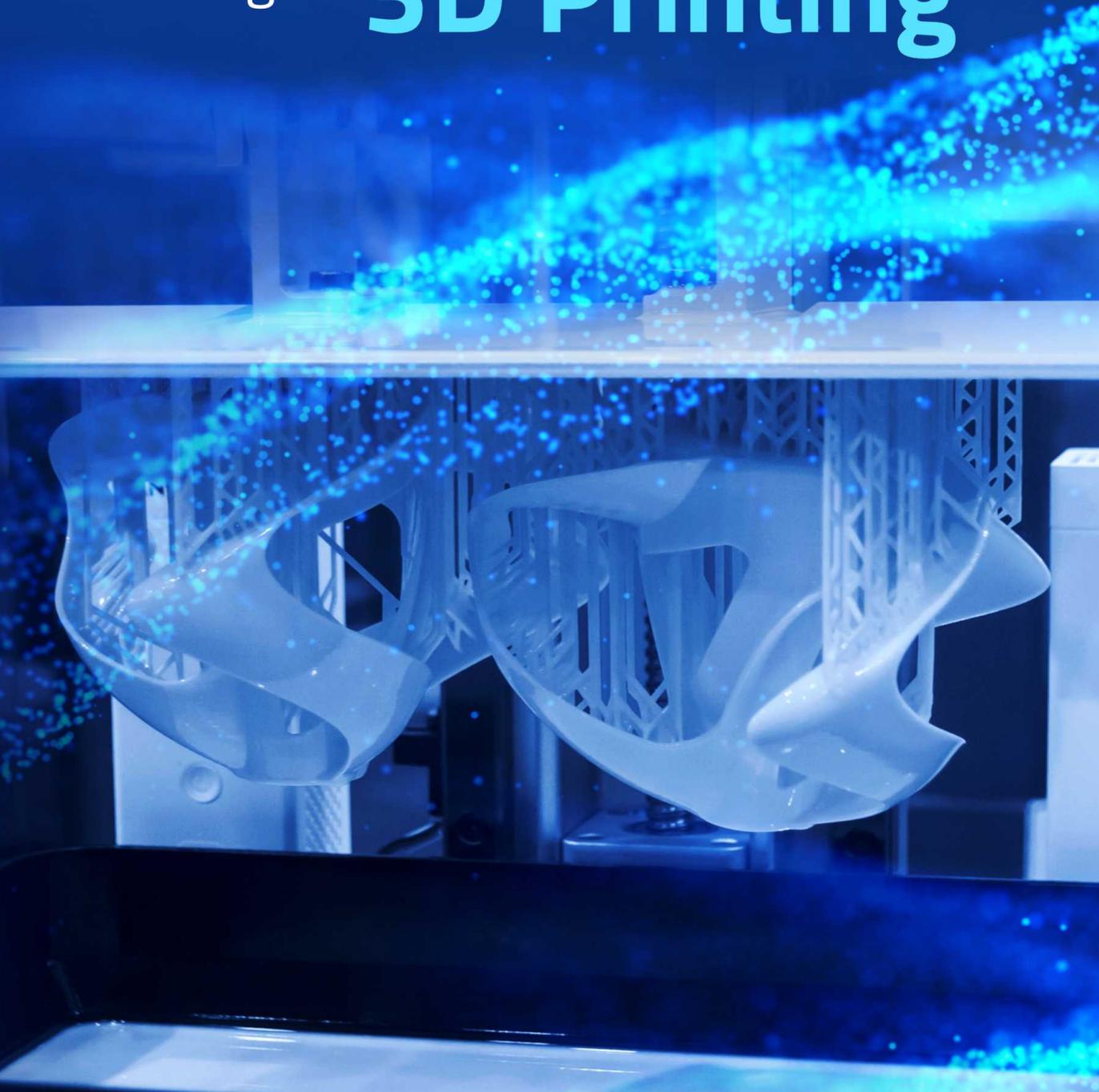


The Jaya Suteja



# Strategi Desain dan Proses Pembuatan Purwarupa dengan **3D Printing**



**STRATEGI DESAIN  
DAN PROSES PEMBUATAN  
PURWARUPA  
DENGAN *3D PRINTING***

## UU No. 28 Tahun 2014 tentang Hak Cipta

### **Fungsi dan Sifat Hak Cipta Pasal 4**

Hak Cipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 3 huruf a merupakan hak eksklusif yang terdiri atas hak moral dan hak ekonomi.

### **Pembatasan Pelindungan Pasal 26**

Ketentuan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 23, Pasal 24, dan Pasal 25 tidak berlaku terhadap:

- i. Penggunaan kutipan singkat Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait untuk pelaporan peristiwa aktual yang ditujukan hanya untuk keperluan penyediaan informasi aktual;
- ii. Penggandaan Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait hanya untuk kepentingan penelitian ilmu pengetahuan;
- iii. Penggandaan Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait hanya untuk keperluan pengajaran, kecuali pertunjukan dan Fonogram yang telah dilakukan Pengumuman sebagai bahan ajar; dan
- iv. Penggunaan untuk kepentingan pendidikan dan pengembangan ilmu pengetahuan yang memungkinkan suatu Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait dapat digunakan tanpa izin Pelaku Pertunjukan, Produser Fonogram, atau Lembaga Penyiaran.

### **Sanksi Pelanggaran Pasal 113**

1. Setiap Orang yang dengan tanpa hak melakukan pelanggaran hak ekonomi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf i untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 1 (satu) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp100.000.000 (seratus juta rupiah).
2. Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf c, huruf d, huruf f, dan/atau huruf h untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 3 (tiga) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).

**STRATEGI DESAIN  
DAN PROSES PEMBUATAN  
PURWARUPA  
DENGAN *3D PRINTING***

The Jaya Suteja

## **Strategi Desain dan Proses Pembuatan Purwarupa dengan 3D Printing**

**Penulis** : The Jaya Suteja  
**Desain Cover** : Ali Hasan Zein  
**Sumber** : MarinaGrigorivna (www.shutterstock.com)  
**Tata Letak** : T. Yuliyanti  
**Proofreader** : A. Timor Eldian

Ukuran:  
**x, 76 hlm., Uk.: 15.5x23 cm**

ISBN:  
**978-623-02-9951-3**

Cetakan Pertama:  
**Januari 2025**

Hak Cipta 2025 pada Penulis  
**Copyright © 2025 by Deepublish Publisher**  
All Right Reserved

**PENERBIT DEEPUBLISH**  
**(Grup Penerbitan CV BUDI UTAMA)**

Anggota IKAPI (076/DIY/2012)  
Jl. Rajawali, Gg. Elang 6, No. 3, Drono, Sardonoharjo, Ngaglik, Sleman  
Jl. Kaliurang Km. 9,3 – Yogyakarta 55581  
Telp./Faks : (0274) 4533427  
Website : [www.penerbitdeepublish.com](http://www.penerbitdeepublish.com)  
[www.deepublishstore.com](http://www.deepublishstore.com)  
E-mail : [cs@deepublish.co.id](mailto:cs@deepublish.co.id)

---

*Hak cipta dilindungi undang-undang.*

*Dilarang keras menerjemahkan, memfotokopi, atau memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini tanpa izin tertulis dari penerbit.*

*Isi di luar tanggung jawab percetakan.*

## KATA PENGANTAR PENERBIT

**P**uji syukur kami panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena berkat rahmat dan karunia-Nya, buku *Strategi Desain dan Proses Pembuatan Purwarupa dengan 3D Printing* dapat terwujud dan hadir di tengah-tengah masyarakat. Sebagai penerbit yang berkomitmen untuk mencerdaskan, membahagiakan, dan memuliakan umat manusia, kami merasa terhormat dapat berkontribusi dalam penyebaran ilmu pengetahuan dan pendidikan melalui penerbitan karya ini.

Buku ini secara lebih lengkap mengulas tentang dasar-dasar *3D printing*, panduan desain, panduan proses, dan aplikasi nyata dalam pembuatan purwarupa di berbagai sektor industri.

Terima kasih dan penghargaan terbesar kami sampaikan kepada penulis yang telah memberikan kepercayaan, perhatian, dan kontribusi penuh demi kesempurnaan buku ini. Kami berharap karya ini dapat memberikan kontribusi yang signifikan dalam perkembangan keilmuan di Indonesia. Semoga buku ini tidak hanya menjadi sumber informasi yang berharga, tetapi juga menginspirasi pembacanya untuk terus berkembang dan berkontribusi dalam membangun bangsa yang lebih baik.

Hormat Kami,

**Penerbit Deepublish**

# DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR PENERBIT .....	v
DAFTAR ISI .....	vi
DAFTAR GAMBAR.....	viii
<b>BAB I. 3D PRINTING DAN PURWARUPA .....</b>	<b>1</b>
1.1. Mengenal Purwarupa.....	1
1.2. Pembuatan Purwarupa.....	2
1.3. <i>3D Printing</i> untuk Pembuatan Purwarupa.....	4
1.4. Pentingnya Pemahaman Desain, Proses, dan Material <i>3D Printing</i> untuk Pembuatan Purwarupa.....	5
<b>BAB II. TEKNOLOGI 3D PRINTING .....</b>	<b>7</b>
2.1. Macam-Macam Teknologi <i>3D Printing</i> .....	7
2.2. Pemilihan Teknologi <i>3D Printing</i> .....	12
2.3. Prinsip Kerja FFF/FDM .....	15
2.4. Komponen <i>3D Printer</i> Jenis FFF/FDM .....	16
<b>BAB III. PEMBUATAN PURWARUPA DENGAN 3D PRINTING .....</b>	<b>18</b>
3.1. Mendesain, Memindai, atau Mengunduh Model Tiga Dimensi .....	18
3.2. Melakukan Pengirisan ( <i>Slicing</i> ) Model Tiga Dimensi .....	20
3.3. Melakukan Pencetakan Model Tiga Dimensi dengan <i>3D Printer</i> .....	22
3.4. Melakukan <i>Finishing</i> .....	24
<b>BAB IV. OPTIMALISASI DESAIN UNTUK 3D PRINTING .....</b>	<b>25</b>
4.1. Peranan Desain untuk Proses <i>3D printing</i> .....	25
4.2. Permasalahan Proses <i>3D Printing</i> Akibat Desain .....	25
4.3. Strategi Desain untuk <i>3D Printing</i> .....	29

<b>BAB V.</b>	<b>PARAMETER PROSES 3D PRINTING .....</b>	<b>34</b>
<b>BAB VI.</b>	<b>MATERIAL 3D PRINTING .....</b>	<b>49</b>
6.1.	<i>Polylactic Acid</i> .....	49
6.2.	<i>Acrylonitrile Butadiene Styrene</i> .....	50
6.3.	<i>Polyethylene Terephthalate Glycol</i> .....	50
6.4.	<i>Thermoplastic Polyurethane</i> .....	51
6.5.	<i>Nylon</i> .....	51
6.6.	<i>Polycarbonate</i> .....	52
<b>BAB VII.</b>	<b>APLIKASI 3D PRINTING UNTUK PEMBUATAN PURWARUPA.....</b>	<b>53</b>
7.1.	Aplikasi Sektor Industri Kesehatan.....	53
7.2.	Aplikasi Sektor Industri Manufaktur .....	54
7.3.	Aplikasi Sektor Industri Elektronik .....	57
7.4.	Aplikasi Sektor Industri Otomotif.....	58
7.5.	Aplikasi Sektor Industri Pesawat .....	58
7.6.	Aplikasi Sektor Industri Kreatif .....	59
7.7.	Aplikasi Sektor Industri Pengolahan Makanan.....	60
<b>BAB VIII.</b>	<b>TEKNOLOGI 3D PRINTING DALAM MEMPERCEPAT PROSES PEMBUATAN PURWARUPA .....</b>	<b>62</b>
DAFTAR PUSTAKA.....		63
GLOSARIUM .....		72
INDEKS .....		75
PROFIL PENULIS .....		76

# DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 1.1.</b>	Contoh Pembuatan Purwarupa untuk Visualisasi Bentuk .....	2
<b>Gambar 1.2.</b>	Proses Tekuk .....	3
<b>Gambar 1.3.</b>	Proses Bubut .....	3
<b>Gambar 1.4.</b>	Contoh Purwarupa Bola Berlubang .....	5
<b>Gambar 2.1.</b>	<i>Vat Photopolymerisation</i> .....	8
<b>Gambar 2.2.</b>	<i>Material Extrusion</i> .....	9
<b>Gambar 2.3.</b>	<i>Material Jetting</i> .....	10
<b>Gambar 2.4.</b>	<i>Binder Jetting</i> .....	11
<b>Gambar 2.5.</b>	<i>Powder Bed Fusion</i> .....	11
<b>Gambar 2.6.</b>	<i>Directed Energy Deposition</i> .....	12
<b>Gambar 2.7.</b>	Komponen dengan Fitur Menggantung .....	13
<b>Gambar 2.8.</b>	Skema Teknologi FFF/FDM .....	16
<b>Gambar 2.9.</b>	Komponen <i>3D Printer</i> .....	17
<b>Gambar 3.1.</b>	Perbedaan Model <i>Solid</i> dan <i>Mesh</i> .....	19
<b>Gambar 3.2.</b>	Hasil Proses <i>Slicing</i> .....	21
<b>Gambar 3.3.</b>	Contoh <i>G-code</i> .....	22
<b>Gambar 3.4.</b>	Pengaturan Ketinggian Meja Cetak dengan Kertas.....	23
<b>Gambar 3.5.</b>	Proses <i>Sanding</i> .....	24
<b>Gambar 4.1.</b>	Orientasi Raster Sejajar Tarikan .....	26
<b>Gambar 4.2.</b>	Fitur Penyangga .....	27
<b>Gambar 4.3.</b>	Orientasi Pencetakan dan Pengaruhnya terhadap Penyangga .....	28
<b>Gambar 4.4.</b>	<i>Warping</i> .....	29
<b>Gambar 4.5.</b>	Permasalahan Pembuatan Fitur Lubang.....	30
<b>Gambar 4.6.</b>	Panduan untuk Permukaan Vertikal.....	31
<b>Gambar 4.7.</b>	Rekomendasi Sudut untuk Permukaan Menggantung .....	32
<b>Gambar 4.8.</b>	Panduan Ukuran Fitur Minimum .....	32
<b>Gambar 4.9.</b>	Panduan Perbandingan Ukuran Fitur .....	33
<b>Gambar 5.1.</b>	Perbaikan Peletakan Model Tiga Dimensi yang Sama.....	35

