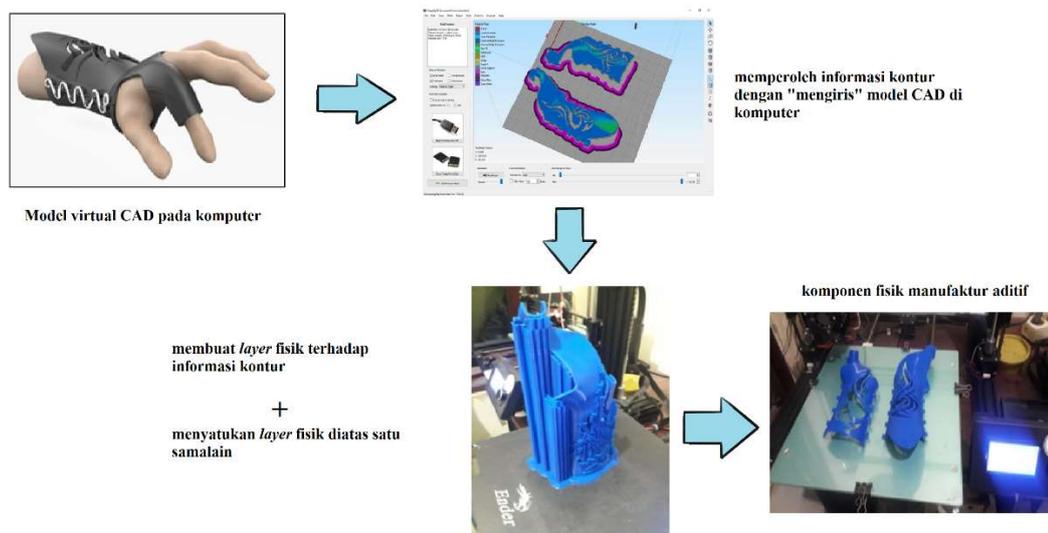


**Gambar 2. 10** Prinsip dari *layer manufacturing*. Lapisan berkontur (kiri), Objek 3D yang dibuat dari lapisan *staggered* (kanan).

Manufaktur aditif mencakup segala cara yang dapat dibayangkan untuk menambahkan bahan dalam pembuatan komponen fisik tiga dimensi. Realisasi

manufaktur aditif hanya didasarkan pada lapisan dan oleh karena itu disebut “*layer-based technology*”, “*layer-oriented technology*” atau bahkan “*layered technology*”. [21]

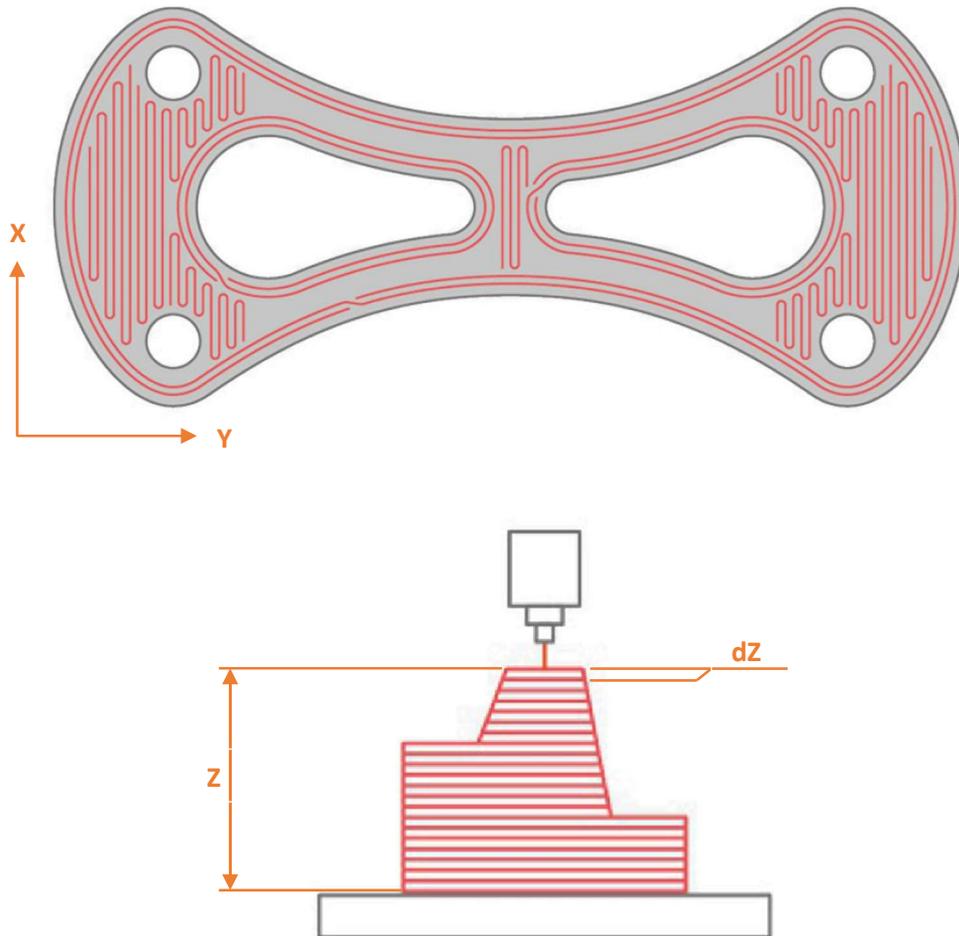
Ilustrasi dan proses manufaktur aditif sistem *Fused Deposition Modeling* (FDM) dapat dilihat pada Gambar 2. 11. Proses dimulai dengan kumpulan data CAD tiga dimensi (virtual) yang mewakili komponen yang akan diproduksi. Kumpulan data biasanya diperoleh dengan desain CAD tiga dimensi atau dengan pemindaian citra tiga dimensi (*3D scanning*).[21]



**Gambar 2. 11** Ilustrasi alur proses manufaktur aditif [11]

Data 3D berupa CAD “diiris” menjadi beberapa lapisan (*layer*), menggunakan komputer pada *software* khusus. Hasilnya, kumpulan irisan lapisan virtual dari data 3D dengan ketebalan tertentu dapat diperoleh seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2. 12. Kumpulan data tersebut terdiri dari : (1) data kontur (x-y), (2) ketebalan lapisan (dz) dan (3) banyaknya lapisan (koordinat z).

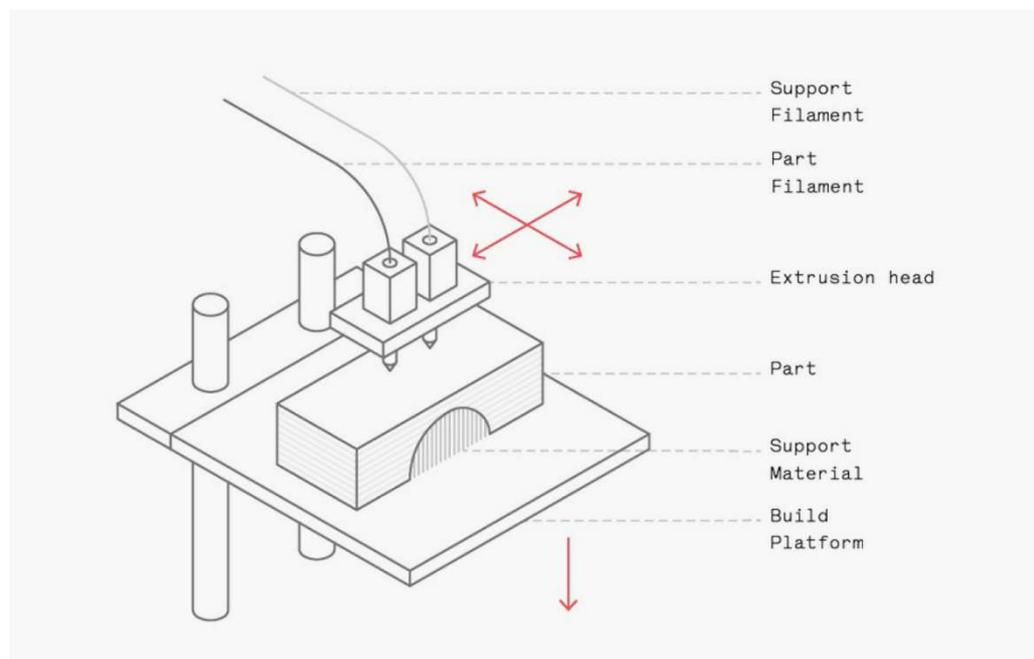
kemudian setiap lapisan dikirimkan ke mesin yang menjalankan langkah proses per lapisan untuk membuat komponen.[21]



**Gambar 2. 12** Ilustrasi *layer/lapisan* pada proses *3D Printing*.

Seperti yang terlihat pada Gambar 2. 13, mesin *3D printing* terdiri atas kepala ekstrusi dan *build platform*. Dibeberapa model dilengkapi *chamber* yang dipanaskan hingga  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  untuk pencetakan bahan atau material. kepala ekstrusi menghamparkan material di area x-y sesuai dengan kontur lapisan sebenarnya. Bahan (material) pembuatnya adalah filamen pre-fabrikasi yang digulung dan disimpan dalam katrid yang kemudian diumpankan secara terus-menerus ke kepala

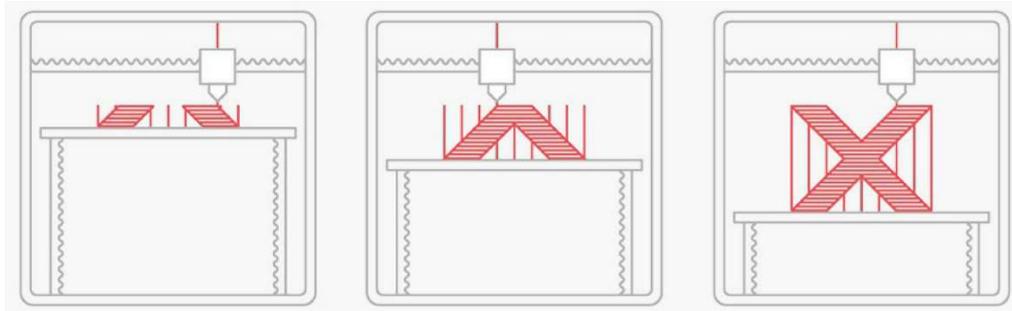
ekstrusi (lihat Gambar 2. 14). Katrid memiliki pengirim bawaan yang berkomunikasi dengan sistem manajemen material. Pada kepala cetak, bahan dicairkan oleh sistem pemanas listrik dan diekstrusi melalui nozel yang menentukan diameter *string* yang menentukan ketebalan lapisan [21].