<b>Gambar 5.2.</b>	Ketinggian Lapisan .....	36
<b>Gambar 5.3.</b>	Ketebalan Perimeter.....	37
<b>Gambar 5.4.</b>	Perbedaan Kerapatan Pengisian.....	38
<b>Gambar 5.5.</b>	Berbagai Macam Pola Pengisian .....	40
<b>Gambar 5.6.</b>	Sudut Pengisian .....	40
<b>Gambar 5.7.</b>	Deformasi Akibat Batas Sudut Penahan Terlalu Besar .....	41
<b>Gambar 5.8.</b>	<i>Oozing</i> .....	42
<b>Gambar 5.9.</b>	<i>Under-extrusion</i> .....	43
<b>Gambar 5.10.</b>	<i>Stringing</i> .....	44
<b>Gambar 5.11.</b>	<i>Elephant Foot</i> .....	45
<b>Gambar 5.12.</b>	<i>Brim</i> .....	47
<b>Gambar 5.13.</b>	<i>Skirt</i> .....	48
<b>Gambar 5.14.</b>	Penutup <i>3D Printer</i> .....	48
<b>Gambar 7.1.</b>	Plat <i>Bite Registration</i> .....	53
<b>Gambar 7.2.</b>	Alat Bantu Pemandu Operasi Gigi.....	54
<b>Gambar 7.3.</b>	Implan Tulang.....	55
<b>Gambar 7.4.</b>	<i>Venturi Injector</i> .....	55
<b>Gambar 7.5.</b>	<i>Gripper Robot</i> .....	56
<b>Gambar 7.6.</b>	Pemegang <i>Endotracheal Tube</i> .....	57
<b>Gambar 7.7.</b>	<i>Keyboard</i> .....	57
<b>Gambar 7.8.</b>	<i>Intake Manifold</i> .....	58
<b>Gambar 7.9.</b>	Berbagai Komponen Pesawat Terbang .....	59
<b>Gambar 7.10.</b>	<i>E-Textile</i> .....	60
<b>Gambar 7.11.</b>	Baju Petugas Pemadam Kebakaran .....	61
<b>Gambar 7.12.</b>	<i>3D Printed Food</i> .....	61



# BAB I.

## 3D PRINTING DAN PURWARUPA

---

### 1.1. Mengetahui Purwarupa

---

Persaingan industri manufaktur menyebabkan teknologi terus menerus dikembangkan terutama untuk dapat menawarkan produk yang semakin inovatif, menghadirkan produk baru dalam waktu yang lebih singkat, dan memenuhi kebutuhan pelanggan yang lebih kompleks dan personal (*customized*) (Qi *et al.*, 2020). Salah satu teknologi pendukung yang dapat digunakan dalam memenuhi kebutuhan tersebut adalah *prototyping* atau pembuatan purwarupa (Bhardwaj & Ulhe, 2024).

Purwarupa ini dibutuhkan agar pengembang produk bisa memvisualisasikan ide dalam bentuk fisik sebelum memasuki tahap produksi massal. Purwarupa fisik dapat membantu dalam memahami fitur produk, mengevaluasi, dan memperbaiki konsep produk secara lebih efektif (Siregar *et al.*, 2020). Visualisasi ini juga dibutuhkan untuk mengidentifikasi dan memperbaiki kesalahan lebih awal serta mengurangi risiko cacat produk yang merugikan. Contoh pembuatan purwarupa yang digunakan untuk visualisasi bentuk dalam rangka mengembangkan suatu produk dapat dilihat pada **Gambar 1.1** di bawah ini.

Purwarupa ini harus dibuat dalam waktu cepat untuk memotong biaya pengembangan maupun waktu peluncuran produk ke pasar. Pembuatan purwarupa ini dapat dilakukan dengan menggunakan berbagai macam material dan juga proses. Sebagai contoh, purwarupa dapat dibuat secara manual dengan menggunakan material dari resin yang dicampur dengan serat (Mulyani *et al.*, 2022). Purwarupa juga dapat dibuat dari logam dengan menggunakan proses manufaktur (Harki Apri Yanto *et al.*, 2022).

---

## 1.2. Pembuatan Purwarupa

---

Proses manufaktur adalah proses yang digunakan untuk mengubah bahan baku menjadi produk akhir dengan menggunakan berbagai sumber daya seperti manusia dan peralatan. Secara umum, proses manufaktur dapat dikategorikan menjadi tiga kelompok yaitu *formative manufacturing*, *subtractive manufacturing*, dan *additive manufacturing* (Ravi, 2016).



**Gambar 1.1.** Contoh Pembuatan Purwarupa untuk Visualisasi Bentuk  
(Sumber: <https://www.freepik.com>)

*Formative manufacturing* adalah pembuatan komponen atau produk akhir dengan cara melunakkan atau melelehkan bahan baku baik dengan atau tanpa pemanasan dan kemudian mencetak baik dengan tekanan atau tidak serta terakhir mendinginkan bahan baku tersebut pada sebuah cetakan sehingga menjadi produk akhir. Sebagai contoh, tutup botol dari bahan baku plastik dibuat menggunakan jenis proses ini karena pembuatannya membutuhkan panas untuk melunakkan biji plastik dan kemudian biji plastik dicetak dengan menggunakan tekanan sehingga mengisi cetakan dan membentuk biji plastik menjadi tutup botol. Pembuatan komponen atau produk akhir yang membutuhkan proses penekanan pada suatu bahan baku yang diletakkan di sebuah pemegang atau pengarah tetap dapat dikategorikan pada jenis proses ini walaupun tanpa adanya proses pemanasan. Sebagai contoh, pembuatan pegas spiral dengan menggunakan proses penggulangan kawat logam menggunakan *die* (cetakan) merupakan jenis *formative manufacturing* (Prawoto *et al.*, 2020). **Gambar 1.2** menunjukkan proses penekukan plat yang merupakan salah satu contoh proses *formative manufacturing*.

Sedangkan *subtractive manufacturing* adalah pembuatan komponen atau produk akhir dengan cara memotong berbagai bentuk bahan baku dengan menggunakan berbagai jenis pahat sehingga berbentuk seperti produk akhir. Proses ini disebut *subtractive manufacturing* karena material dari bahan baku dikurangi dengan cara pemotongan untuk membentuk produk akhir. Bahan baku yang dikurangi pada proses ini tidak hanya satu jenis material tapi bisa berupa material komposit (Tomaz *et al.*, 2021). Pembuatan bidak catur dari bahan baku berupa balok aluminium yang dipotong menggunakan pahat dengan mesin frais adalah contoh penggunaan proses ini. Salah satu contoh proses *subtractive manufacturing* menggunakan mesin bubut dapat dilihat pada **Gambar 1.3**.



**Gambar 1.2.** Proses Tekuk



**Gambar 1.3.** Proses Bubut

Terakhir, proses *additive manufacturing* adalah pembuatan komponen atau produk akhir dengan cara menambahkan dan menggabungkan bahan baku lapisan demi lapisan untuk dapat membentuk produk akhir baik dengan cara melelehkan, menyinari, menyemprotkan, atau memanaskan bahan baku. Menurut ISO/ASTM 52900:2015, *additive manufacturing* adalah proses penggabungan material lapisan demi lapisan berdasarkan data berupa model tiga dimensi sehingga menghasilkan komponen atau produk akhir (ISO/ASME International, 2015). Proses ini disebut *additive manufacturing* karena ada proses penambahan lapisan demi lapisan dari bahan baku hingga mendapatkan bentuk produk akhir. Contoh penggunaan *additive manufacturing* adalah pembuatan pemegang telepon genggam yang terbuat dari bahan plastik tanpa menggunakan tekanan dan cetakan. Proses pembuatan produk dengan menggunakan teknologi *3D printing* merupakan salah satu contoh proses *additive manufacturing*. Teknologi *3D printing* sering diidentikkan dengan *additive manufacturing*. Hal ini tidak tepat karena tidak semua proses *additive manufacturing* menggunakan teknologi *3D printing*.

---

### **1.3. 3D Printing untuk Pembuatan Purwarupa**

---

*3D printing* adalah salah satu teknologi yang terbaru dalam pembuatan purwarupa. Penggunaan *3D printing* dapat mempercepat waktu yang dibutuhkan dalam membuat purwarupa dibandingkan dengan menggunakan metode konvensional seperti permesinan manual atau cetakan injeksi (Macdonald *et al.*, 2014). Waktu pembuatan purwarupa yang sebelumnya membutuhkan waktu berminggu-minggu hingga berbulan-bulan dapat dikurangi menjadi beberapa hari atau bahkan jam.

Selain itu, penggunaan *3D printing* juga dapat mengurangi biaya yang dibutuhkan untuk membuat purwarupa di tahap awal pengembangan ketika masih membutuhkan banyak perbaikan (C. Zhang *et al.*, 2017). Hal ini dikarenakan *3D printing* dapat membuat purwarupa dalam jumlah terbatas sehingga pembuatan purwarupa tidak perlu menggunakan peralatan skala produksi yang mahal.

Teknologi *3D printing* juga dapat digunakan untuk membuat purwarupa dengan bentuk yang lebih rumit dibanding menggunakan proses konvensional (Surya Teja *et al.*, 2023). Proses konvensional umumnya dibatasi oleh karakteristik proses yang ada sehingga tidak

memungkinkan membuat bentuk yang kompleks. Sebagai contoh purwarupa berbentuk bola dengan lubang di bagian dalam seperti terlihat pada **Gambar 1.4** tidak memungkinkan dibuat dengan proses konvensional.

Tren kebutuhan pelanggan yang semakin menekankan personalisasi juga dapat diakomodir dengan membuat purwarupa menggunakan *3D printing* (Gedik & Toğay, 2016). Pelanggan dapat segera mengevaluasi kebutuhan personalnya dengan menggunakan purwarupa yang dibuat secara cepat. Industri manufaktur juga dapat merespons permintaan pelanggan dan memberikan solusi secara cepat dengan cara membuat purwarupa menggunakan *3D printing*.

Selain itu, purwarupa ini sebaiknya mudah untuk didaur ulang sehingga lebih efisien dalam penggunaan material dan lebih ramah lingkungan. Implementasi *3D printing* untuk pembuatan purwarupa umumnya menggunakan polimer yang dapat diolah kembali menjadi material daur ulang yang dapat digunakan untuk mencetak objek lain sehingga mengurangi limbah. Selain itu, material polimer yang umum digunakan sebagai purwarupa juga terbuat dari hasil perkebunan sehingga menjadi lebih ramah lingkungan (Vinod Kumar *et al.*, 2024).



**Gambar 1.4.** Contoh Purwarupa Bola Berlubang  
(Sumber: <https://www.freepik.com>)

---

#### **1.4. Pentingnya Pemahaman Desain, Proses, dan Material *3D Printing* untuk Pembuatan Purwarupa**

---

Teknologi *3D printing* sudah berkembang pesat sehingga saat ini banyak teknologi berbeda yang digunakan dalam melakukan pencetakan. Masing-masing teknologi *3D printing* mempunyai karakteristik yang berbeda sehingga menghasilkan kelebihan dan kekurangan masing-masing

(Mughir & Mughir, 2022). Berdasarkan karakteristiknya, desain dan proses *3D printing* harus diatur untuk menghasilkan hasil cetakan yang optimal. Oleh karena itu, pembuatan purwarupa membutuhkan pemahaman tentang strategi desain untuk *3D printing*, langkah-langkah dan parameter-parameter proses *3D printing*, dan juga material yang digunakan. Kemudian desain, material, dan nilai parameter proses *3D printing* harus dipilih sedemikian agar hasil cetakan berupa purwarupa yang dihasilkan sesuai dengan kebutuhan dan fungsi yang ditetapkan.

Oleh karena itu, buku ini akan menjawab kebutuhan di atas dengan menjelaskan tentang macam-macam teknologi *3D printing* yang sudah pernah dikembangkan pada Bab II. Bab II juga membahas satu teknologi *3D printing* yang tersedia di pasar dan banyak digunakan yaitu *Fused Filamen Fabrication* atau *Fused Deposition Modeling* (FFF/FDM). Prinsip kerja, komponen, dan fungsi tiap komponen dari teknologi FFF/FDM juga dijelaskan pada Bab II. Kemudian, Bab III akan menjelaskan langkah-langkah pembuatan purwarupa dengan menggunakan teknologi *3D printing* jenis FFF/FDM. Langkah-langkah menggunakan FFF/FDM mulai dari penyiapan model tiga dimensi sampai dengan proses akhir dari hasil cetakan dijelaskan pada Bab III ini. Strategi desain untuk proses *3D printing* dijelaskan pada Bab IV. Desain ini perlu dibahas karena sangat berpengaruh terhadap hasil cetakan yang dihasilkan. Setelah itu, Bab V menguraikan beberapa parameter penting proses FFF/FDM beserta pengaruhnya terhadap hasil cetakan. Pada Bab VI, jenis material dan sifat material yang dapat digunakan pada FFF/FDM dijelaskan satu demi satu. Kemudian Bab VII menjelaskan tentang berbagai aplikasi dari *3D printing* dalam pembuatan purwarupa di berbagai sektor industri. Terakhir, ringkasan dari isi buku ini akan dituliskan pada Bab VIII.

# BAB II.

## TEKNOLOGI 3D PRINTING

---

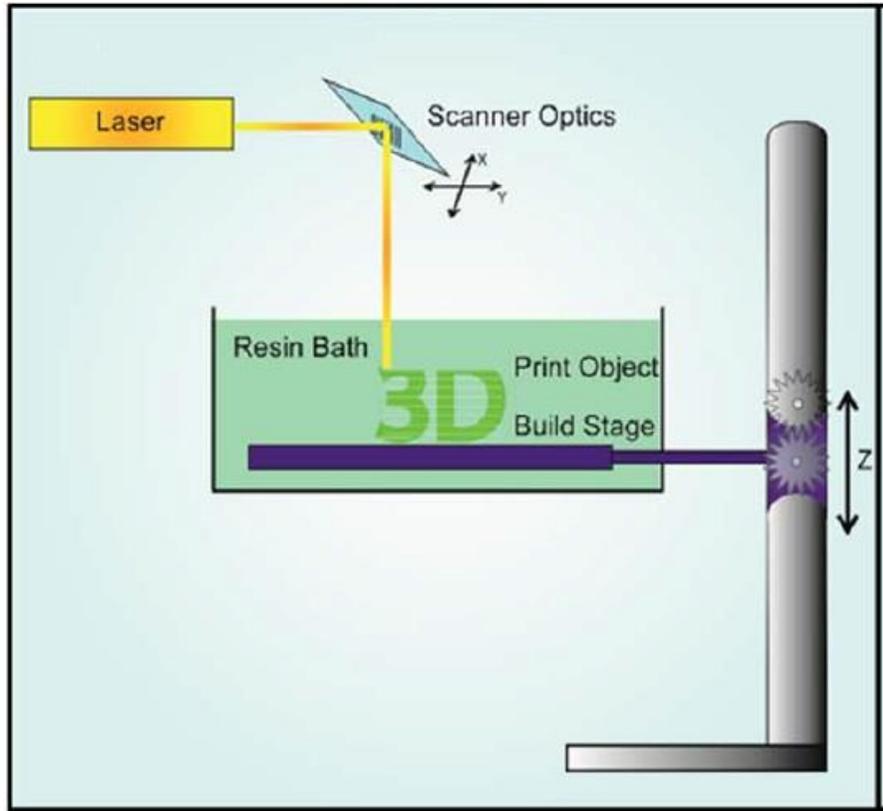
### 2.1. Macam-Macam Teknologi 3D Printing

---

Menurut ISO/ASTM 52900:2015, *3D printing* adalah pembuatan suatu komponen atau produk akhir melalui penambahan material yang menggunakan teknologi pencetakan seperti *print head* atau *nozzle*. Berbagai contoh teknologi *3D printing* adalah *vat photopolymerisation*, *material extrusion*, *material jetting*, *binder jetting*, *powder bed fusion*, dan *directed energy deposition* (ISO/ASME International, 2015).

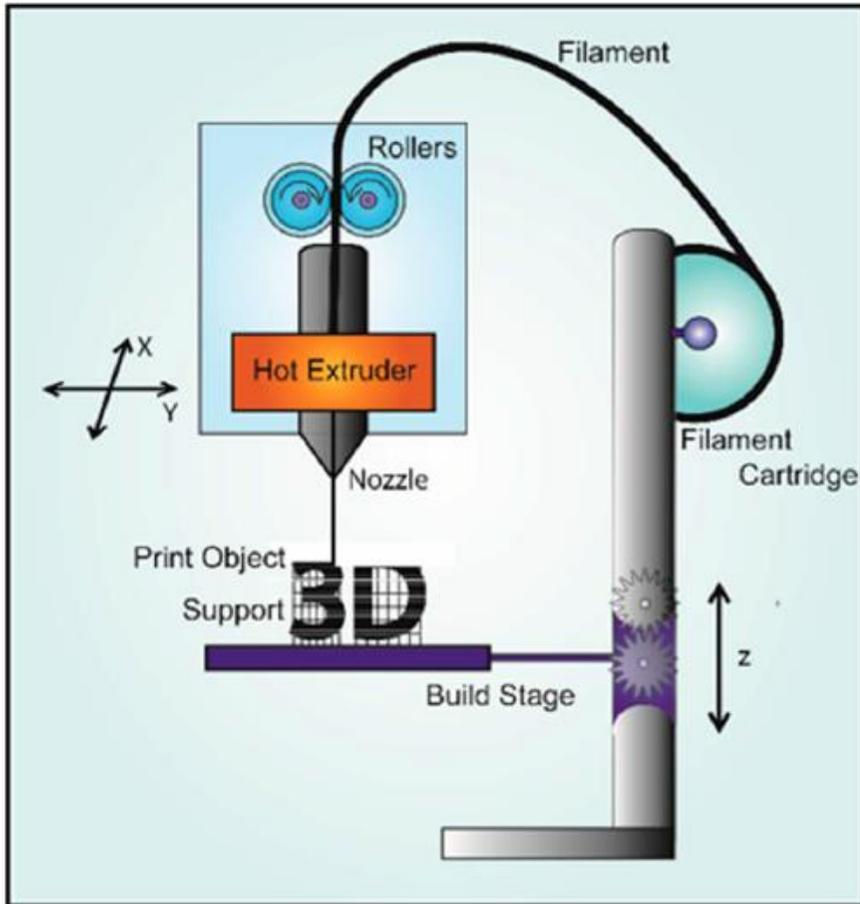
*Vat photopolymerisation* menggunakan material berupa *photopolymer* resin dalam wujud cairan yang diletakkan di dalam sebuah wadah seperti terlihat pada **Gambar 2.1** (Gupta *et al.*, 2019). Material resin akan mengeras jika terpapar oleh sinar tertentu seperti sinar *ultraviolet* (UV). Sinar ini akan digunakan untuk mengeraskan resin lapisan demi lapisan sesuai pola desain yang diberikan sehingga akhirnya terbentuk hasil cetakan berupa komponen atau produk. Penyinar akan bergerak sesuai dengan pola desain sehingga bagian yang terkena sinar akan mengeras. Untuk mengeraskan resin lapisan berikutnya, meja kerja akan bergerak vertikal setelah suatu lapisan sudah terpapar sinar dan mengeras. *Stereolithography* dan *digital light processing* adalah contoh dari teknologi *vat photopolymerisation*.

Pada teknologi *material extrusion* seperti terlihat pada **Gambar 2.2**, material termoplastik yang umumnya berupa filamen dipanaskan dan diekstrusi melalui *nozzle* dan kemudian diletakkan lapisan demi lapisan (Gupta *et al.*, 2019). Dalam melakukan proses pencetakan, umumnya meja kerja bergerak sesuai pola desain dan *nozzle* menumpuk material pada suatu lapisan tertentu. Setelah semua pola sudah tercetak pada lapisan tersebut, *nozzle* akan berpindah pada arah vertikal untuk mencetak lapisan berikutnya. Contoh teknologi *material extrusion* yang banyak digunakan adalah FFF/FDM.



**Gambar 2.1.** *Vat Photopolymerisation*  
 (Sumber: Gupta, Nesterenko and Paull, 2019)

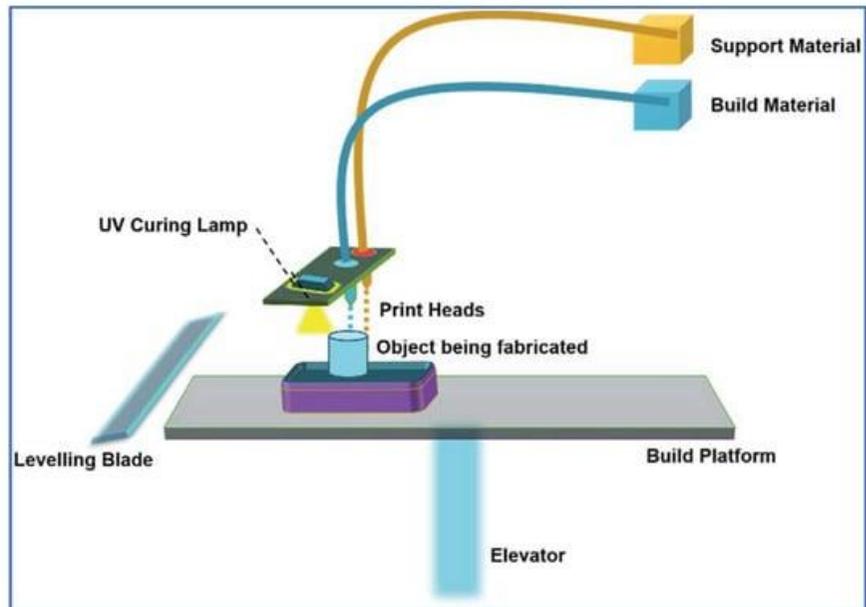
Teknologi *material jetting* seperti terlihat pada **Gambar 2.3** memancarkan material *photopolymer* berupa cairan lapisan demi lapisan ke alas meja dan kemudian menggunakan sinar untuk mengeringkan material yang sudah dipancarkan tersebut (Gülcan *et al.*, 2021). Pemancar material akan meletakkan material sesuai dengan pola desain tiap lapisan dari komponen atau produk yang dicetak. Kemudian pemancar sinar akan menyinari material tersebut sehingga mengeras. Hal ini terus dilakukan lapisan demi lapisan sampai komponen atau produk terbentuk. Teknologi ini menggunakan material seperti gel untuk menopang bagian yang tergantung sehingga mudah dibersihkan.



**Gambar 2.2. Material Extrusion**  
 (Sumber: Gupta, Nesterenko and Paull, 2019)

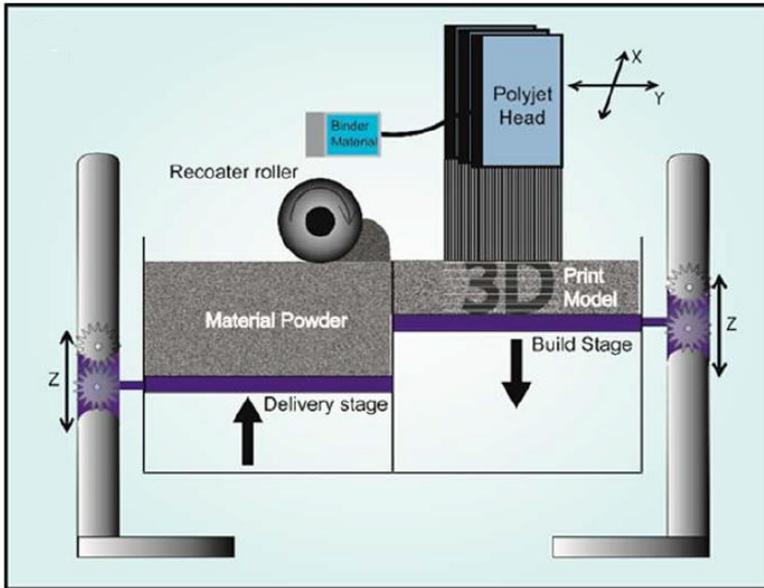
Sedangkan teknologi *binder jetting* menggunakan material berupa bubuk dan pengikat yang berbentuk cairan seperti terlihat pada **Gambar 2.4** (Gupta *et al.*, 2019). Pertama-tama bubuk material diletakkan di atas meja dan diratakan dengan sebuah *roller*. Kemudian *nozzle* akan menempelkan pengikat di atas bubuk pada lokasi sesuai pola desain. Setelah itu, meja digerakkan dalam arah vertikal sejauh ketebalan lapisan. Kemudian, bubuk material kembali diletakkan di atas lapisan sebelumnya. Hal ini akan menyebabkan bubuk yang terletak pada pola desain akan saling terikat karena cairan pengikat. Sedangkan bubuk yang tidak terikat

tetap berada pada posisi bebas. Hal ini akan diulang lapisan demi lapisan sampai komponen atau produk terbentuk.

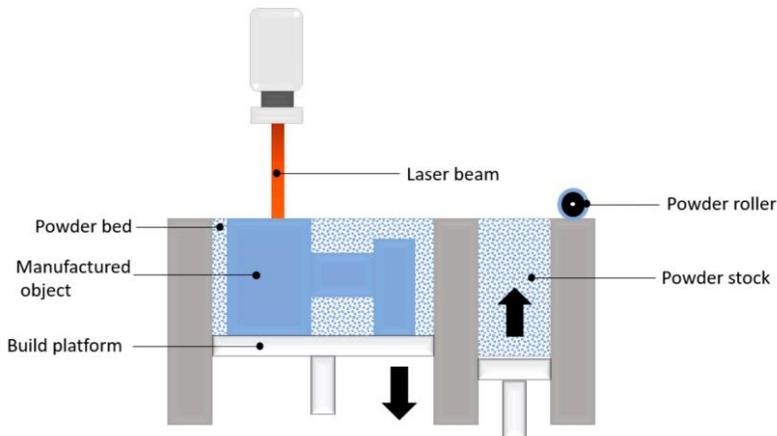


**Gambar 2.3.** *Material Jetting*  
(Sumber: Gülcan, Günaydin and Tamer, 2021)

Teknologi *powder bed fusion* membentuk komponen atau produk yang dicetak dari material awal berupa bubuk seperti terlihat pada **Gambar 2.5** (Dejene & Lemu, 2023). Material bubuk ini diletakkan oleh pengisi material di atas meja dan kemudian diratakan dengan menggunakan lengan perata. Setelah itu, material bubuk dikenai sinar berdaya besar sesuai dengan pola desain. Sinar ini akan memanaskan dan menyatukan bubuk satu dengan yang lainnya. Sedangkan bubuk yang tidak terkena sinar akan tetap pada posisi bebas. Setelah itu, meja akan bergerak vertikal dan kemudian pengisi material akan kembali meletakkan material bubuk di atas meja. Hal ini dilakukan lapisan demi lapisan hingga komponen atau produk terbentuk sesuai desain. *Direct metal laser sintering* dan *electron beam melting* adalah contoh dari teknologi ini.