**Gambar 2. 13** Skematik mesin 3D *printing* FDM [22]

Ada beberapa parameter cetak yang dapat disesuaikan pada mesin 3D *printing* FDM dalam rangka mendapatkan produk cetakan yang akurat, diantaranya kecepatan cetak dan ekstrusi, suhu nozel, ketebalan lapisan dan arah cetak. Parameter ini dikontrol berdasarkan jenis material yang sedang dicetak dan/atau personalisasi kebutuhan karakteristik prototipe yang ingin dicapai. Berdasarkan studi literatur [22], diameter nozel dan ketebalan lapisan menentukan kualitas dari suatu produk yang dicetak. Meskipun semua parameter menentukan akurasi dimensi suatu produk, tetapi diameter nozel yang lebih kecil dan tebal lapisan yang

lebih tipis biasanya dianggap sebagai solusi untuk suatu produk yang memerlukan permukaan yang halus dan tingkat kepresisian yang lebih tinggi.

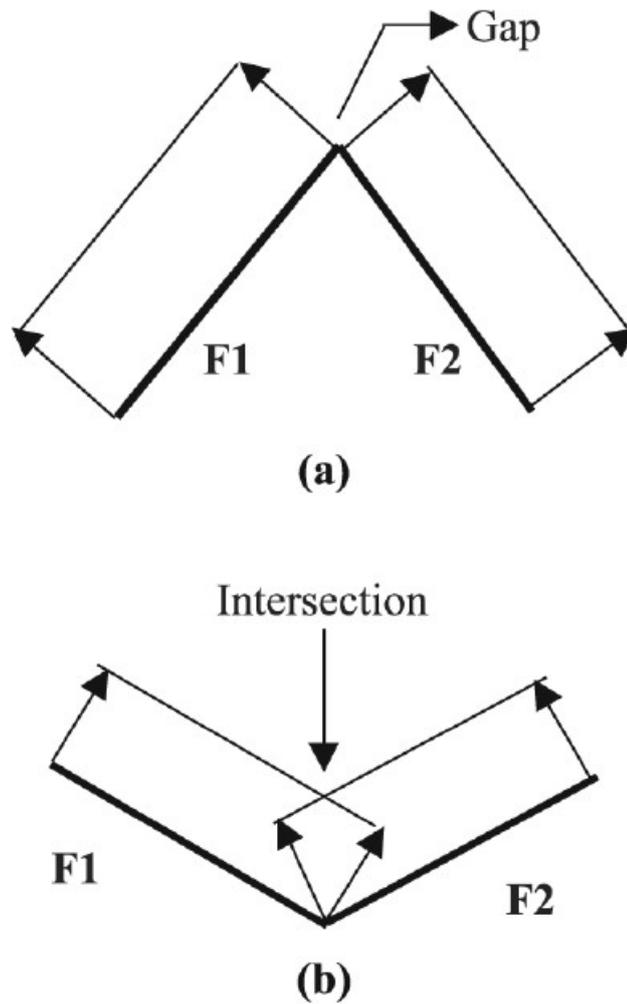


**Gambar 2. 14** Proses pencetakan FDM [22]

### ***2.7 Surface Offsetting***

Metode *offset* secara luas digunakan dalam berbagai aplikasi manufaktur, misalkan *toolpath* dalam pemesinan CNC, Representasi ruang akses dalam robotika dan pembuatan *rapid prototyping*/prototipe cepat. Pada bidang pembuatan prototipe cepat, *surface offset* sangat berguna sebagai metode untuk memodifikasi model pada geometri CAD [23].

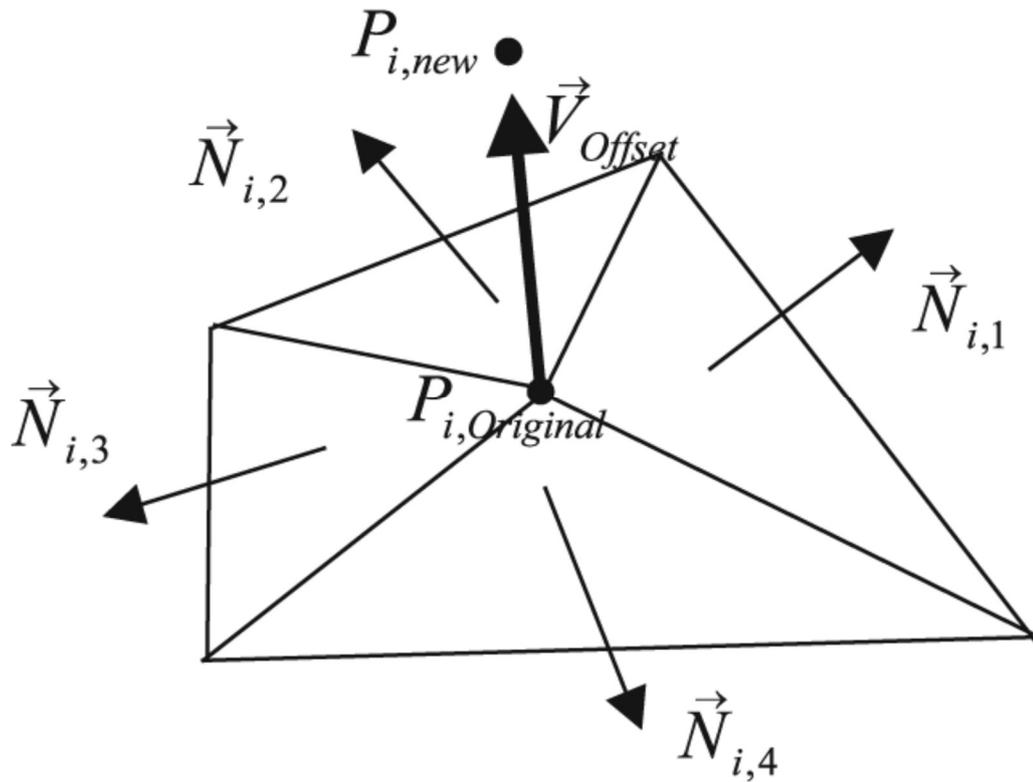
Menurut definisi, *offset* berarti memindahkan titik, kurva, atau permukaan model 3D dengan jarak konstan "d" ke arah yang normal terhadap kurva/permukaan model[24]. Berdasarkan studi literatur [25] bahwa pada umumnya, metode *offset* model 3D dicapai dengan cara meng-*offset* seluruh permukaan pada model, kemudian *trimming* (pemotongan) atau *extending* (penyambungan) permukaan dilakukan untuk merekonstruksi model 3D tertutup seperti yang terlihat pada Gambar 2. 15.



**Gambar 2. 15** (a) *Gap* antara dua permukaan yang di-*offset*. (b) Titik potong antara dua permukaan yang di-*offset* [24]

Untuk melakukan metode *offset* secara langsung pada model 3D yaitu dengan cara meng-*offset* setiap sisi segitiga dengan jarak *offset* pada arah normal seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. 16,  $P_{i,original}$  adalah posisi titik sebelum *offset*, dan  $P_{i,new}$  adalah posisi setelah *offset*. Mengingat vektor offset  $\vec{V}_{Offset}$  dan jarak offset  $d_{Offset}$ , maka persamaan berikut dapat diturunkan,

$$P_{i,new} = P_{i,original} + \vec{V}_{Offset} \cdot d_{Offset} \quad (10)$$



**Gambar 1.** Ilustrasi  $\vec{V}_{Offset}$ . [24]

Berdasarkan informasi geometris pada gambar 2.16, maka diketahui bahwa jarak tegak lurus dari  $P_{i,new}$  ke permukaan segitiga asli harus persis dengan jarak *offset*  $d_{offset}$  karena  $P_{i,new}$  terletak di titik persimpangan permukaan *offset* dari semua sisi segitiga, maka dapat dikatakan :

$$(P_{i,new} - P_{i,original}) \cdot N_{i,j} = d_{Offset} \quad (11)$$

Dimana  $N_{i,j}$  adalah vektor normal *vector* dari segitiga yang terhubung ke titik  $V_i$ . maka dari persamaan (10) dan (11), persamaan berikut dapat diturunkan :

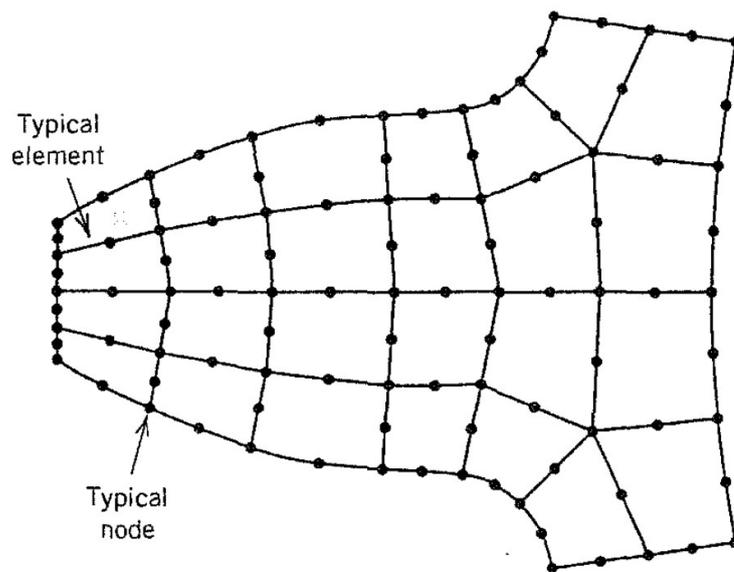
$$\vec{V}_{Offset} \cdot \vec{N}_{i,j} = 1 \quad (12)$$

Hasil dari substitusi  $\vec{V}_{\text{Offset}}$  terdapat pada persamaan (13)

$$\left( \sum_{j=1}^n w_j \cdot \vec{N}_{i,j} \right) \cdot \vec{N}_{i,k} = 1 \quad (k = 1 \dots n) \quad (13)$$

## 2.8 Finite Element Method (Metode Elemen Hingga)

Pengembangan metode elemen hingga untuk solusi masalah teknik dimulai dengan munculnya komputer digital [26]. Dengan munculnya komputer digital, masalah diskrit umumnya dapat diselesaikan dengan mudah meskipun jumlah elemennya sangat besar [27]. Inti dari solusi elemen hingga adalah sebuah set persamaan Aljabar, yang secara efektif dapat diselesaikan dan diterapkan secara umum melalui penggunaan komputer [26]. Sederhananya, aplikasi dari *Finite Element Method* (FEM) adalah melakukan pemotongan pada struktur menjadi beberapa elemen struktur yang disatukan dengan titik (*node*) seperti yang terlihat pada Gambar 2. 16.