**Gambar 2.4. Binder Jetting**  
 (Sumber: Gupta, Nesterenko and Paull, 2019)



**Gambar 2.5. Powder Bed Fusion**  
 (Sumber: Dejene and Lemu, 2023)

Sedangkan pada teknologi *directed energy deposition* seperti terlihat pada **Gambar 2.6**, sinar laser digunakan untuk memanaskan permukaan logam sehingga sebagian dari permukaan menjadi lumer (Mehrabi *et al.*,

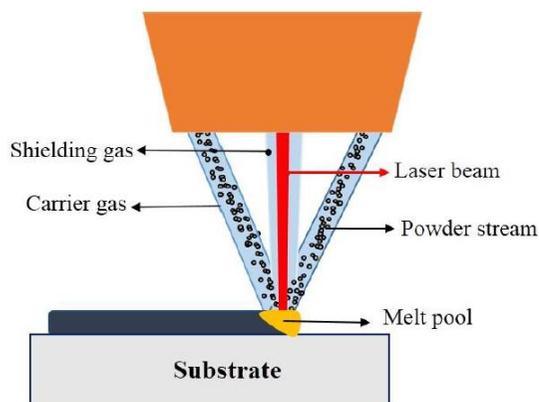
2023). Setelah itu, material bubuk dari logam diinjeksikan ke permukaan yang lumer tersebut sesuai dengan pola desain lapisan demi lapisan. Material bubuk ini kemudian akan terbentuk menjadi komponen atau produk yang dicetak. Contoh dari teknologi ini adalah *laser material deposition*.

---

## 2.2. Pemilihan Teknologi 3D Printing

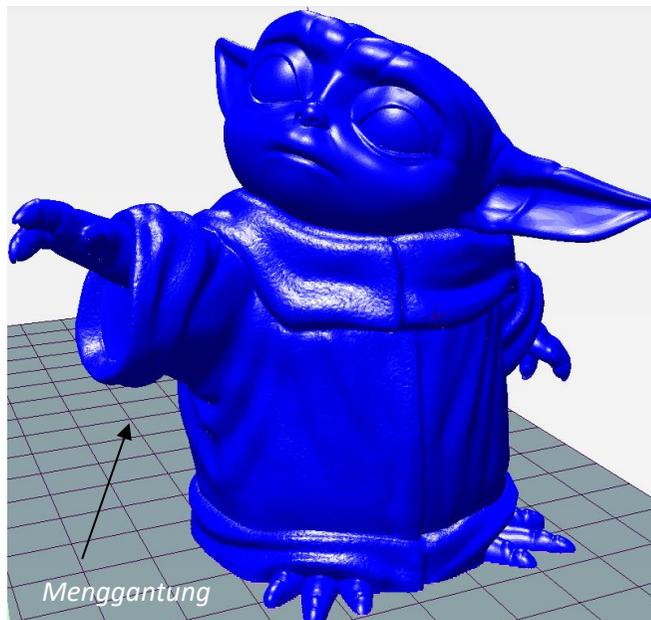
---

Pemilihan teknologi dan mesin *3D printing* ditentukan oleh beberapa faktor yaitu material yang digunakan, desain dari produk, ukuran produk akhir, akurasi dimensi produk, kualitas permukaan produk, kekuatan produk, dan kecepatan proses (Çevik Aka, 2023). Jenis, bentuk, dan sifat material dari produk akhir akan menentukan teknologi yang bisa digunakan. Jenis material yang berbeda akan menggunakan teknologi dan mesin yang berbeda. Sebagai contoh, material logam tidak bisa diproses dengan mesin *3D printing* untuk polimer. Selain itu, bentuk material berupa filamen, cairan, lembaran, atau serbuk juga akan membutuhkan teknologi dan mesin yang berbeda. Bentuk material berupa filamen umumnya tidak membutuhkan penyinaran seperti untuk bentuk material berupa cairan atau serbuk. Terakhir, sifat material misalnya titik leleh yang berbeda juga akan membutuhkan teknologi dan mesin yang berbeda. Teknologi *3D printing* untuk material dengan titik leleh yang tinggi akan membutuhkan energi yang lebih besar.



**Gambar 2.6.** *Directed Energy Deposition*  
(Sumber: Mehrabi, Seyedkashi and Moradi, 2023)

Desain produk akhir juga akan menentukan teknologi *3D printing* yang digunakan (Cheng, 2021). Sebagai contoh, desain suatu produk akan menentukan kebutuhan dari *support* atau penyangga pada proses pencetakan. Jika sebuah produk akhir mempunyai fitur yang *overhang* atau menggantung maka fitur ini tidak bisa dibuat menggunakan teknologi *3D printing* tanpa ada penyangga. *Overhang* terjadi ketika lapisan material yang dicetak hanya ditopang sebagian saja oleh lapisan di bawahnya. Jika dicetak tanpa penyangga maka hasil cetakan akan jatuh sehingga lapisan berikutnya tidak dapat dicetak di atas lapisan sebelumnya. Penyangga ini dicetak dengan menggunakan mesin yang sama tetapi bisa dengan material yang sama atau berbeda. Komponen yang mempunyai fitur menggantung dapat dilihat pada **Gambar 2.7**.



**Gambar 2.7.** Komponen dengan Fitur Menggantung

Ukuran purwarupa akan menentukan teknologi *3D printing* yang memungkinkan untuk digunakan karena ukuran akan memengaruhi ukuran meja kerja yang dibutuhkan. Semakin besar ukuran meja kerja maka dimensi produk yang bisa dicetak akan lebih besar dan kapasitas juga akan semakin besar. Akan tetapi, kebutuhan energi untuk memanaskan meja

yang lebih besar akan semakin banyak. Motor penggerak juga akan membutuhkan energi yang lebih besar. Selain itu, kedataran meja kerja juga dipengaruhi oleh ukuran dari meja kerja. Semakin besar ukurannya maka meja akan lebih tidak rata karena ada defleksi yang terjadi. Jika meja tidak datar maka peletakan material menjadi tidak sesuai dengan lokasi yang seharusnya sehingga kesalahan dimensi akan membesar. Oleh karena itu, peningkatan kapasitas dari *3D printing* tidak selalu dapat meningkatkan keuntungan (Nie *et al.*, 2023).

Akurasi dimensi purwarupa juga ditentukan oleh teknologi *3D printing* yang dipilih (Msallem *et al.*, 2020). Sebagai contoh, teknologi *3D printing* jenis *extrusion material* akan menghasilkan hasil cetakan dengan dimensi yang kurang akurat. Hal ini disebabkan karena adanya proses pemanasan material akan menyebabkan material menjadi leleh sehingga sulit untuk diletakkan pada lokasi yang diinginkan. Selain itu, teknologi *3D printing* yang menggunakan proses pemanasan juga akan menyebabkan adanya proses pemuaian material pada saat pemanasan dan penyusutan pada saat pendinginan. Hal ini juga akan menimbulkan dimensi produk yang tidak akurat termasuk jika dilakukan proses perlakuan panas pada hasil cetakan (Suteja, Evan, *et al.*, 2022). Kekakuan rangka *3D printer* juga akan memengaruhi akurasi dimensi. Kerangka yang tidak kaku akan menimbulkan getaran sehingga hasil cetakan menjadi tidak akurat.

Teknologi *3D printing* yang berbeda juga menghasilkan hasil cetakan yang mempunyai kualitas permukaan berbeda. Kemampuan dari mesin untuk mengatur tinggi lapisan yang digunakan juga akan menentukan kualitas permukaan dari hasil cetakan (Prawata *et al.*, 2023). Teknologi *3D printing* yang digunakan juga akan memengaruhi kualitas permukaan benda. Jika teknologi yang digunakan adalah penyinaran dengan cahaya ultraviolet, proses pencetakan berlangsung pada suhu kamar dan material tidak meleleh sehingga permukaan hasil cetakan akan lebih halus. Kemudahan kalibrasi dari mesin *3D printing* menentukan kualitas permukaan hasil cetakan karena gerakan motor yang tidak sinkron dapat menyebabkan hasil cetakan yang tidak sesuai dengan model tiga dimensi dari produk.

Teknologi *3D printing* yang digunakan akan menentukan apakah hasil cetakan bersifat isotropi atau tidak. Hasil cetakan yang bersifat isotropi berarti mempunyai sifat yang sama pada segala arah. Kekuatan produk

yang mempunyai sifat isotropi akan lebih kuat dibanding dengan yang nonisotropi. Teknologi pencetakan yang digunakan oleh *extrusion material* tidak dapat menghasilkan sifat yang isotropi karena penempelan lapisan demi lapisan merupakan ikatan mekanik sehingga akan mengurangi kekuatan pada arah tegak lurus lapisan tersebut (Son *et al.*, 2022). Sedangkan pada teknologi *vat photopolymerization*, material *photopolymer* yang digunakan bereaksi secara kimiawi dan membentuk ikatan kovalen baik arah lateral maupun tegak lurus. Oleh karena itu, sifat dari hasil cetakan proses *photopolymerization* adalah isotropik dan mempunyai kekuatan yang lebih homogen.

Kecepatan pencetakan juga dipengaruhi oleh teknologi *3D printing* yang digunakan (Huotilainen *et al.*, 2016). Waktu penyiapan, pencetakan, dan pengerjaan akhir dari masing-masing teknologi *3D printing* akan berbeda-beda. Proses penyiapan material pada umumnya tidak berbeda. Tapi, proses *3D printing* yang menggunakan pemanasan akan membutuhkan banyak waktu untuk pemanasan dan pendinginan. Sedangkan proses *photopolymerization* juga membutuhkan waktu untuk proses *curing* setelah pencetakan (Muenks & Kyosev, 2023). Teknologi yang membutuhkan penyangga juga membutuhkan waktu untuk pelepasan penyangga dan juga untuk menghaluskan permukaan bekas penyangga.

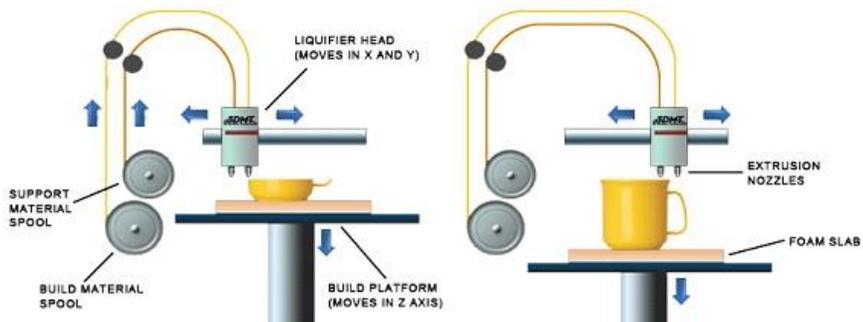
---

### 2.3. Prinsip Kerja FFF/FDM

---

Saat ini teknologi *3D printing* yang tersedia dalam jumlah banyak di pasar dan banyak digunakan adalah *extrusion material*. Hal ini dikarenakan peralatan untuk teknologi ini dapat dibeli dengan harga sangat terjangkau. Teknologi *3D printing* jenis FFF/FDM ini menggunakan bahan baku material dengan bentuk filamen. Filamen ini bisa dibedakan untuk filamen yang digunakan membuat komponen atau produk dan filamen yang digunakan untuk membantu mendukung proses pembuatan komponen atau produk. Filamen ini dipanaskan terlebih dahulu pada sebuah blok pemanas sebelum diekstrusi keluar dari *nozzle*. Filamen yang keluar dari *nozzle* akan diletakkan pada meja kerja lapisan demi lapisan sesuai dengan gambar model tiga dimensi dari komponen atau produk akhir (Suteja & Soesanti, 2020). Setelah lapisan pertama telah menempel di meja kerja, lapisan berikutnya yang keluar dari *nozzle* akan direkatkan pada lapisan pertama dan dibiarkan hingga dingin dan membeku. Proses

ini dilanjutkan terus hingga membentuk hasil akhir. Skema teknologi FFF/FDM dapat dilihat pada **Gambar 2.8**.