**Gambar 2. 16** Mesh kasar 2D pada sebuah penampang gigi pada roda gigi [28].

Masalah elemen hingga mengarah ke sekumpulan besar persamaan aljabar linier simultan yang solusinya adalah dengan menyediakan parameter nodal dan elemen dalam formulasi. Sehingga dapat dihasilkan persamaan aljabar linier berikut :

$$[K]\{u\} = \{F\} \quad (14)$$

Dimana K adalah koefisien, u adalah *behavior* (perilaku) biasanya belum diketahui dan kemudian F adalah vektor dari nilai yang diketahui. Maka dalam pengaplikasiannya pada dunia teknik dapat didefinisikan pada Tabel 2. 1

Tabel 2. 1 Aplikasi aljabar linier pada FEM [29]

	<b>Property [K]</b>	<b>Behavior {u}</b>	<b>Action {F}</b>
<b>Elastic</b>	stiffness	displacement	force
<b>Thermal</b>	conductivity	temperature	heat source
<b>Fluid</b>	viscosity	velocity	body force
<b>Electrostatic</b>	dielectric permittivity	electric potential	charge

Karena variabel  $\{u\}$  umumnya tidak diketahui maka persamaan aljabar linier yang diaplikasikan dalam FEM menjadi :

$$\{u\} = [K]^{-1}\{F\} \quad (15)$$

## 2.9 Topology Optimization

Pemilihan material dan desain merupakan topik penting dalam dunia industri untuk menghasilkan produk yang berkelanjutan dan memiliki daya saing. Untuk memenuhi persyaratan kekuatan dan daya tahan pada produk, optimasi

topologi berperan untuk memprediksi desain produk yang optimal pada fase awal proses desain [30]. Optimasi topologi dalam konteks *finite element*/elemen hingga, memodifikasi elemen hingga sehubungan dengan tujuan optimasi (*goal*) dan batasan (*constraints*).

Berdasarkan studi literatur [30], pada persamaan (14) dapat dijelaskan bahwa objektif ( $f$ ) dapat diminimalkan atau dimaksimalkan yaitu berupa kekakuan atau volume struktur. Kemudian variabel desain ( $x$ ) mendeskripsikan desain struktur geometri. Variabel repon ( $y$ ) merepresentasikan respon struktural terhadap tegangan (*stress*), regangan (*strain*) atau perubahan bentuk (*displacement*). Kemudian, variabel kondisi bergantung pada variabel desain  $y(x)$ . Fungsi objektif ( $f$ ) patuh pada Batasan desain dan variabel desain untuk mengarahkan optimasi kepada solusi yang dicari.

$$\left\{ \begin{array}{l} \underset{x}{\text{Min}} \quad f(x, y(x)) \\ \text{subject to} \left\{ \begin{array}{l} \text{batasan desain pada } x \\ \text{batasan kondisi pada } y(x) \\ \text{batasan keseimbangan} \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (16)$$

Persamaan optimasi yang ditunjukkan oleh persamaan (16), disebut dengan perbandingan simultan. Berdasarkan fitur geometris yang diparametrikkan, maka optimasi dapat diklasifikasikan ke dalam :

- **Optimasi ukuran**, variabel desain ( $x$ ) merepresentasikan ketebalan struktural yaitu distribusi ketebalan atau luas penampang model rusuk yang dapat divariasikan.
- **Optimasi bentuk**, variabel desain ( $x$ ) mewakili batas dari besaran fisik yang harus diminimalkan.

## **BAB III METODOLOGI PENELITIAN**

### **3.1 Waktu dan tempat penelitian**

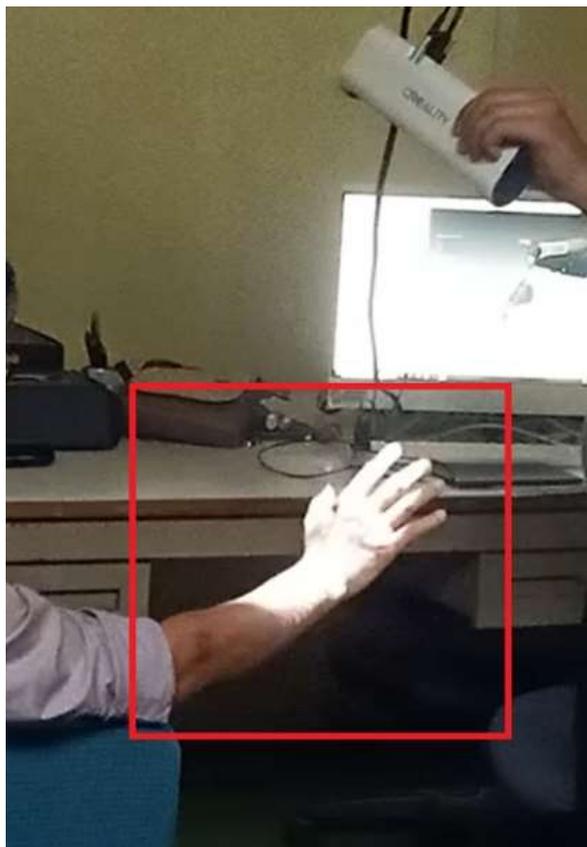
Pengambilan dan analisis data dilaksanakan pada bulan November 2022 sampai selesai. Metode pengambilan data dilakukan dengan pemindaian tiga dimensi (3D *Scanner*) tangan dan jari pasien yang akan dibuatkan *Splint*. Pengambilan data metode 3D Scanner dilakukan di Laboratorium CNC/CAD-CAM Fakultas Teknik Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung. Sedangkan material yang digunakan akan diuji metode Uji Tarik statik. Pengambilan data metode Uji Tarik dilakukan di Laboratorium Material Fakultas Teknik Badan Layanan Usaha Institut Teknologi Sumatera di Bandar Lampung. Pemodelan *Splint* 3D dilakukan juga dilakukan pada laboratorium Laboratorium CNC/CAD-CAM jurusan Teknik mesin Universitas Lampung.

### **3.2 Alat dan bahan penelitian**

#### **3.2.1 Sampel Spesimen Penelitian**

Sampel spesimen penelitian terlihat di Gambar 3. 1 adalah objek tangan pasien laki-laki berusia 52 tahun. Model tangan pasien ini tidak mengalami fraktur diafisis metacarpal sehingga model tangan pasien tersebut digunakan sebagai media

penelitian menyerupai dengan kaidah penatalaksanaan fraktur diafisi metacarpal yang sudah dijabarkan di Bab II dapat dilakukan (terapi fraktur menggunakan *splint*). Sebagai sampel penelitian, bagian tangan yang akan digunakan adalah setengah dari bagian lengan sampai dengan ujung jari telunjuk.



**Gambar 3. 1** Sampel spesimen penelitian berupa tangan seorang pasien

### 3.2.2 Peralatan penelitian

Dalam rangka mendukung terlaksananya proses pengambilan data sampel spesimen, penulis melibatkan beberapa peralatan penelitian diantaranya :

### 1. Pemindai 3D (3D *Scanner*)

Pemindai 3D/ 3D *scanner* adalah peralatan pemindai permukaan suatu objek yang dapat mengubah permukaan suatu objek menjadi data digital 3D yang dapat digunakan untuk pemodelan pada aplikasi CAD. Peralatan pemindai 3D yang digunakan adalah jenis Creality CR-10 yang memiliki fitur untuk melakukan pemindaian anggota tubuh (*body scan*).

### 2. Pencetak 3D (3D *Printer*)

Pencetak 3D/3D *Printer* adalah peralatan pencetak objek tiga dimensi (3D). Mesin pencetak yang digunakan adalah jenis *Fused Deposition Modelling* (FDM) Ender Pro. Mesin pencetak ini melelehkan material cetak berupa filamen termoplastik dan menggerakkan nozel sesuai dengan program. mesin yang digunakan memiliki spesifikasi yaitu : (1) dimensi cetak 220 x 220 x 250 mm. (2) suhu nozel 180-250 °C. (3) kecepatan cetak maksimal 180mm/s dan (4) resolusi lapisan (layer) 0,1-0,4 mm.

### 3. Mesin Uji Tarik Statik

Mesin uji tarik adalah peralatan pengujian material dengan cara memberikan beban (*force*) berupa tarikan kepada spesimen uji dengan bentuk tertentu. Mesin yang digunakan untuk mengambil data pengujian tarik material adalah jenis mesin uji tarik statis Zwick-Roell tipe 8803 dengan kekuatan tarik maksimal 250 KN.

### 4. Komputer Laptop

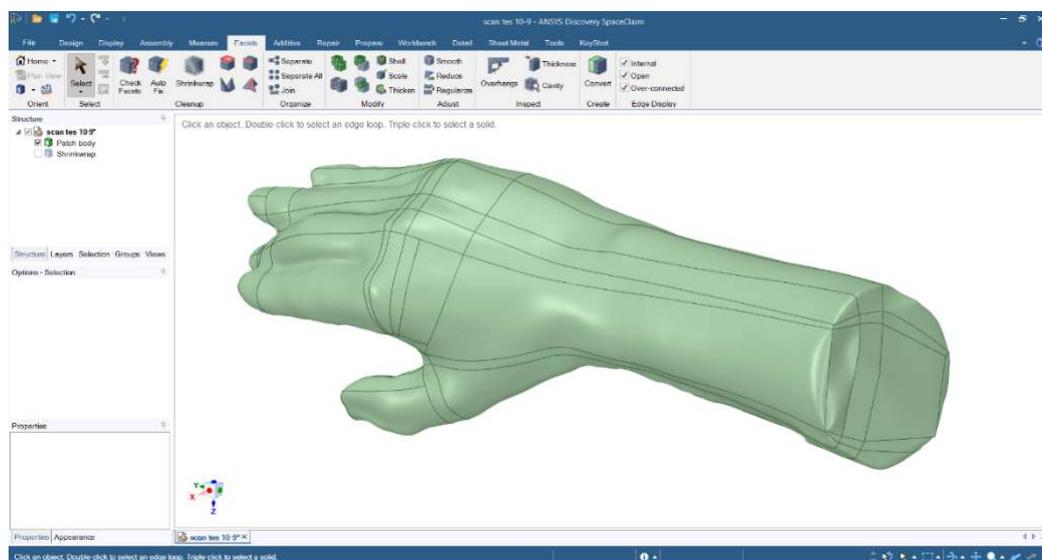
Untuk mendukung berbagai pengolahan data dan komputasi teknik, penulis menggunakan komputer laptop ASUS X550VX dengan spesifikasi prosesor Core i7-7700, RAM 8Gb dan prosesor grafis 2Gb.

### 3.2.3 Software Pemodelan & Pengolahan Data

Dalam mendukung terlaksananya proses desain dan optimasi, penulis menggunakan beberapa perangkat lunak (*software*) CAD dan analisis data, yaitu :

#### A. *Ansys Discovery SpaceClaim*

*Software* pemodelan pertama yang digunakan adalah *Ansys Discovery SpaceClaim* versi *trial* tahun 2019. *Ansys Discovery SpaceClaim* merupakan *software* dari *Ansys* yang dikhususkan untuk memproses file .STL, .OBJ dan masih banyak lagi yang berhubungan dengan permukaan *meshing* hasil dari pemindaian 3D. Gambar 3. 2 menunjukkan *Software Ansys Discovery SpaceClaim*.

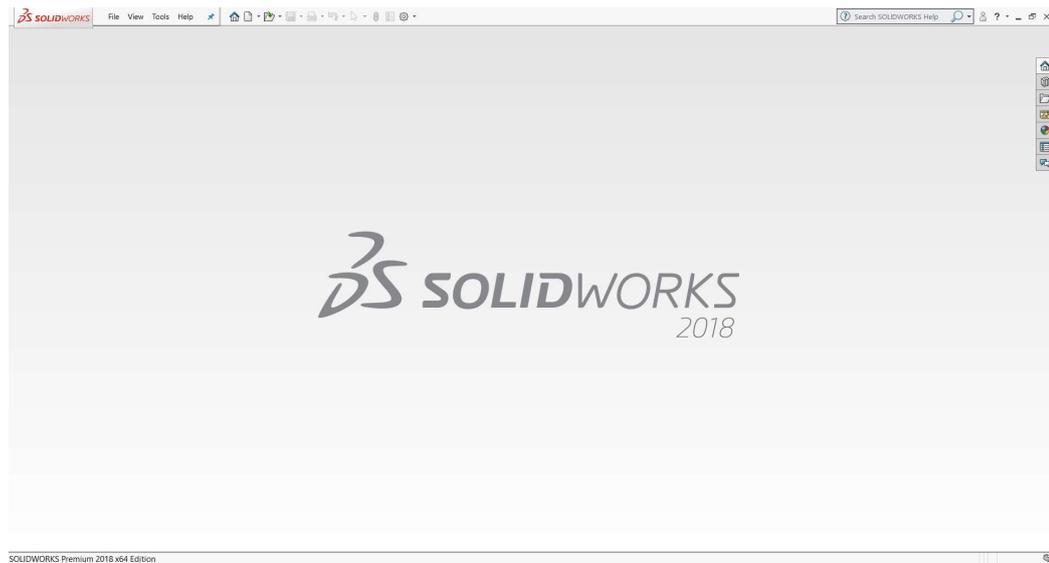


**Gambar 3. 2** *Software Ansys Discovery SpaceClaim*.

#### B. *Solidworks*

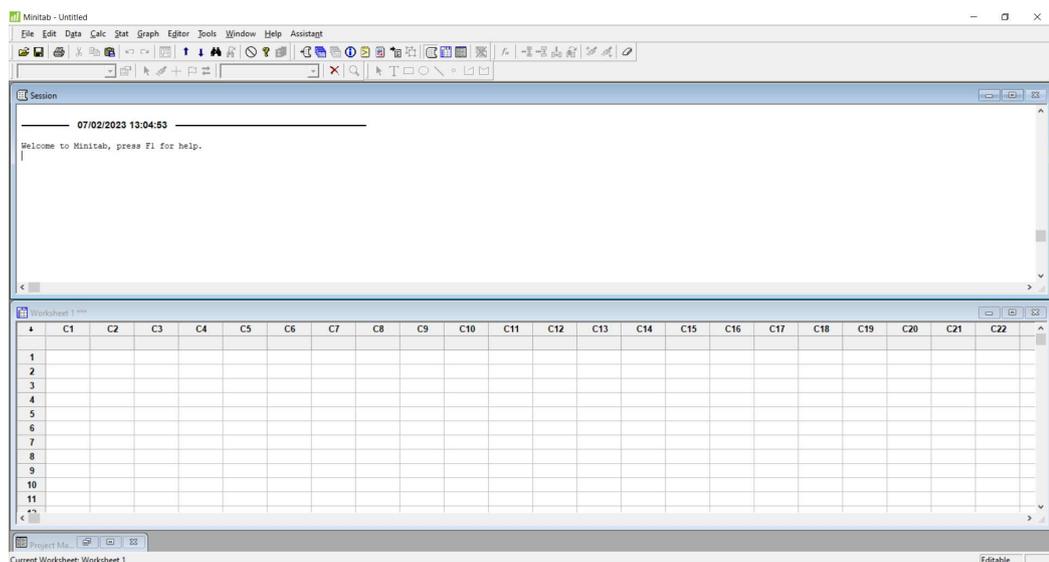
*Software* selanjutnya yang digunakan adalah *software Solidworks Premium* versi *trial* tahun 2018. *Solidworks* merupakan salah satu *Software CAD/CAE* dari

*Dassault System* yang digunakan dalam merekayasa bentuk-bentuk baik dua dimensi (2D) maupun tiga dimensi (3D). targetnya adalah *Software* ini dapat membantu penulis untuk memodelkan *splint* dalam 3D berdasar dari hasil model tiga dimensi tangan pasien. Pada Gambar 3. 3 menunjukkan tampilan utama *Software Solidworks*.