**Gambar 2.8.** Skema Teknologi FFF/FDM  
(Sumber: Berbagai Teknik yang Digunakan dalam 3D Printing, n.d.)

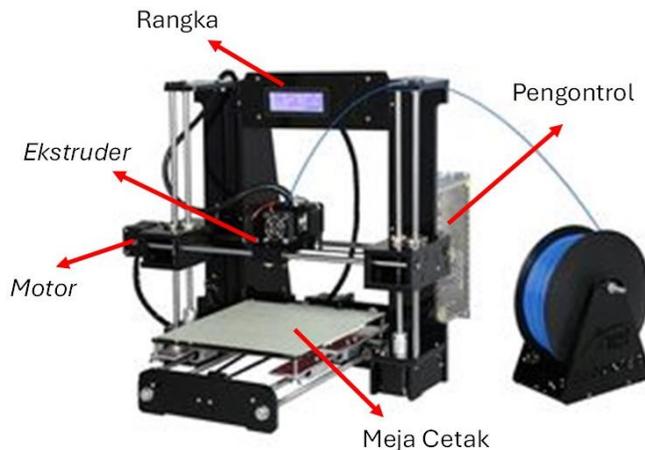
---

#### 2.4. Komponen 3D Printer Jenis FFF/FDM

---

Komponen utama dari mesin 3D Printer jenis FFF/FDM adalah rangka, ekstruder, meja cetak, motor penggerak, dan pengontrol. Rangka berfungsi sebagai struktur dari mesin dan tempat menempelnya komponen. Jika rangka tidak kaku maka akan menimbulkan getaran pada mesin. Getaran pada mesin akan berpengaruh pada kualitas hasil cetakan. Berikutnya, ekstruder digunakan untuk memanaskan, menekan, dan mengeluarkan, serta menempelkan filamen di atas meja cetak. Filamen ditarik atau ditekan oleh ekstruder untuk kemudian dipanasi hingga lunak. Setelah itu, filamen dikeluarkan melalui *nozzle* dengan diameter yang lebih kecil. Filamen yang keluar dari *nozzle* ini akan diletakkan dan ditempelkan pada meja cetak. Agar lapisan material yang dikeluarkan dari *nozzle* tidak mendingin terlalu cepat, meja cetak sebaiknya dipanasi agar mempunyai temperatur yang tidak terlalu berbeda dengan temperatur filamen. Pendinginan material yang terlalu cepat akan menyebabkan hasil cetakan akan cepat menyusut dan menyebabkan material terkelupas dari permukaan meja kerja. Penyusutan hasil cetakan yang tidak merata juga akan menyebabkan hasil cetakan melengkung baik pada bagian tengah (*bending*) maupun bagian pinggir (*warping*). Sedangkan, motor penggerak digunakan untuk menggerakkan baik ekstruder atau meja cetak. Jenis motor yang digunakan adalah *stepper motor* agar dapat menghasilkan pengeluaran filamen dan gerakan ekstruder

yang lebih kecil dan akurat. Karena gerakan ekstruder, meja cetak, dan pengeluaran filamen oleh ekstruder dilakukan dengan bantuan motor maka akurasi dimensi dari hasil cetakan dipengaruhi oleh spesifikasi *stepper motor*. Keseluruhan mesin ini akan dikontrol oleh sekumpulan komponen elektronik yang berfungsi sebagai pengontrol. Pengontrol ini juga mempunyai perangkat lunak (*firmware*) yang akan membaca dan menerjemahkan file instruksi yang disebut *Geometrical Code (G-Code)*. *G-code* berisi kode-kode yang dapat digunakan untuk memberi isyarat bahwa *motors*, kipas, atau pemanas harus mulai dinyalakan atau dimatikan. Oleh karena itu, ekstruder dan meja cetak bergerak berdasarkan *G-code* ini. Jika perangkat lunak pengontrol dari pengontrol yang digunakan tidak sesuai maka hasil cetakan dari *3D printer* akan berbeda dengan data model tiga dimensi dari komponen atau produk akhir. **Gambar 2.9** menunjukkan beberapa komponen dari *3D printer*.



**Gambar 2.9.** Komponen *3D Printer*

# BAB III.

## PEMBUATAN PURWARUPA DENGAN 3D PRINTING

Langkah-langkah untuk menggunakan *3D printing* jenis FFF/FDM dalam membuat suatu purwarupa akhir adalah sebagai berikut:

---

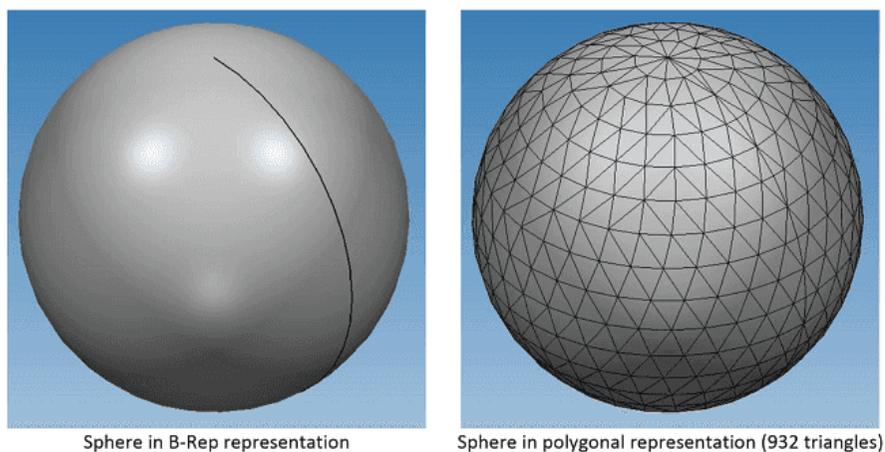
### 3.1. Mendesain, Memindai, atau Mengunduh Model Tiga Dimensi

---

Untuk dapat mencetak suatu purwarupa menggunakan mesin *3D printer*, model tiga dimensi dari purwarupa tersebut harus sudah tersedia. Mesin *3D printer* membutuhkan model tiga dimensi untuk menentukan lintasan dari ekstruder dalam mencetak sebuah objek. Model tiga dimensi ini bisa didesain dari nol atau dipindai dari objek yang sudah ada dan kemudian dimodifikasi menjadi objek yang baru. Selain itu, model tiga dimensi ini juga bisa diunduh dari laman yang menyediakan berbagai model tiga dimensi untuk dicetak dengan menggunakan teknologi *3D printing*.

Ada dua cara yang banyak digunakan untuk mendesain model tiga dimensi mulai dari awal. Pertama, model bisa dibuat dengan menggabungkan model primitif seperti balok, silinder, ataupun bola. Berbagai perangkat lunak menggunakan cara ini untuk membuat model tiga dimensi seperti SolidWorks, Autodesk Inventor, dan PTC Creo. Masing-masing perangkat lunak mempunyai format masing-masing untuk membuat model tiga dimensi. Sebagai contoh, SolidWorks menggunakan format *SLDPRT*. Format model tiga dimensi ini adalah merupakan format model *solid*. Model *solid* ini mempunyai atribut seperti massa, volume, titik tengah gravitasi, dan momen inersia. Untuk bisa saling berkolaborasi, format dari masing-masing perangkat lunak dapat diubah terlebih dahulu menjadi format yang standar. Format standar yang umum untuk model tiga dimensi adalah *Initial Graphic Exchange Specification (IGES)* dan *Standard for Exchange of Product (STEP)* (Suteja, 2006).

Cara kedua yang dapat digunakan dalam mendesain model tiga dimensi adalah dengan memilih bentuk standar geometri dan mengubahnya menjadi *mesh* yang bisa diedit. *Mesh* terdiri dari sekumpulan poligon dengan empat sisi atau segitiga dengan tiga sisi yang terhubung satu dengan yang lain membentuk sebuah model tiga dimensi (Suteja *et al.*, 2006). Model *mesh* ini hanya menampilkan permukaan dari model tiga dimensi yang dibentuk sehingga dapat lebih cepat dalam memproses gambar. Bentuk dasar tersebut dapat dimodifikasi dengan melakukan proses *edit* pada titik, rusuk, permukaan, atau elemen lain untuk mendapatkan model yang diinginkan. Salah satu contoh perangkat lunak yang menggunakan cara ini adalah Blender, Autodesk Fusion 360, dan SketchUp. Format dari perangkat lunak Blender adalah format *BLEND*. Sedangkan Autodesk Fusion 360 menggunakan format *F3D* dan SketchUp menggunakan format *SKP*. Perbedaan antara format model *solid* dan *mesh* dapat dilihat pada **Gambar 3.1** di bawah ini.



**Gambar 3.1.** Perbedaan Model *Solid* dan *Mesh*  
(Sumber: Lygin, n.d.)

Format model tiga dimensi yang umum digunakan oleh *3D printer* adalah format model *mesh*. Untuk itu, model tiga dimensi dengan format yang lain bisa diubah terlebih dahulu ke format standar seperti *Object File (OBJ)* dan *Standard Triangle Language (STL)* agar bisa dimengerti oleh *3D printer* (Yeo *et al.*, 2018). Akan tetapi, perubahan format model tiga dimensi ke format *OBJ* atau *STL* akan membuat beberapa informasi terkait

model tiga dimensi menjadi hilang sehingga model tiga dimensi tidak bisa dikembalikan ke format asalnya. Perubahan menjadi format *STL* dapat diatur resolusinya mulai dari yang paling kasar sampai ke yang paling halus. Untuk model tiga dimensi yang detail, sebaiknya resolusi dibuat paling halus agar *3D printer* dapat mengenali detail kecil dari model tiga dimensi. Akan tetapi, semakin halus resolusi yang digunakan maka ukuran dari file model tiga dimensi akan semakin besar.

Selain mendesain mulai dari nol, sebuah model tiga dimensi bisa didapatkan dengan cara memindai objek yang sudah ada dan kemudian memodifikasi hasil pemindaian sehingga menjadi objek baru. Pemindaian objek dapat dilakukan dengan berbagai cara dan peralatan seperti *lasers scanning* dan *x-ray scanning*. Dengan proses pemindaian, titik-titik (*point clouds*) yang merupakan bagian dari objek diidentifikasi dan disimpan secara digital. Setelah itu, *point clouds* yang sudah didapatkan diubah menjadi model *mesh* dan kemudian dioptimasi untuk mendapatkan kualitas yang baik, namun tidak membuat waktu proses menjadi lama (Suteja *et al.*, 2010). Model *mesh* ini dapat dimodifikasi dengan menggunakan perangkat lunak tertentu untuk membuat objek dengan desain yang baru.

Cara yang paling mudah untuk mendapatkan model tiga dimensi untuk *3D printing* adalah dengan cara mengunduh model tiga dimensi yang tersedia di situs-situs repositori seperti *Thingiverse*, *Cults*, dan *MyMiniFactory*. Beberapa model tiga dimensi yang tersedia masih terikat dengan hak cipta dari pembuat tapi pada umumnya model tiga dimensi yang ada pada situs di atas dapat digunakan secara bebas. Selain menyediakan model tiga dimensi secara gratis, beberapa situs repositori juga merupakan tempat untuk berjual beli model tiga dimensi sehingga model tiga dimensi tersebut harus dibeli sebelum dapat diunduh.

---

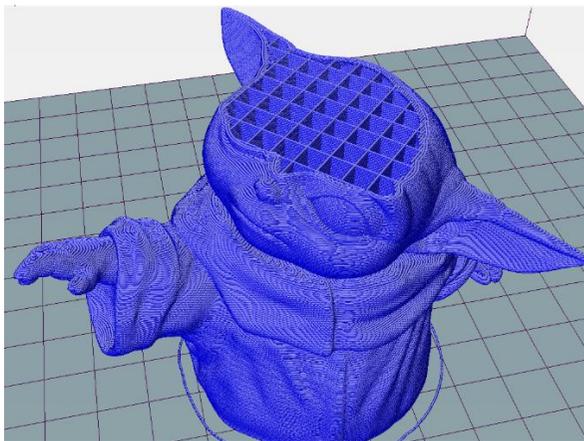
### **3.2. Melakukan Pengirisan (*Slicing*) Model Tiga Dimensi**

---

Setelah model tiga dimensi dari purwarupa yang akan dicetak sudah didapatkan, maka proses selanjutnya adalah mengubah model tadi sehingga menjadi lapisan-lapisan. Lapisan ini akan menjadi pola pencetakan mesin *3D printer*. Contoh perangkat lunak *open source* yang dapat digunakan untuk membuka dan memodifikasi model tiga dimensi serta kemudian melakukan proses pengirisan (*slicing*) adalah *Slic3r* dan *Cura*. Kedua perangkat lunak ini dapat membuka model tiga dimensi

dengan format *STL*, *OBJ*, dan *Additive Manufacturing File Format (AMF)*. Modifikasi yang dapat dilakukan oleh kedua perangkat lunak ini seperti memperbaiki kesalahan pada *mesh*, mengubah orientasi pencetakan, mengubah skala, dan menggandakan. Kedua perangkat lunak ini juga dapat digunakan untuk mengatur parameter pencetakan, melakukan simulasi pencetakan, menghitung waktu dan material yang dibutuhkan untuk mencetak purwarupa. **Gambar 3.2** menunjukkan hasil proses *slicing* dari suatu komponen.

Proses pengirisan terhadap model tiga dimensi sehingga menjadi lapisan demi lapisan dilakukan berdasarkan nilai dari parameter yang diinputkan pada perangkat lunak yang digunakan. Bentuk, ukuran, dan posisi dari setiap lapisan digunakan untuk menentukan gerakan dan kecepatan dari ekstruder dan meja. Selain itu, parameter temperatur dari ekstruder dan meja cetak juga akan menentukan pemanas dinyalakan atau dimatikan. Data posisi dan gerakan serta temperatur dari ekstruder dan meja akan digunakan untuk menghasilkan file *Geometrical Code (G-Code)* (Eva *et al.*, 2023). Kemudian *G-code* yang berisi kode-kode isyarat ini akan dikirimkan ke *3D printer*. Perangkat lunak Slic3r dan Cura dapat mendukung berbagai macam bahasa *G-Code* dari berbagai *firmware* seperti *Marlin* dan *Repetier* (Mohd Ariffin *et al.*, 2018). Jenis *firmware* yang dipakai bisa dipilih menyesuaikan dengan yang digunakan oleh *3D printer*. **Gambar 3.3** memperlihatkan contoh *G-code* yang dihasilkan oleh perangkat lunak *Slicer*.