**Gambar 3. 3** Tampilan utama *Software Solidrowks Premium* versi 2018

### C. Minitab

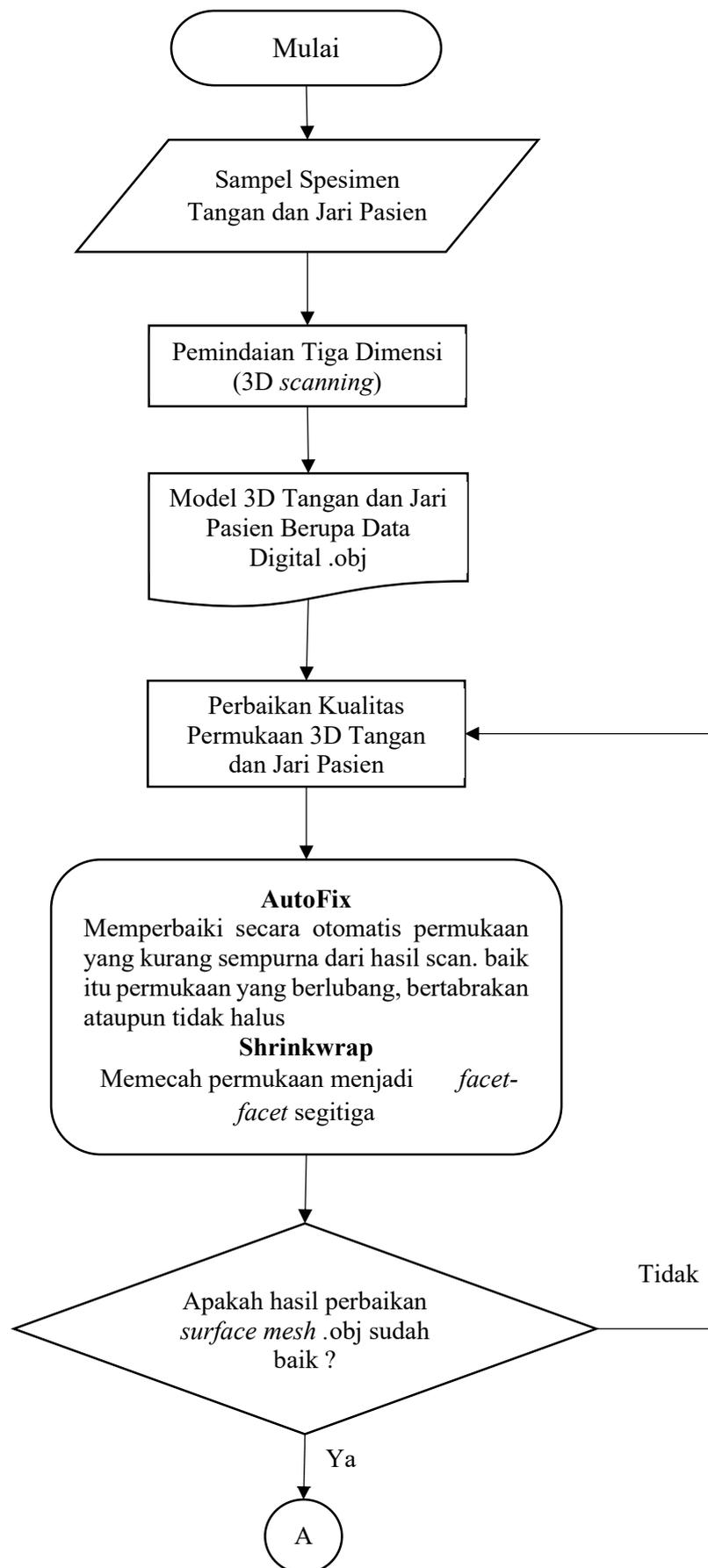


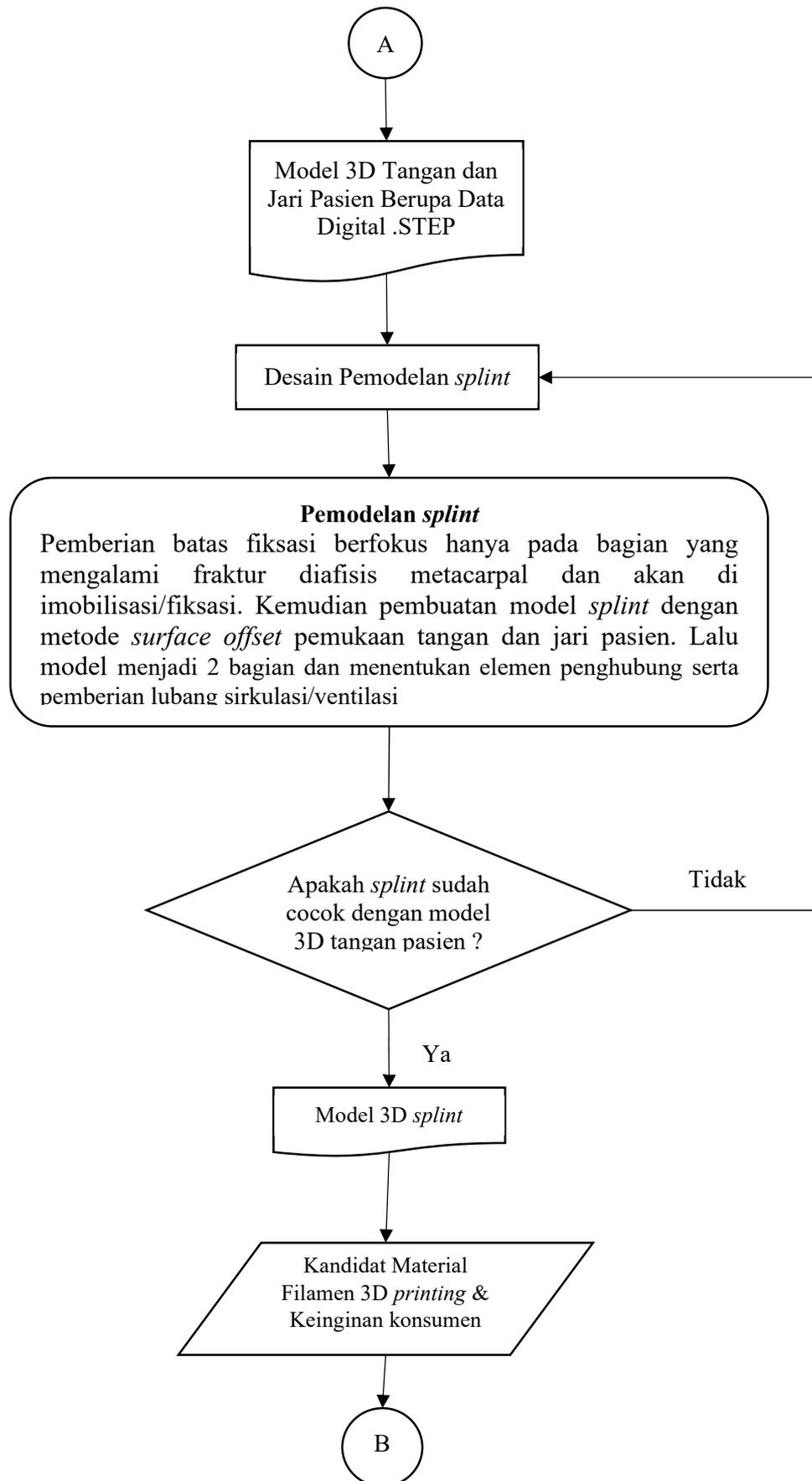
**Gambar 3. 4** Tampilan utama *Software Minitab Statistical* versi 2016

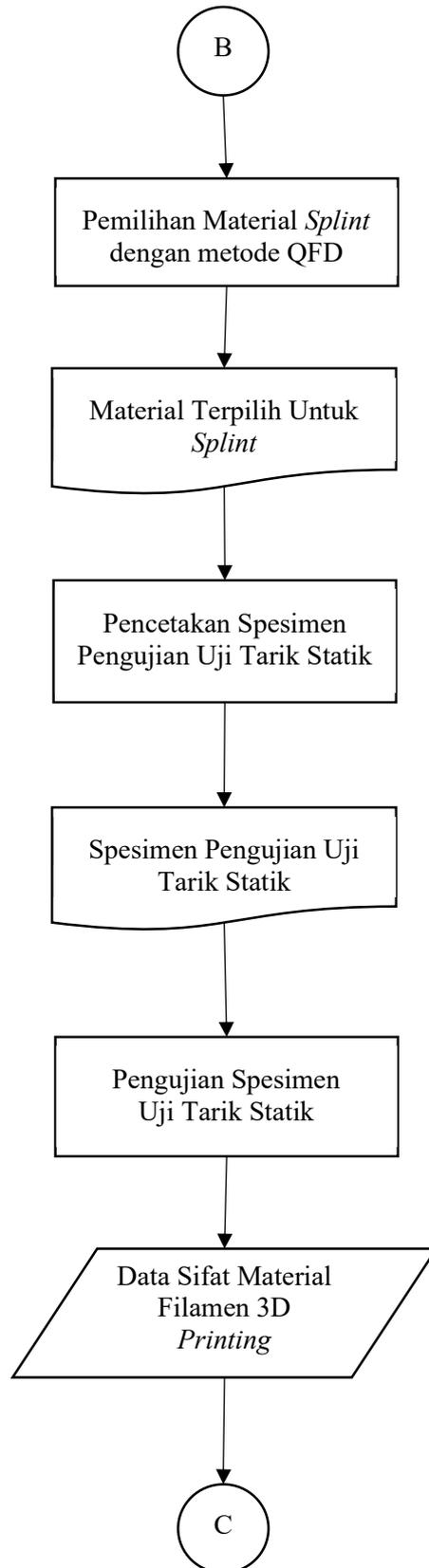
*Software* selanjutnya yang digunakan adalah *Minitab Statistical* versi 2016. *Minitab* adalah *software* yang bertujuan untuk melakukan serangkaian perhitungan statistik yang kompleks. Pada Gambar 3. 4 ditampilkan tampilan utama *Software Minitab Statistical*.

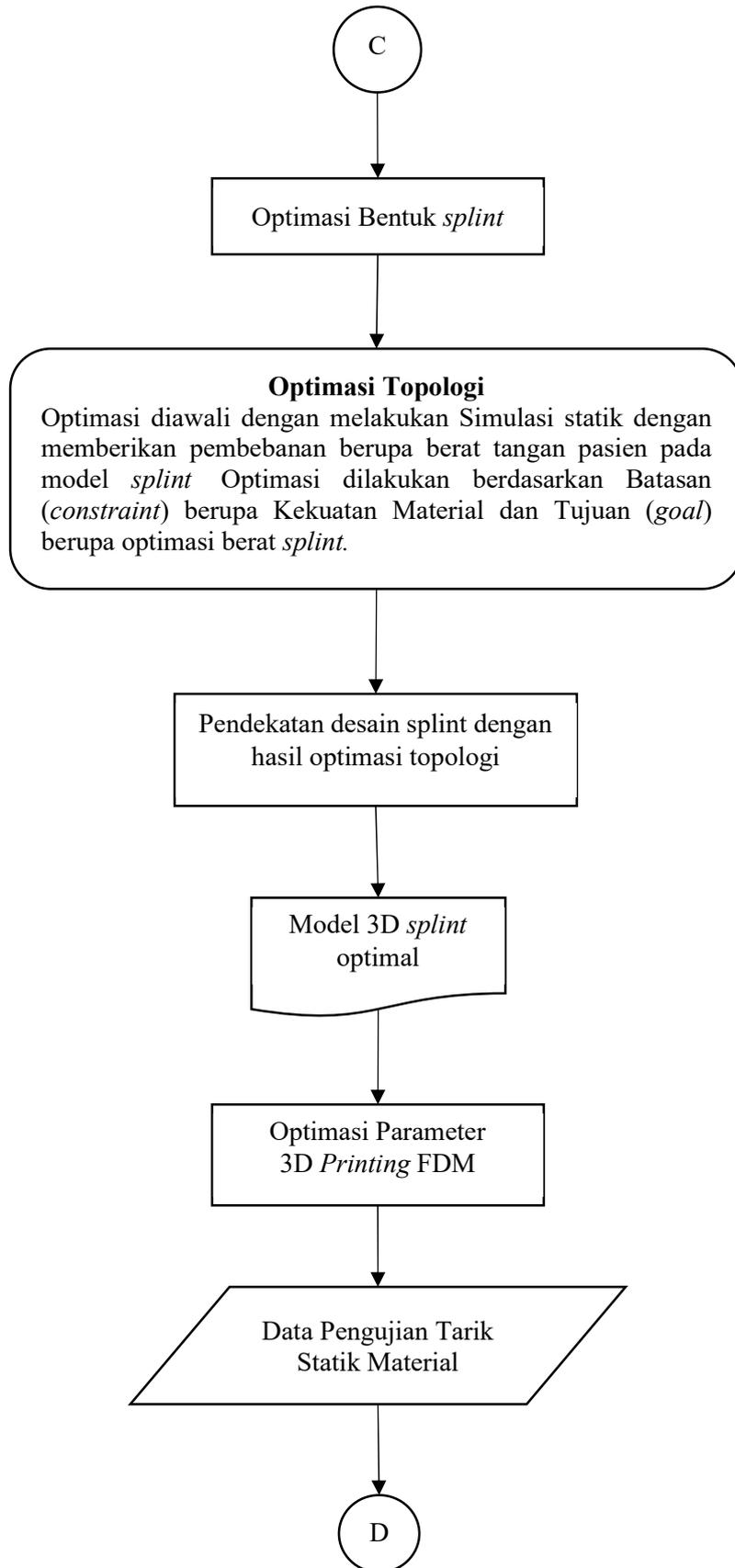
### 3.3 Prosedur penelitian

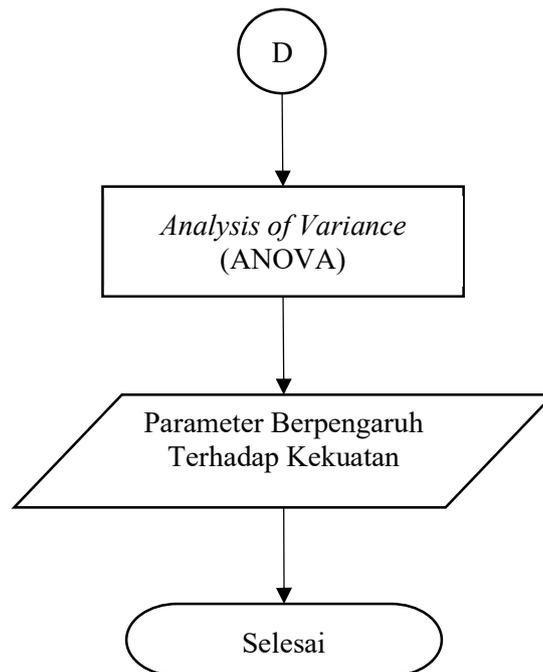
Prosedur penelitian ini dibagi menjadi beberapa tahap seperti terlihat pada Gambar 3. 5. Tahap pertama yaitu pemindaian tiga dimensi tangan dan jari pasien untuk mendapatkan 3D digital modelnya. Model 3D yang telah dipindai adalah berbentuk data komputer berformat *.obj*. Kemudian tahap kedua adalah memperbaiki kualitas permukaan 3D tangan pasien pada aplikasi *Ansys SpaceClaim 2019* dan didapatkan data 3D berformat *.step*. Kemudian tahap ketiga adalah membuat desain perancangan *splint* berdasarkan model 3D tangan pasien pada aplikasi *SolidWorks 2018 Versi trial*. Tahap keempat adalah melakukan simulasi pembebanan pada model 3D *splint* pada aplikasi *SolidWorks Premium Simulation 2019 versi trial* untuk mendapatkan perilaku *splint* saat diberi beban. Namun sebelum itu tahap pemilihan material yang akan digunakan untuk pembuatan *splint* perlu dilakukan berdasarkan spesifikasi yang diharapkan konsumen lalu kemudian melakukan pengujian material terpilih dengan cara mencetak terlebih dahulu sampel material pada mesin pencetak 3D (*3D printing*) dalam bentuk tertentu kemudian dilakukan pengujian tarik statik untuk mengetahui kekuatan material tersebut. Kemudian tahap kelima adalah melakukan optimasi bentuk yaitu *topology optimization* dan diakhiri oleh tahap keenam yaitu optimasi parameter manufaktur aditif untuk mendapatkan parameter manufaktur terbaik.









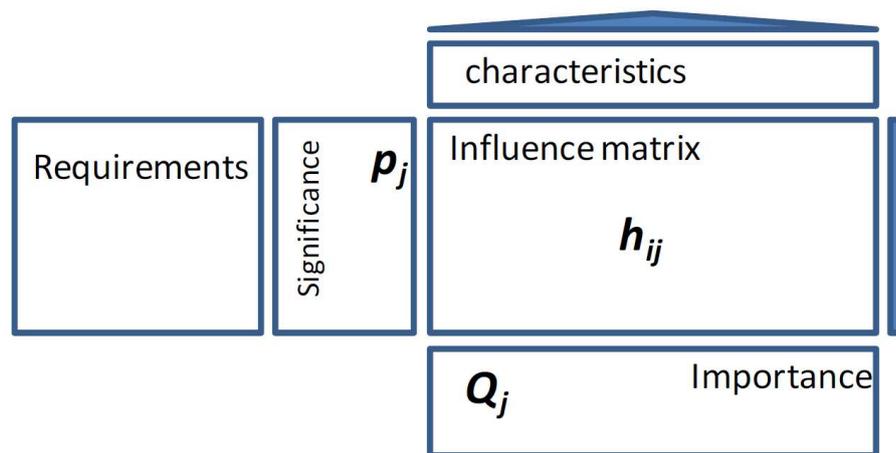


**Gambar 3. 5** Diagram alir pemrosesan data

### 3.3.1 Pemilihan Material *Printing*

#### 3.3.1.1. Metode *Quality Function Deployment* (QFD)

Metode yang akan digunakan untuk menentukan jenis material adalah dengan menggunakan metode *Quality Function Deployment* (QFD) metode ini memberikan pembobotan pada masing-masing target spesifikasi terhadap aspek *engineering*. *Quality Function Deployment* didefinisikan sebagai metode untuk mengembangkan sebuah desain berkualitas yang mengarah pada kepuasan konsumen dan kemudian menerjemahkan kebutuhan konsumen kedalam target desain. Faktor terbesarnya adalah jaminan kualitas yang bisa digunakan selama fase produksi.[31]



**Gambar 3. 6** Skematik *House of Quality*

Hal terpenting dari meningkatkan kualitas komponen/karakteristik/proses  $Q_j$  dihitung dari formula (17) [32]:

$$Q_j = \Sigma (p_i \times h_{ij}) \quad (17)$$

Dimana  $p_i$  – adalah signifikansi dari permintaan konsumen  $h_{ij}$  – adalah tingkat pengaruh dari komponen/karakteristik/proses dari pemenuhan permintaan konsumen (Gambar 3. 6).

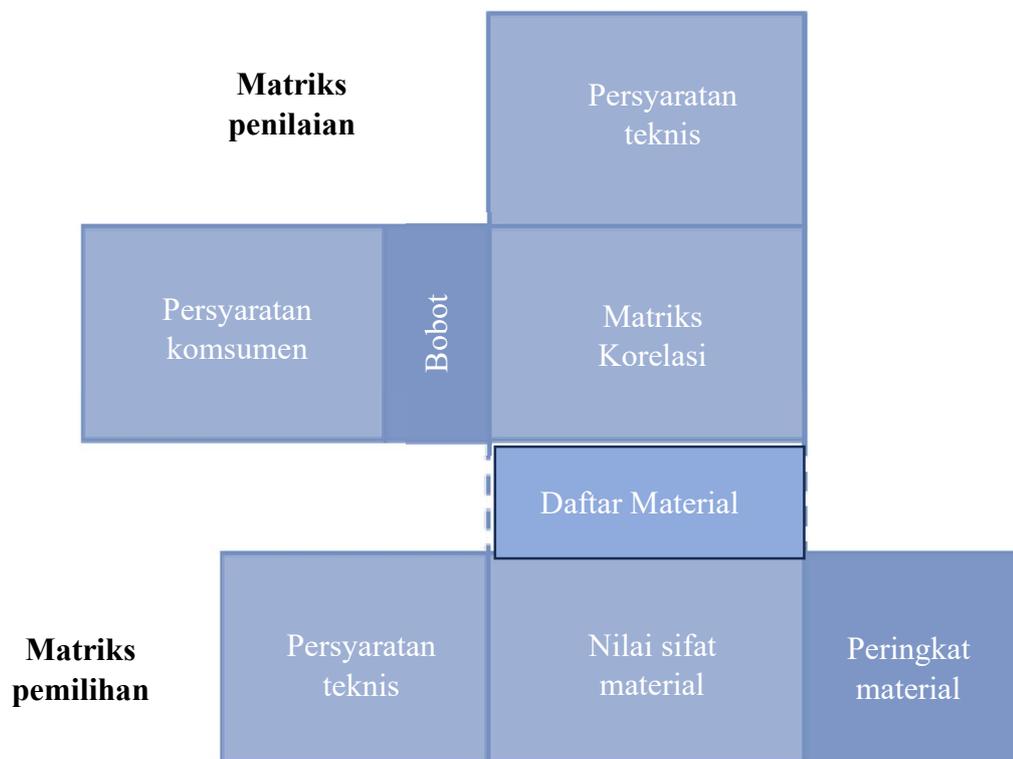
Signifikansi dari permintaan konsumen  $p_i$  biasanya terancang dari metode pertanyaan pada skala 10 poin dengan reduksi terhadap nilai relatif. Tingkat dari pengaruh  $h_{ij}$  ditentukan secara ahli menggunakan skala : 1-lemah, 3-menengah, 9-pengaruh kuat. Pengaplikasian dari metodologi dalam desain produk dan persiapan produksi memberikan penurunan waktu dan biaya dalam persiapan dan produksi sampai 30-50% [32].

Pemilihan bahan yang diusulkan, didasari oleh prinsip-prinsip QFD. Model konseptual yang diilustrasikan pada Gambar 3. 7, membagi prosedur menjadi dua

bagian : (1) Matriks Penilaian dan (2) Matriks Pemilihan. Untuk tujuan evaluasi dari metode yang di usulkan [33].

Matriks penilaian bertujuan untuk menerjemahkan persyaratan teknis konsumen menjadi sifat material yang umum digunakan, Seperti kekuatan, kepadatan, kemampuan print, kemampuan tahan terhadap suhu tertentu, ketahanan terhadap air, ketahanan terhadap kimia dan ketahanan terhadap kelelahan. Persyaratan teknis harus di pertimbangkan menggunakan skala tujuan dari 1, 3 dan 5, yang akan disebut bobot persyaratan[33].

- 5 – persyaratan dari komponen sangat penting terhadap material.
- 3 – persyaratan dari komponen agak penting terhadap material.
- 1 - persyaratan dari komponen memiliki kepentingan sangat rendah terhadap material.



**Gambar 3. 7** Matriks pemilihan bahan

Tabel sifat material juga disediakan, berfokus pada komponen yang dibutuhkan untuk melakukan persyaratan teknis yang di kumpulkan dari kebutuhan konsumen. Matriks korelasi untuk matriks seleksi menampilkan hubungan antara persyaratan teknis dengan sifat material. Setiap hubungan diberi bobot dengan skala empat tingkat[34] :

- 9 poin – Kuat
- 3 poin – Sedang
- 1 poin – lemah
- 0 poin – nol (tidak ada poin)

Terlepas dari bobot persyaratan, penggerak peningkatan juga harus dikaitkan dengan bagian yang dianalisis, jika persyaratan teknis komponen harus dimaksimalkan (menolak resiko = lebih tinggi lebih baik = +1) atau diminimalkan (menolak resiko = lebih rendah lebih baik = -1). Bobot persyratan dan penggerak peningkatan adalah satu-satunya dua elemen yang dapat dimodifikasi oleh perancang, dan semua informasi lain dari matriks pemilihan ditetapkan[35].

Sebuah survey dilakukan oleh peneliti dan ahli di bidang teknik untuk mengisi matriks korelasi. Data yang terkumpul dievaluasi dan nilai yang paling umum dimasukkan kedalam matriks korelasi akhir. Dengan demikian matriks seleksi dapat dianggap sebagai basis pengetahuan dan digunakan seperti yang di sajikan, tetapi juga dapat disesuaikan untuk kasus tertentu. Tabel 3. 1 menyajikan matriks seleksi yang di usulkan [36].

Tabel 3. 1 Matriks seleksi

	Material class	Engineering Metrics							
		Ultimate Strength	Durability	Density	Printability	Maximum service temperature	Water resistance	Chemically resistance	Fatigue resistance
Material									
Raw Score									
Rel. Weight									

Karena informasi yang ada dalam matriks korelasi tidak berubah, hanya ada kebutuhan umum untuk mengisi bobot dan penggerak untuk persyaratan teknis. Setelah itu, kepentingan relatif dan setiap sifat material dihitung secara otomatis menggunakan perhitungan sederhana, dilakukan dengan menggunakan penjumlahan total dari bobot dan penggerak dikalikan dengan korelasi antara persyaratan teknis dan sifat material.

$$\text{Sifat Material} = \sum \text{Bobot} \times \text{Penggerak Peningkatan} \times \text{indeks korelasi} \quad (18)$$

Persamaan (18) mengilustrasikan proses ini, dimana  $\Sigma$  mewakili persyaratan teknis terakhir yang tersedia di matriks penilaian. Nilai positif menunjukkan bahwa sifat material harus dimaksimalkan dan nilai negatif harus diminimalkan [33].