**Gambar 3.2.** Hasil Proses *Slicing*

---

### 3.3. Melakukan Pencetakan Model Tiga Dimensi dengan 3D Printer

---

*G-Code* yang menentukan gerakan dan kecepatan dari ekstruder dan meja serta penyalan pemanas dapat dikirim ke *3D printer* melalui sambungan langsung dengan kabel (*USB A Male* ke *B Male*) atau melalui penyimpanan data digital (*SD Card*). Berdasarkan instruksi yang dikirimkan, motor *3D printer* akan bergerak dan ekstruder mulai mendorong dan mengendapkan filamen yang telah dipanaskan ke meja cetak. Sebelum material ini mulai dipanaskan dan dicetak, *3D printer* harus disiapkan terlebih dahulu. Pertama-tama, meja cetak harus diatur terlebih dahulu agar mendatar secara merata. Hal ini harus dilakukan agar material dapat menempel ke meja cetak dengan kuat. Untuk mengatur kedataran meja, ada beberapa *3D printer* yang dijual menyediakan fitur pengaturan otomatis. Jika fitur ini tidak tersedia maka selembar kertas kalibrasi atau kertas biasa dapat digunakan untuk mengukur jarak antar *nozzle* dengan meja cetak di semua titik sudut dan bagian tengah meja cetak. Pengaturan kedataran meja cetak dengan menggunakan kertas dapat dilihat pada **Gambar 3.4.**

```
; generated by Slic3r 1.3.1-dev (Build b1a5500f427700ac3dffc0e7d9535ea65f993537) on 2024-10-18 at 14:33:18
; external perimeters extrusion width = 0.44mm (3.38mm^3/s)
; perimeters extrusion width = 0.48mm (7.54mm^3/s)
; infill extrusion width = 0.48mm (10.05mm^3/s)
; solid infill extrusion width = 0.48mm (2.51mm^3/s)
; top infill extrusion width = 0.48mm (1.88mm^3/s)

M107
G92 E0
M190 S60 ; set bed temperature and wait for it to be reached
M104 S200 ; set temperature
G28 ; home all axes
G1 Z5 F5000 ; lift nozzle

; Filament gcode

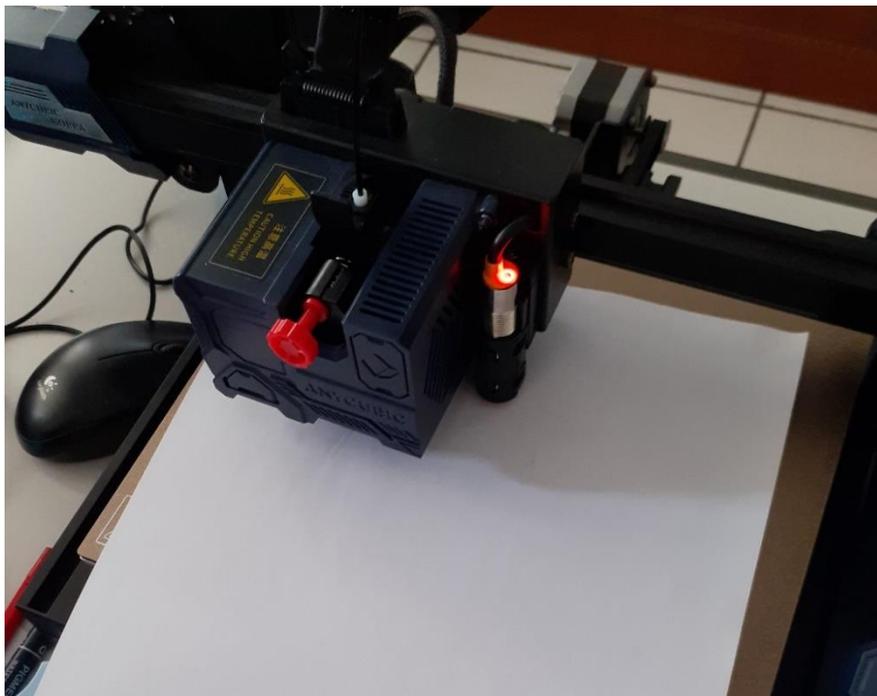
M109 S200 ; set temperature and wait for it to be reached
G21 ; set units to millimeters
G90 ; use absolute coordinates
M82 ; use absolute distances for extrusion
G92 E0
G1 Z0.300 F7800.000
G1 E-2.00000 F2400.00000
G92 E0
```

**Gambar 3.3.** Contoh *G-code*

Celah antara meja cetak dan *nozzle* harus diatur tidak terlalu dekat agar tidak terjadi penekanan berlebihan pada material dan tidak terlalu jauh agar lapisan material menempel dengan baik ke meja cetak. Jika material membutuhkan meja cetak dengan temperatur tertentu, maka meja cetak harus dipanaskan terlebih dahulu agar tidak terjadi penyusutan

material yang terlalu besar. Pada awalnya, *nozzle* akan diletakkan di titik koordinat awal yang disebut dengan *home*. Setelah meja cetak siap digunakan, ekstruder dapat mulai dipanaskan agar material melunak dan dapat ditekan keluar dari *nozzle*. Setelah meja cetak dan material siap, maka proses pencetakan dapat dimulai. *Nozzle* dan atau meja cetak akan mulai bergerak dan ekstruder akan mulai melakukan pendeposisian material yang keluar dari *nozzle*.

Selain itu, temperatur ruangan juga harus diatur agar tidak memengaruhi temperatur dari material maupun meja cetak secara berlebihan. Sebagai contoh, penggunaan kipas angin atau pendingin udara akan memengaruhi laju perpindahan panas dari *nozzle* dan meja cetak sehingga memperbesar kemungkinan terjadinya tekukan pada bagian ujung hasil cetakan dan juga memengaruhi kualitas dari hasil cetakan (Si *et al.*, 2023). Jika terjadi tekukan, maka hasil cetakan akan mudah terlepas dari meja cetak.



**Gambar 3.4.** Pengaturan Ketinggian Meja Cetak dengan Kertas

---

### 3.4. Melakukan *Finishing*

---

Setelah proses pencetakan selesai, hasil cetakan umumnya masih harus diproses lanjut (*finishing*) karena masih kasar atau masih ada sisa-sisa material yang masih menempel. Jika proses pencetakan membutuhkan penyangga maka sisa material penyangga yang masih menempel perlu untuk dibuang. Berbagai proses akhir dapat dilakukan sesuai dengan kebutuhan. Berbagai macam proses lanjut dapat dilakukan pada hasil cetakan *3D printing* seperti proses kimia, proses mekanik, dan proses termal (Kantaros *et al.*, 2024). Proses penghalusan mekanik dapat dilakukan menggunakan proses yang disebut dengan *sanding* atau proses penghalusan dengan kertas ampelas. Contoh proses *sanding* dapat dilihat pada **Gambar 3.5**. Ukuran kehalusan kertas ampelas yang digunakan sebaiknya bertahap mulai dari yang paling kasar sampai dengan yang paling halus. Proses penghalusan permukaan juga dapat dilakukan dengan menggunakan bahan kimia seperti pelarut *acetone* atau bahan pelapis *XTC*. Selain itu, proses pengecatan juga dapat dilakukan untuk memperbaiki kualitas permukaan. Jika peningkatan sifat mekanik juga dibutuhkan maka proses perlakuan panas juga bisa dilakukan (Evan *et al.*, 2023).



**Gambar 3.5.** Proses *Sanding*  
(Sumber: <https://www.freepik.com>)

# BAB IV.

## OPTIMALISASI DESAIN UNTUK 3D PRINTING

---

### 4.1. Peranan Desain untuk Proses 3D printing

---

Desain dari suatu purwarupa yang akan dicetak dengan proses *3D printing* harus mengikuti panduan terkait proses agar lebih optimal dan tidak mengalami masalah pada saat pencetakan (Egan, 2023). Sebagai contoh, model tiga dimensi yang dicetak dengan menggunakan *3D printing* jenis FFF/FDM perlu didesain sedemikian rupa untuk menghindari kerusakan akibat sifat hasil cetakan yang tidak isotropi, menghindari kebutuhan akan penyangga, dan menghindari penyusutan yang tidak merata. Geometri dan ukuran fitur pada desain dari purwarupa juga harus disesuaikan dengan kapasitas atau kemampuan yang didapat dilakukan oleh *3D printer*.

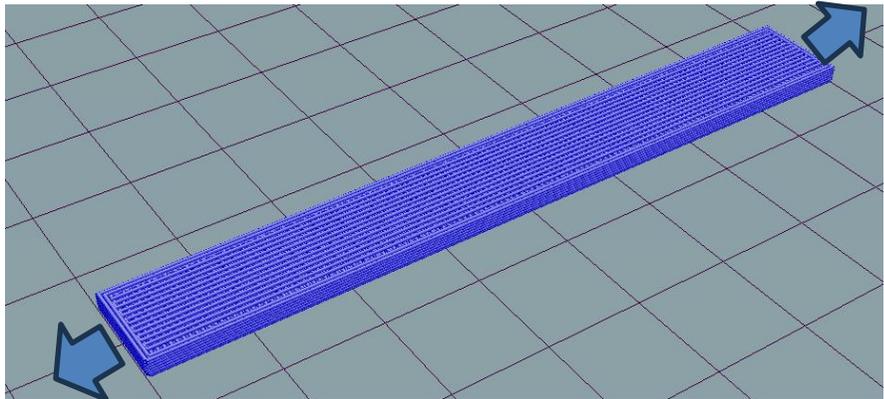
---

### 4.2. Permasalahan Proses 3D Printing Akibat Desain

---

Salah satu keterbatasan dari proses FFF/FDM adalah hasil cetakan yang bersifat tidak isotropi. Sebagai akibatnya, jika hasil cetakan ditarik pada arah yang berbeda maka hasil cetakan akan mengalami kerusakan yang berbeda. Pada kasus tertentu, hasil cetakan yang dibuat menggunakan material yang kuat sekalipun tetap akan mudah rusak karena sifat tidak isotropi ini menyebabkan ikatan mekanik antar lapisan yang lemah (Somireddy & Czekanski, 2018). Oleh karena itu, purwarupa harus didesain agar dapat dicetak pada orientasi raster tertentu yang tidak dipengaruhi oleh ikatan mekanik antar lapisan. Orientasi raster adalah letak dari garis-garis filamen yang dikeluarkan oleh *nozzle* (Suteja, 2021). Sebagai contoh, orientasi raster harus diatur sejajar dengan tarikan yang terjadi pada purwarupa agar mampu menahan tarikan yang lebih besar dibanding jika orientasi raster diatur tegak lurus dengan tarikan. Contoh

orientasi raster yang diatur sejajar dengan tarikan dapat dilihat pada **Gambar 4.1**.



**Gambar 4.1.** Orientasi Raster Sejajar Tarikan

Selain itu, proses FFF/FDM membutuhkan penyangga untuk purwarupa yang mempunyai fitur yang menggantung agar material yang keluar dari *nozzle* tidak jatuh karena gravitasi (Ahn *et al.*, 2022). **Gambar 4.2** menunjukkan macam-macam penyangga yang digunakan untuk menahan fitur yang menggantung. Umumnya fitur menggantung dengan panjang kurang dari 10 mm yang ditahan pada kedua sisinya tidak membutuhkan penyangga. Penyangga ini dihindari karena akan menambah waktu pencetakan dan juga material yang dibutuhkan. Penyangga juga akan menurunkan kualitas permukaan hasil cetakan baik itu kehalusan dan geometri sehingga membutuhkan waktu untuk proses tambahan seperti pembuatan atau penghalusan. Kebutuhan penyangga ini dipengaruhi juga oleh orientasi pencetakan yang digunakan. Oleh karena itu, purwarupa sebaiknya didesain sehingga bisa dicetak menggunakan orientasi yang tidak membutuhkan penyangga. Orientasi adalah cara peletakan purwarupa yang dicetak. Perubahan orientasi bisa menghilangkan kebutuhan akan penyangga. **Gambar 4.3** memperlihatkan desain yang membutuhkan dan tidak membutuhkan penyangga akibat perbedaan orientasi pencetakan. Jika kebutuhan penyangga tidak bisa dihindari, permukaan purwarupa yang membutuhkan kehalusan sebaiknya diorientasikan pada bagian bawah yang menempel ke meja cetak atau bagian atas cetakan. Untuk mendapatkan kualitas permukaan hasil cetakan yang baik dan waktu

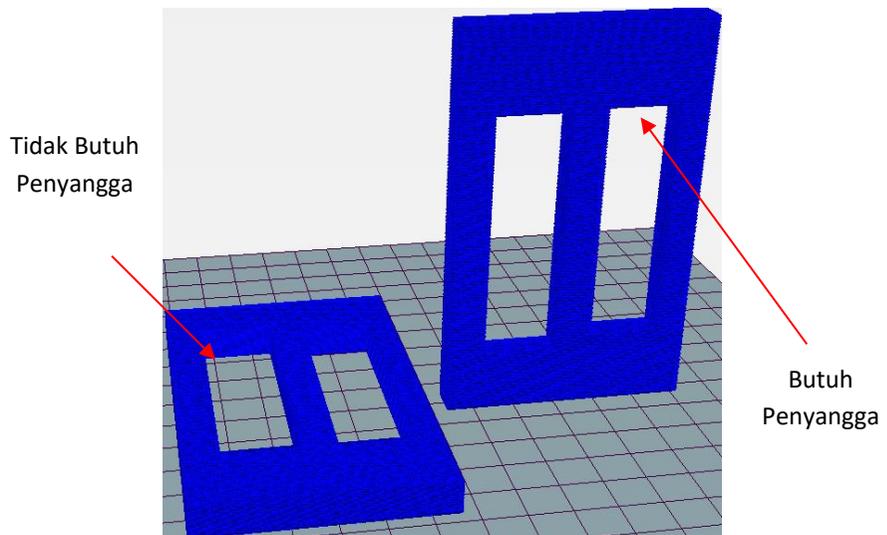
proses pembuatan yang sebentar, nilai dari parameter penyangga sebaiknya diatur agar mudah untuk dilepas atau dipotong. Parameter penyangga ini meliputi jenis pola, jenis material, kerapatan, jarak vertikal, dan jarak horizontal penyangga.