### 3.3.1.2. Simulasi Pembebanan Material 3D *Printing*

Material yang terpilih berdasarkan kriteria konsumen melalui metode QFD kemudian dilakukan simulasi pada perangkat lunak Solidworks 2018 versi *trial*. Simulasi dilakukan kepada 2 kandidat material dengan perolehan persentase paling besar. Data yang digunakan adalah sifat material yang dikeluarkan oleh supplier (*data sheet*) material kemudian diaplikasikan pada model *splint* yang sudah dirancang lalu diberi beban seberat tangan pasien tersebut. Hasil dari simulasi ini akan mendukung salah satu kandidat material terbaik dari perolehan perilaku *Factor of Safety* (FoS) saat dilakukan pembebanan pada model.

### 3.3.2 Pengujian Material Printing

Setelah pemilihan material dilakukan, langkah selanjutnya adalah melakukan pengujian pada material tersebut. Hal ini dilakukan demi mendapat karakteristik material sesuai dengan proses yang akan digunakan pada pembuatan *splint*. Pengujian material akan dilakukan menggunakan metode Uji Tarik Statik. Maka, spesimen pengujian akan dicetak terlebih dahulu menggunakan mesin 3D *printer* dengan bentuk tertentu sesuai standar yang akan digunakan yaitu ASME D638-03 *Type I*. Pencetakan spesimen uji dilakukan berdasarkan parameter pencetakan yang akan divariasikan. Perencanaan variasi parameter cetak akan dilakukan dengan metode *Full Factorial*.

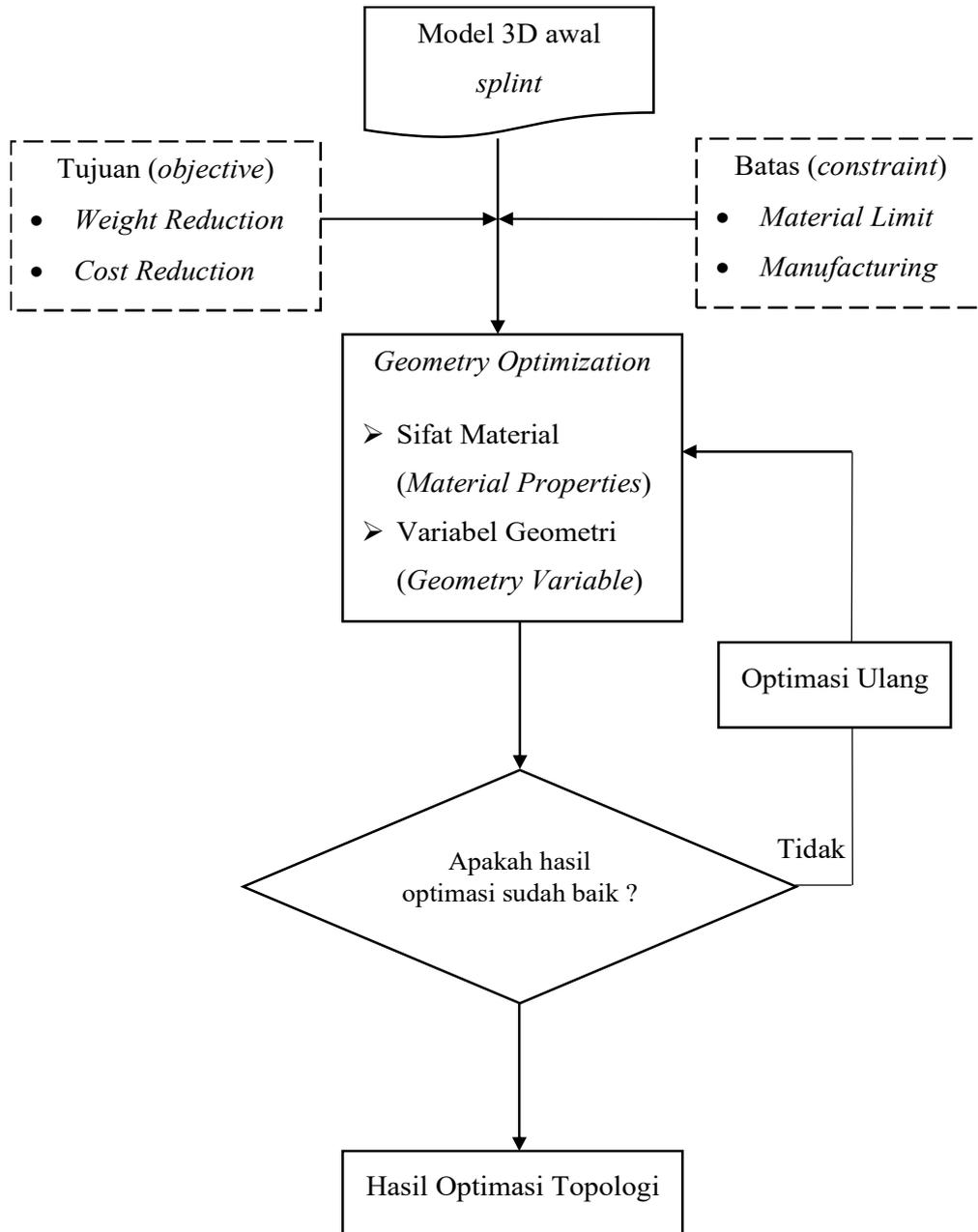
### 3.3.3 Perancangan *Splint*

Digitalisasi model tangan pasien kedalam bentuk model tiga dimensi dilakukan dengan metode pemindaian tiga dimensi (*3D Scanner*). Pemindaian dilakukan langsung pada tangan pasien yang dilakukan pada 9 Oktober 2022 di Laboratorium CAD/CAM Fakultas Teknik Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung. Pemindaian tiga dimensi dilakukan untuk mendapatkan model tiga dimensi yang sesuai dengan ukuran dan bentuk geometri tangan pasien.

Model tiga dimensi hasil pemindaian tiga dimensi kemudian digunakan sebagai acuan atau dasar perancangan dari *splint*. Model tiga dimensi tangan pasien digunakan sebagai dasar perancangan untuk mendapatkan model *splint* yang sesuai dengan ukuran dan bentuk geometri tangan pasien. Metode yang digunakan adalah *3D offset* permukaan dari model tiga dimensi tangan pasien yang dipindahkan pada ukuran tertentu sebagai ketebalan dari *splint* yang akan dibuat. Maka permukaan bagian dalam dari *splint* akan sama persis dengan permukaan asli dari anatomi tangan pasien.

### 3.3.4 Optimasi Bentuk *Splint*

Model tiga dimensi *splint* kemudian melalui tahapan simulasi pembebanan statik (*static load test*) untuk mengetahui keberhasilan perancangan yang dibuat. Hasil dari simulasi pembebanan statis adalah :  $\sigma$  (tegangan), SF (Safety Factor) dan  $\delta$  (defleksi). Simulasi dilakukan menggunakan bantuan software SOLIDWORKS PREMIUM 2018 STATIC SIMULATION.



**Gambar 3. 8** Diagram alir proses optimasi topologi

Langkah berikutnya adalah melakukan optimasi topologi pada *software* SolidWorks *Premium Topology Optimization* untuk mendapatkan bentuk yang paling optimal dari *splint*. Optimasi dilakukan berdasarkan hasil simulasi *load test* yang telah dilakukan sebelumnya untuk mendapatkan data perilaku *splint* saat diberi beban. Optimasi dilakukan untuk mendapatkan bentuk yang paling optimal

dari model *splint*. Dalam proses optimasi topologi ada dua variabel yang mengatur proses optimasi yaitu tujuan (*objective*) dan batas (*constraint*). Metodologi optimasi topologi dapat dilihat pada Gambar 3. 8, dimana model awal yang sudah melalui proses desain awal diberikan dua variabel optimasi yaitu *objective* dan *constraint*. Tujuan yang ingin dicapai yaitu pengurangan berat yang otomatis akan mengurangi juga biaya produksi. Kemudian batas yang diberikan adalah dari segi material dan proses pembuatan (*manufacturing*).

### 3.3.5 Optimasi Manufaktur Aditif (*Additive Manufacturing*)

Untuk mencapai produk sesuai dengan keinginan konsumen akan tetapi juga tidak berlebihan dalam perancangannya (*overengineering*) atau di bawah potensi dari perancangan tersebut maka perlu dilakukan sebuah upaya untuk mendapat parameter yang terbaik dengan melakukan optimasi dalam proses pembuatan *splint*. Langkah-langkah optimasi yang dilakukan adalah sebagai berikut :

1. Optimasi Kekuatan

Kekuatan dari *splint* adalah salah satu tujuan utama dilakukannya penelitian ini. Hal ini karena dari penelitian terdahulu belum ada kajian mengenai kekuatan dari *splint* yang dibuat. Sedangkan kekuatan dari *splint* harus menyerupai bahkan lebih baik daripada *splint* tradisional yang dikenal berat dan tidak fleksibel dalam penggunaan sehari-hari. Ketika kekuatan yang optimal dapat diperoleh maka salah satu tujuan dari ketahanan produk *splint* dan fleksibilitas dari penggunaan sehari-hari akan tercapai.

## BAB V PENUTUP

### 5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini yaitu:

1. Pemindaian 3 (tiga) dimensi pada tangan dan jari pasien telah berhasil dilakukan dengan hasil data digital tangan dan jari pasien yang setelah dilakukan proses menghilangkan *noise* dari pemindaian 3D didapatkan model *solid* tangan dan jari pasien.
2. Model 3D dari splint telah didapatkan berdasarkan model *solid* dari tangan dan jari pasien dengan menggunakan metode *surface offsetting*. Terdapat penambahan lubang-lubang pada model yang berfungsi sebagai ventilasi.
3. Pemilihan material berdasar kepada kebutuhan konsumen akan *splint* yang kuat, nyaman dan tahan air. Maka dengan metode *Quality Function Deployment* kebutuhan konsumen tersebut dipadukan dengan sifat material dari masing-masing kandidat yaitu : *Acrylonitrile Butadiene Styrene* (ABS), *Polylactic Acid* (PLA), *Polyethylene Terephthalate* (PETG), Carbon Fiber dan *Polypropylene*. Didapatkan jenis material PETG yang paling memenuhi persyaratan kebutuhan konsumen.
4. Pengujian pembebanan terhadap desain awal splint menghasilkan tegangan (stress) maksimal sebesar 5,15 MPa dan perubahan bentuk (*displacement*)

sebesar 0,692 mm dengan pemberian beban berat tangan pasien sebesar 337 gr. Faktor Keamanan dari desain *splint* didapatkan sebesar 1,54. Kemudian optimasi topologi dilakukan dengan batasan (*constraint*) *displacement* material PETG dan tujuan (*goal*) mengurangi berat *splint*. Maka didapatkan model optimasi topologi yang menjadi acuan pendekatan desain *splint*. Setelah dilakukan pendekatan desain *splint* terhadap hasil optimasi topologi, dilakukan kembali simulasi pembebanan statik sebagai validasi desain *splint*, didapatkan maksimal tegangan (*stress*) yang terjadi berkurang menjadi 2,19 MPa dan perubahan bentuk (*displacement*) juga berkurang menjadi 0,535 mm. Berat *splint* setelah simulasi berkurang menjadi 99,65 gr. Sedangkan Faktor Keamanan dari desain meningkat menjadi 8,43.

5. Pada proses optimasi parameter manufaktur aditif didapatkan parameter yang paling berpengaruh pada *Tensile Strength*, *Yield Strength* dan *Elastic Modulus* adalah Suhu Nozel dan Arah Cetakan sehingga untuk mendapatkan kekuatan material yang optimum dari proses 3D Print sampel Splint bermaterial PETG, parameter 3D Print yang dapat dipilih adalah suhu nozel level yang tinggi (250°C), layer yang tebal (0.4 mm), kecepatan print yang lambat (30 mm/s), dan tentu saja arah cetakan arah melintang.
6. Desain ortosis *splint* telah dilakukan berdasarkan hasil pemindaian 3D tangan dan jari pasien, maka didapatkan model 3D ortosis *splint* yang sesuai dengan anatomi tangan pasien. Penambahan lubang pada model splint sebagai ventilasi akan mengurangi resiko iritasi pada kulit tangan pasien. Didapatkan berat *splint* dari perancangan dengan jenis material filamen PETG adalah seberat 99.65 gr.

## 5.2 Saran

Saran dari penulis selaku peneliti yaitu :

Peneliti telah melakukan perancangan splint dengan metode Rekayasa Terbalik (*reverse engineering*) dan Manufaktur Aditif (*additive manufacture*). Namun perlu dilakukan analisis lebih lanjut tentang variasi ketebalan splint terhadap optimasi bentuk splint. Diameter dari lubang-lubang yang berfungsi sebagai ventilasi juga perlu divariasikan ukurannya maupun dari bentuknya. Penggunaan metode 3D *Printing* yang lain juga perlu dipertimbangkan seperti 3D *Printing Stereolithography* (SLA) yang mampu menghasilkan permukaan yang lebih halus yang akan mengurangi gaya gesek pada kulit manusia. Uji klinis terhadap material PETG yang digunakan pada perencanaan pembuatan *splint* terhadap kulit manusia juga perlu dilakukan.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] W. B. Ashley and R. W. Michael, *Apley and Solomon's System of Orthopaedics and Trauma*, 10th ed. United States of America: CRC Press, 2018.
- [2] C. M. Court-Brown, J. D. Heckman, M. M. McQueen, W. M. Ricci, and P. Tornetta III, *Rockwood and Green's fractures in adults*, 7th ed., vol. 1. Philadelphia: Wolters Kluwer Health, 2015.
- [3] Fricker R, "Nonoperative treatment at Oblique Fracture of Metacarpal Shaft ," *USA: AO Foundation*, 2010. <https://bit.ly/2PBb8Xw> (accessed Feb. 01, 2023).
- [4] J. Li and H. Tanaka, "Rapid customization system for 3D-printed splint using programmable modeling technique – a practical approach," *3D Print Med*, vol. 4, no. 1, Dec. 2018, doi: 10.1186/s41205-018-0027-6.
- [5] Y.-J. Chen, H. Lin, X. Zhang, W. Huang, L. Shi, and D. Wang, "Application of 3D-printed and patient-specific cast for the treatment of distal radius fractures: initial experience," *3D Print Med*, vol. 3, no. 1, Mar. 2017, doi: 10.1186/s41205-017-0019-y.
- [6] L. Harya Nugraha and M. J. Hidayat, "Redesain Cast Ortopedi Menggunakan Teknologi 3d Printing," *Seminar Nasional Sains dan Teknologi Terapan VII*, 2019.
- [7] Y. J. Choo, M. Boudier-Revéret, and M. C. Chang, "3D printing technology applied to orthosis manufacturing: Narrative review," *Annals of Palliative Medicine*, vol. 9, no. 6. AME Publishing Company, pp. 4262–4270, Nov. 01, 2020. doi: 10.21037/apm-20-1185.
- [8] I. Gibson and H. Kong, *Advanced Manufacturing Technology for Medical Applications : Reverse Engineering, Software Conversion, and Rapid Prototyping*. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd, 2005.
- [9] F. Blaya, P. S. Pedro, J. L. Silva, R. D'Amato, E. S. Heras, and J. A. Juanes, "Design of an Orthopedic Product by Using Additive Manufacturing Technology: The Arm Splint," *J Med Syst*, vol. 42, no. 3, Mar. 2018, doi: 10.1007/s10916-018-0909-6.

- [10] L. A. García-García, M. Rodríguez-Salvador, and M. D. Moya-Bencomo, "Development of a customized wrist orthosis for flexion and extension treatment using reverse engineering and 3D printing," in *IFMBE Proceedings*, Springer Verlag, 2018, pp. 609–613. doi: 10.1007/978-981-10-9038-7\_113.
- [11] H. Ismunandar, Y. Burhanuddin, and G. A. Ibrahim, "Penelitian Dasar FK Unila 2021," 2021.
- [12] C. Cooper and M. I. Cawley, "Algodystrophy (Sudeck's syndrome) in association with hereditary angioneurotic oedema," *J R Soc Med*, Mar. 1985.
- [13] J. C. Thompson, *Netter's Concise Orthopaedic Anatomy*, 2nd ed. Philadelphia: Saunders Elsevier, 2010.
- [14] F. M. Azar and J. H. Beaty, *Campbell's Operative Orthopaedics*, 14th ed. Philadelphia: Elsevier, 2021.
- [15] K. Dresing and P. Trafton, *Casts, Splints, and Support Bandages Nonoperative Treatment and Perioperative Protection, AO Trauma, Thieme 2014-TLS*. Clavadelstrasse: AO Foundation, 2014.
- [16] A. Kumar, P. K. Jain, and P. M. Pathak, "Reverse Engineering in Product Manufacturing: An Overview," 2013, pp. 665–678. doi: 10.2507/daaam.scibook.2013.39.
- [17] V. Raja and K. J. Fernandes, *Reverse Engineering: An Industrial Perspective*. Cardiff: Springer, 2008.
- [18] G. Genta, P. Minetola, and G. Barbato, "Calibration procedure for a laser triangulation scanner with uncertainty evaluation," *Opt Lasers Eng*, vol. 86, pp. 11–19, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.optlaseng.2016.05.005.
- [19] L. Kumar, M. Shuaib, Q. Tanveer, V. Kumar, M. Javaid, and A. Haleem, "3 D scanner integration with product development," *International Journal of Engineering and Technology(UAE)*, vol. 7, no. 2.13 Special Issue 13, pp. 220–225, 2018, doi: 10.14419/ijet.v7i2.13.11690.
- [20] X. Peng, L. Kong, J. Y. H. Fuh, and H. Wang, "A review of post-processing technologies in additive manufacturing," *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, vol. 5, no. 2, Jun. 2021, doi: 10.3390/jmmp5020038.
- [21] A. Gebhardt, *Understanding additive manufacturing : rapid prototyping, rapid tooling, rapid manufacturing*. Hanser Publishers, 2012.

- [22] B. Redwood, F. Schöffler, and B. Garret, *The 3D Printing Handbook Technologies, design and applications by Ben Redwood, Filemon Schöffler, Brian Garret*. Amsterdam: 3D Hubs B. V., 2017.
- [23] T. Maekawa, "An overview of offset curves and surfaces," *Computer-Aided Design*, vol. 31, Apr. 1998, doi: [https://doi.org/10.1016/S0010-4485\(99\)00013-5](https://doi.org/10.1016/S0010-4485(99)00013-5).
- [24] X. Qu and B. Stucker, "A 3D surface offset method for STL-format models," *Rapid Prototyp J*, vol. 9, no. 3, pp. 133–141, 2003, doi: 10.1108/13552540310477436.
- [25] T. Satoh and H. Chiyokura, "Boolean Operations on Sets Using Surface Data," *Proceedings of the first ACM symposium on Solid modeling foundations and CAD/CAM applications*, pp. 119–126, 1991, doi: <https://doi.org/pdf/10.1145/112515.112536>.
- [26] K.-J. Bathe, *Finite Element Procedures*. New Jersey: Prentice Hall, 1995.
- [27] O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor, and J. Z. Zhu, *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*, 6th ed. Burlington: Elsevier, 2005. [Online]. Available: [www.cimne.upc.es](http://www.cimne.upc.es)
- [28] R. D. Cook, *Finite Element Modeling For Stress Analysis*. Madison: John Wiley & Sons, 1995.
- [29] O. de Weck and I. Y. KIm, "Finite Element Method," *Engineering Design and Rapid Prototyping*, 2004.
- [30] R. Larsson, "Methodology for Topology and Shape Optimization: Application to a Rear Lower Control Arm," Göteborg, 2016.
- [31] L. K. Chan and M. L. Wu, "Quality function deployment: A comprehensive review of its concepts and methods," *Quality Engineering*, vol. 15, no. 1, pp. 23–35, Sep. 2002. doi: 10.1081/QEN-120006708.
- [32] Y. Akao and G. H. Mazur, "The leading edge in QFD: Past, present and future," *International Journal of Quality & Reliability Management*, vol. 20, no. 1, pp. 20–35, Feb. 01, 2003. doi: 10.1108/02656710310453791.
- [33] R. K. Scalice, G. C. Brascher, and D. Becker, "A knowledge-based material selector using Quality Function Deployment principles," *Product Management & Development*, vol. 10, no. 1, pp. 23–32, 2012, doi: 10.4322/pmd.2012.011.
- [34] S. B. Han, S. K. Chen, M. Ebrahimpour, and M. S. Sodhi, "A conceptual QFD planning model," *International Journal of Quality*

- and Reliability Management*, vol. 18, no. 8, pp. 796–812, 2001, doi: 10.1108/02656710110401187.
- [35] K. Prasad and S. Chakraborty, “A QFD-based decision making model for computer-aided design software selection,” *International Journal of Industrial Engineering and Management*, vol. 7, no. 2, pp. 49–58, 2016, doi: 10.5267/j.msl.2016.1.006.
- [36] J. A. Pérez, “3D Printed Orthosis Design,” Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València, Valencia, 2018.