**Gambar 4.2.** Fitur Penyangga  
(Sumber: 3D Printing Support Structures: A Complete Guide, n.d.)

Desain purwarupa yang menyebabkan proses pendinginan yang berbeda antara satu permukaan dan permukaan yang lain akan menyebabkan penyusutan yang tidak merata pada hasil cetakan (Haidiezul *et al.*, 2020). Penyusutan ini akan menyebabkan tegangan sisa yang berdampak pada terjadinya pelengkungan (*warping*). Sebagai contoh, proses pendinginan yang tidak merata terjadi pada saat luasan permukaan purwarupa yang besar dan tebal dihubungkan ke permukaan lain yang tipis. Pada saat pendinginan terjadi, penyusutan kedua permukaan akan berbeda. Permukaan yang tipis akan membeku terlebih dahulu. Sebagai akibatnya, permukaan tipis ini akan ditarik oleh permukaan yang lebih tebal pada saat membeku. **Gambar 4.4** menunjukkan *warping* yang terjadi akibat penyusutan yang tidak merata. Penambahan fitur lengkungan (*fillet*) pada sudut atau rusuk dari purwarupa dapat digunakan mengurangi konsentrasi tegangan akibat proses penyusutan. Pemberian fitur *fillet* ini juga dapat membantu proses pelepasan purwarupa dari meja cetak walaupun sebenarnya fitur potongan sudut (*chamfer*) dengan sudut  $45^\circ$

akan lebih mempermudah proses pelepasan purwarupa. Fitur lengkungan ini sebenarnya akan terjadi pada setiap lapisan karena material yang keluar dari *nozzle* berupa silinder dengan radius tertentu. Akan tetapi, pada umumnya lengkungan ini mempunyai radius yang sangat kecil sehingga kurang membawa dampak dalam mencegah *warping*.



**Gambar 4.3.** Orientasi Pencetakan dan Pengaruhnya terhadap Penyangga

Geometri dan ukuran fitur pada purwarupa juga memengaruhi keberhasilan dan akurasi proses FFF/FDM dalam melakukan pencetakan (Abdelrhman *et al.*, 2019). Geometri dari fitur lubang berupa lingkaran yang terletak pada permukaan vertikal pada purwarupa tidak dapat dicetak berbentuk bulat penuh karena cetakan bagian atas lubang tidak mempunyai penopang yang cukup agar tidak jatuh. Oleh karena itu, fitur lubang berupa lingkaran sebaiknya hanya didesain berada pada permukaan yang bisa dicetak secara horizontal. **Gambar 4.5** menunjukkan permasalahan dalam pembuatan fitur lubang yang tidak dicetak secara horizontal. Sebagai alternatif lain, lubang yang berada pada permukaan vertikal tidak dibuat melalui proses pencetakan tapi dibuat dengan proses pengeboran. Geometri berbentuk bola akan membutuhkan penyangga dalam proses pencetakan karena geometri ini tidak bisa menempel dengan baik ke meja cetak. Alternatif yang bisa digunakan adalah dengan memecah bola

menjadi dua buah geometri setengah bola. Setelah geometri setengah bola selesai dicetak, keduanya bisa dirakit menjadi satu.



**Gambar 4.4.** *Warping*

Selanjutnya, apabila ukuran dari fitur tidak sesuai dengan nilai parameter proses yang mampu dikerjakan oleh printer, maka fitur tersebut akan tidak tercetak sesuai dengan desain dari purwarupa. Misalnya, ketebalan fitur yang tidak merupakan kelipatan dari diameter *nozzle* akan menyebabkan fitur tidak tercetak sesuai dengan ukuran yang ditentukan pada desain. Selain itu ukuran dari purwarupa yang melebihi ukuran dari meja cetak juga tidak bisa dicetak keseluruhan. Oleh karena itu, desain dari purwarupa yang mempunyai ukuran melebihi kapasitas meja cetak harus dibuat menjadi bagian-bagian kecil yang nantinya dapat dirakit menjadi satu purwarupa utuh (Jiang *et al.*, 2017).

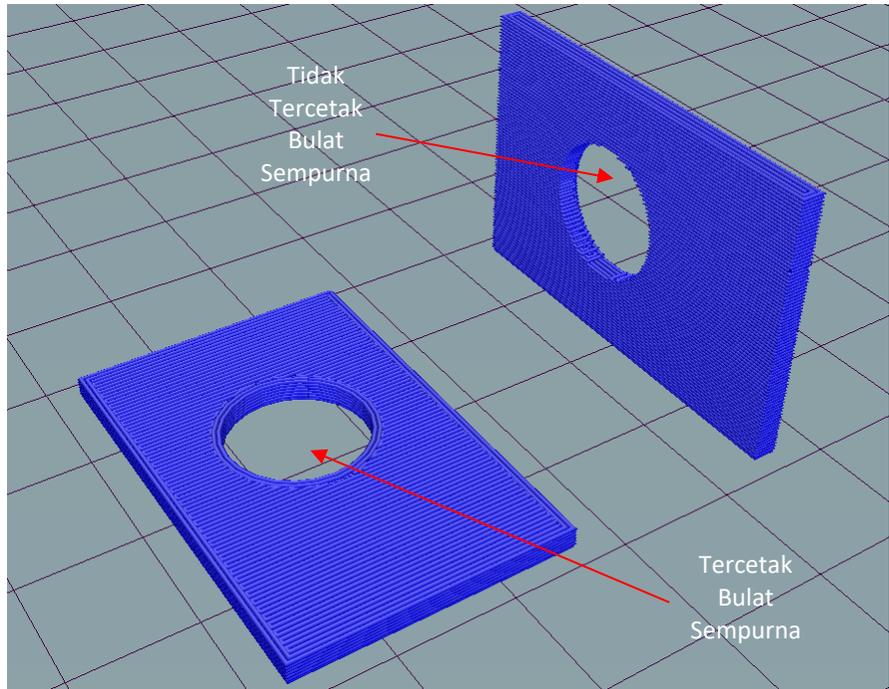
---

### **4.3. Strategi Desain untuk 3D Printing**

---

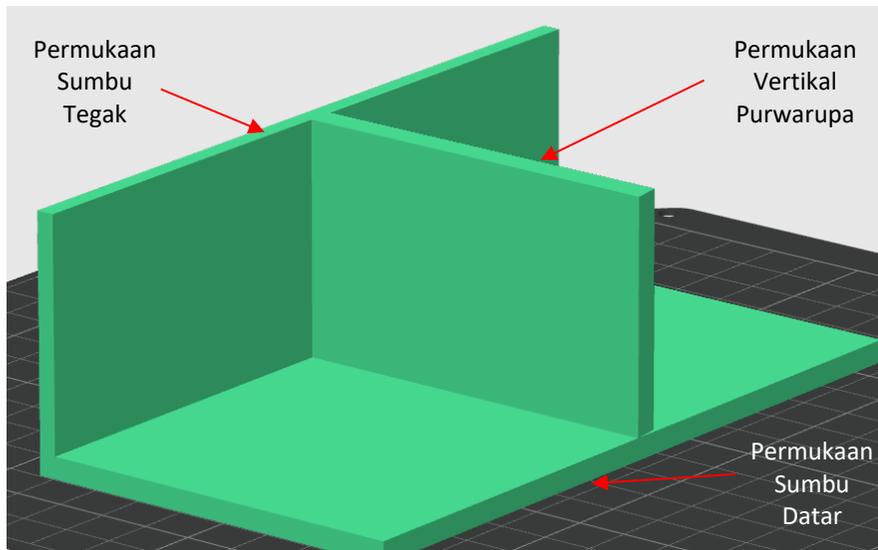
Beberapa strategi berikut ini sebaiknya diikuti agar hasil cetakan sesuai dengan rencana desain yang telah dibuat.

1. Permukaan vertikal purwarupa sebaiknya dibuat menempel dengan minimal dua permukaan lain pada dua sumbu berbeda untuk mengurangi terjadinya pelengkungan permukaan horizontal pada bagian pinggir (*warping*). Panduan untuk mendesain permukaan vertikal dapat dilihat pada **Gambar 4.6**.



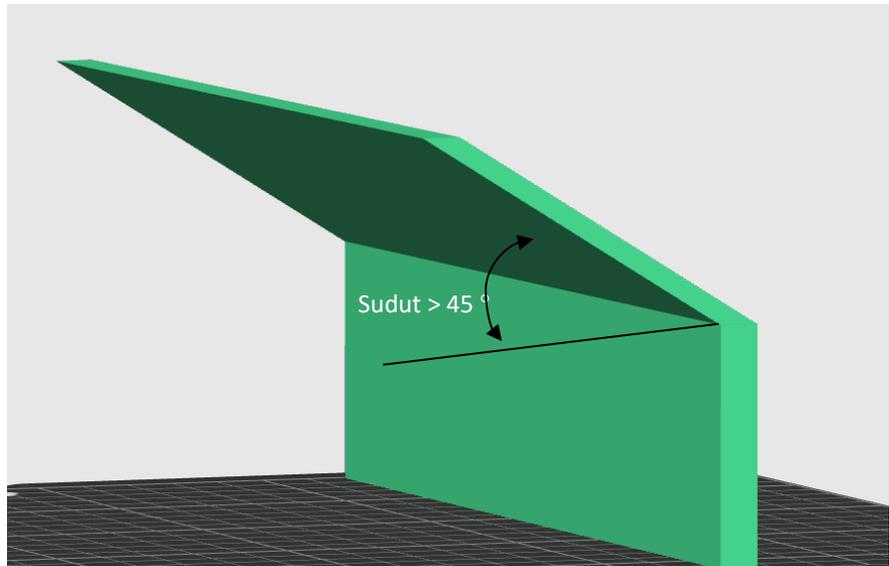
**Gambar 4.5.** Permasalahan Pembuatan Fitur Lubang

2. Permukaan yang menggantung sebaiknya dihindari. Jika dibutuhkan maka sudut antara permukaan yang tergantung tersebut dengan bidang horizontal sebaiknya sebesar mungkin untuk mengurangi kebutuhan penyangga. Permukaan dengan sudut  $45^\circ$  atau kurang terhadap bidang horizontal akan membutuhkan penyangga agar filamen yang keluar dari *nozzle* tidak jatuh. **Gambar 4.7** memperlihatkan rekomendasi sudut untuk permukaan menggantung. Semakin besar sudut permukaan yang menggantung maka permukaan hasil cetakan akan semakin halus dan kecepatan cetak yang dapat digunakan bisa lebih besar. Jika panjang horizontal dari permukaan menggantung kurang dari 3 mm, proses pencetakan dapat dilakukan tanpa perlu membuat penyangga. Hal ini dikarenakan filamen yang keluar dari *nozzle* masih dapat bertahan sehingga tidak jatuh.

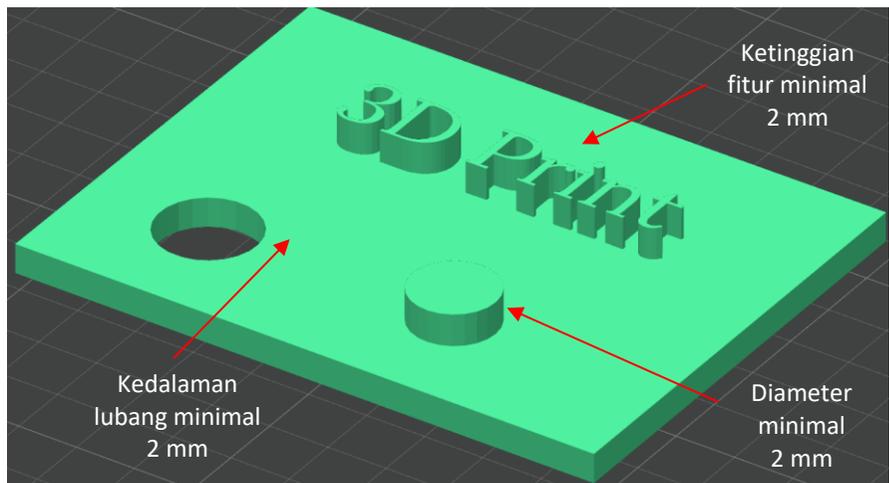


**Gambar 4.6.** Panduan untuk Permukaan Vertikal

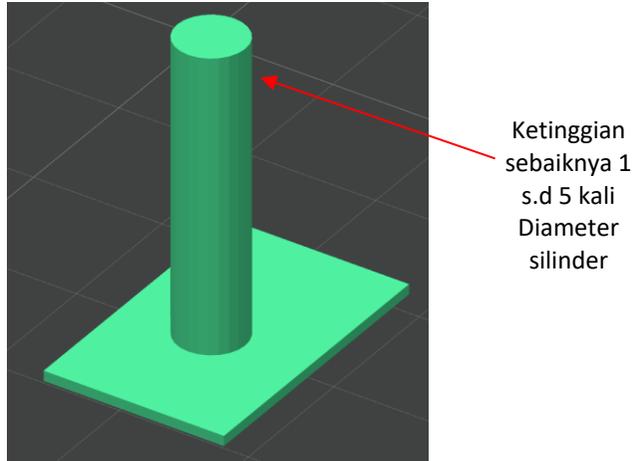
3. Kemudian, kedalaman dari fitur berupa ukiran yang tenggelam atau timbul pada sebuah permukaan sebaiknya dibuat minimal 2 mm agar tetap terlihat dan tidak menjadi satu dengan permukaan. Demikian juga, lubang pada suatu permukaan sebaiknya mempunyai diameter minimal 2 mm agar tidak tertutup oleh material yang diletakkan di dekatnya. Ukuran bagian luar fitur berupa silinder atau balok yang dicetak vertikal sebaiknya mempunyai ukuran minimal 2 mm agar bisa dicetak. **Gambar 4.8** menunjukkan panduan pemberian ukuran minimal dari sebuah fitur.
4. Selain itu, ketebalan fitur tersebut sebaiknya mempunyai ukuran minimal 2 kali ukuran diameter *nozzle* agar tetap kaku selama proses pencetakan. Perbandingan tinggi dan diameter dari fitur yang dicetak vertikal pada sebuah permukaan harus cukup besar untuk dapat menahan fitur tersebut tetap tegak dengan stabil. Panduan perbandingan ukuran tinggi dan diameter dari suatu fitur dapat dilihat pada **Gambar 4.9**.



**Gambar 4.7.** Rekomendasi Sudut untuk Permukaan Menggantung



**Gambar 4.8.** Panduan Ukuran Fitur Minimum



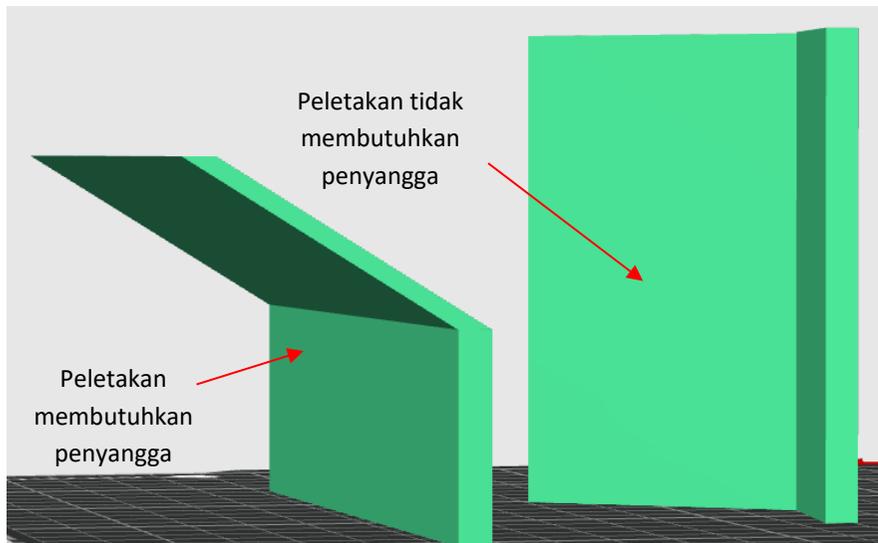
**Gambar 4.9.** Panduan Perbandingan Ukuran Fitur

# BAB V.

## PARAMETER PROSES 3D PRINTING

Pada saat dikirimkan ke perangkat lunak *Slicer*, model tiga dimensi akan diletakkan sesuai dengan orientasi pencetakan standar dari perangkat lunak yang digunakan. Oleh karena itu, model tiga dimensi yang telah dibuat mungkin perlu diorientasikan terlebih dahulu sesuai dengan rencana pada saat desain dibuat. Sebagai contoh, perangkat lunak *Slicer* mungkin akan meletakkan model tiga dimensi dengan orientasi pencetakan vertikal sehingga menyebabkan dibutuhkan penyangga padahal pada saat desain dibuat model tiga dimensi tersebut seharusnya diletakkan horizontal (Matos *et al.*, 2020). Contoh peletakan standar oleh perangkat lunak yang perlu diubah dapat dilihat pada **Gambar 5.1**. Peletakan yang terlihat pada gambar sebelah kiri akan membutuhkan penyangga karena ada permukaan yang menggantung dengan sudut kurang dari  $45^\circ$  terhadap bidang horizontal. Sebaiknya peletakan tersebut diganti sehingga menjadi gambar sebelah kanan. Pada gambar sebelah kanan, proses pencetakan tidak membutuhkan penyangga karena tidak ada permukaan yang menggantung. Permukaan yang membutuhkan penyangga akan menjadi lebih kasar dan membutuhkan proses akhir.

Selain melakukan modifikasi orientasi pencetakan, ukuran model tiga dimensi yang akan dicetak juga dapat disesuaikan dengan meja cetak dari mesin yang tersedia. Model tiga dimensi juga bisa digeser agar terletak pada lokasi tertentu dari meja cetak. Penggandaan model tiga dimensi yang akan dicetak juga mungkin dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *Slicer* agar beberapa model tiga dimensi dapat dicetak sekaligus. Penggeseran model tiga dimensi ini dibutuhkan terutama jika proses pencetakan dilakukan secara bersamaan untuk lebih dari satu model. Model tiga dimensi yang terletak berjauhan satu dengan yang lain akan menyebabkan proses pencetakan semakin lama (Luo & Tseng, 2017). Hal ini dikarenakan, *3D printer* membutuhkan waktu untuk berpindah dari satu model ke model yang lain pada saat proses pencetakan berlangsung.

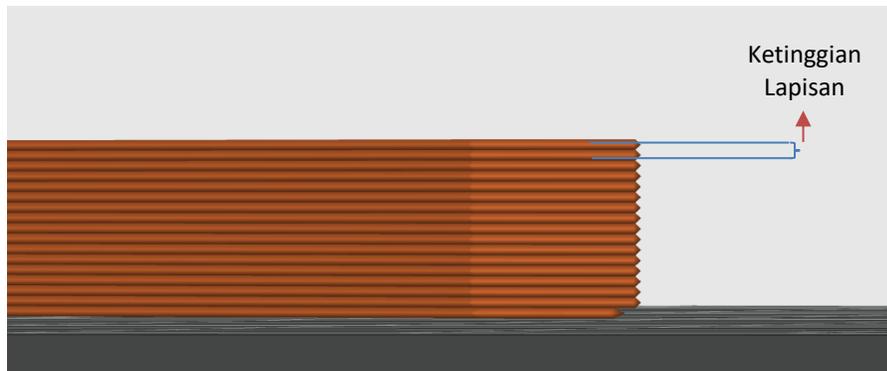


**Gambar 5.1.** Perbaikan Peletakan Model Tiga Dimensi yang Sama

Setelah peletakan, jumlah, dan skala model tiga dimensi sudah dimodifikasi sesuai dengan rencana desain, setelah itu nilai parameter pencetakan perlu untuk diatur. Nilai parameter pencetakan diatur dengan mempertimbangkan berbagai proses pengirisan dan pencetakan, filamen, dan *printer* yang digunakan. Parameter pencetakan dan pengirisan yang dapat diatur seperti ketinggian lapisan, ketebalan perimeter/dinding, kerapatan pengisian, pola pengisian, sudut pengisian, sudut yang membutuhkan penyangga, dan kecepatan pencetakan (Suteja & Soesanti, 2020). Parameter yang terkait filamen yang dapat ditentukan seperti diameter filamen, temperatur ekstruder, temperatur meja cetak, dan kecepatan kipas pendingin. Sedangkan parameter *printer* yang digunakan seperti diameter *nozzle* dan kapasitas volume pencetakan.

Ketinggian lapisan atau ketebalan lapisan adalah ketebalan pada arah sumbu vertikal dari masing-masing lapisan yang dikeluarkan oleh *nozzle* ekstruder dan diletakkan di atas meja cetak atau di atas lapisan sebelumnya. Gambar parameter ketinggian lapisan pada proses *3D printing* dapat dilihat pada **Gambar 5.2**. Parameter ini akan menentukan kualitas dari permukaan hasil cetakan terutama permukaan yang vertikal dan juga yang miring. Jika parameter ini dibuat kecil, maka permukaan akan menjadi lebih halus. Selain itu, semakin kecil parameter

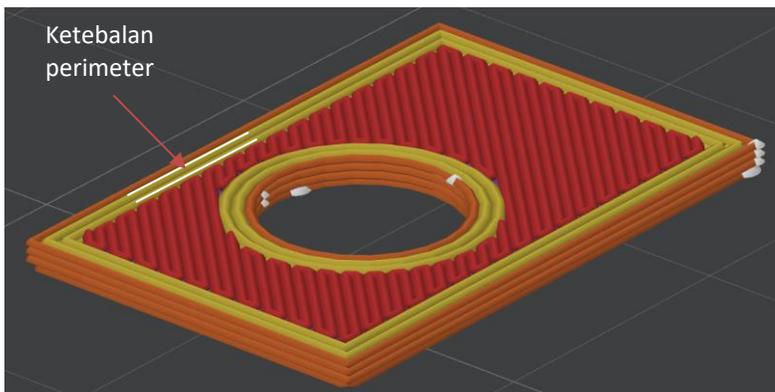
ini akan memungkinkan detail kecil dari model tiga dimensi dapat tercetak dengan baik. Akan tetapi, ketinggian lapisan yang semakin kecil akan meningkatkan waktu yang dibutuhkan untuk melakukan proses pencetakan. Oleh karena itu, jika purwarupa yang dicetak tidak membutuhkan penampilan detail dari permukaan purwarupa maka parameter ini dapat dibuat lebih besar agar dapat dicetak dengan lebih cepat. Parameter ini juga akan memengaruhi kekuatan mekanik dari purwarupa yang dicetak. Ketinggian lapisan yang terlalu kecil atau terlalu besar akan menurunkan kekuatan mekanik dari purwarupa. Hal ini terjadi karena ketinggian lapisan ini akan memengaruhi kekuatan ikatan mekanik antar lapisan. Semakin besar ketinggian lapisan, kekuatan untuk menahan tarikan pada tiap lapisan akan semakin besar. Akan tetapi, semakin besar ketinggian lapisan ini menyebabkan ruang kosong yang berada di antara lapisan dengan lapisan menjadi semakin besar dan mengurangi kekuatan hasil cetakan dalam menahan tarikan. Oleh karena itu, ketinggian lapisan yang optimal perlu dicari dan digunakan untuk mencetak purwarupa yang mementingkan aspek fungsional dan ketahanan terhadap beban (Suteja & Soesanti, 2020).



**Gambar 5.2.** Ketinggian Lapisan

Ketebalan perimeter/dinding atau ketebalan cangkang (*shell*) adalah ketebalan dari dinding luar purwarupa yang dicetak. Ketebalan perimeter ini dapat dilihat pada **Gambar 5.3**. Pada gambar ini, ketebalan perimeter yang digunakan sebanyak tiga buah. Ketebalan perimeter ini merupakan kelipatan dari diameter *nozzle* yang digunakan. Oleh karena itu, jika

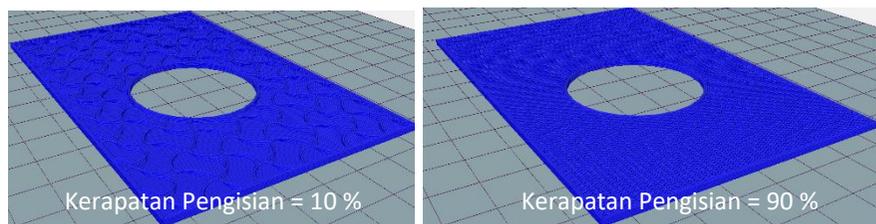
diameter *nozzle* adalah 0,4 mm dan ketebalan perimeter berjumlah 3 buah maka ketebalan total dinding adalah  $0,4 \text{ mm} \times 3 = 1,2 \text{ mm}$ . Semakin tebal perimeter maka kekuatan mekanik dari purwarupa yang dicetak akan semakin baik (Suteja *et al.*, 2023). Kekuatan tarik akan meningkat karena luasan yang menahan beban tarik akan semakin bertambah seiring dengan dinding yang semakin tebal. Kekuatan tekuk juga akan semakin meningkat karena ketebalan dinding meningkatkan momen tahanan tekuk dari hasil cetakan. Akan tetapi, perimeter yang semakin tebal akan semakin mengurangi bagian dalam purwarupa yang berongga. Sebagai akibatnya, kebutuhan material filamen akan semakin banyak karena bagian dinding yang pejal membutuhkan lebih banyak material dibanding dengan bagian yang berongga. Kebutuhan filamen ini juga akan memengaruhi massa dari hasil cetakan sehingga perimeter yang semakin tebal akan menyebabkan hasil cetakan semakin berat. Sedangkan, ketebalan perimeter yang terlalu kecil akan menyebabkan dinding menjadi mudah pecah dan permukaan dinding menjadi bergelombang.



**Gambar 5.3.** Ketebalan Perimeter

Kerapatan pengisian atau *infill density* adalah kepadatan pengisian dari rongga yang ada di dalam dinding purwarupa. Rongga ini dapat diisi material dengan persentase yang paling kecil sampai dengan yang paling besar. **Gambar 5.4** memperlihatkan perbedaan dua nilai kerapatan pengisian yang digunakan untuk mencetak purwarupa yang sama. Gambar kiri menunjukkan kerapatan pengisian yang lebih kecil dibanding dengan gambar kanan. Kerapatan yang semakin besar akan meningkatkan

kekuatan mekanik dari purwarupa (Suteja, 2021). Hal ini disebabkan karena semakin rapat isi bagian rongga maka luasan tarik dan momen tahanan tekuk menjadi semakin besar. Akan tetapi, kerapatan yang semakin besar juga akan meningkatkan jumlah material dan waktu pencetakan yang dibutuhkan. Kerapatan yang semakin besar akan membuat rongga semakin padat karena peletakan material filamen yang semakin banyak. Hal ini akan menyebabkan kebutuhan material dan waktu pencetakan yang semakin banyak. Kegunaan dari purwarupa yang dicetak menentukan nilai kerapatan yang digunakan. Untuk pembuatan sebuah purwarupa untuk melihat aspek estetika, kerapatan yang digunakan tidak perlu terlalu besar karena purwarupa hanya berfungsi untuk memperlihatkan detail luar dari suatu produk. Sedangkan untuk pembuatan purwarupa untuk memperagakan fungsi dan yang mengalami beban, rongga sebaiknya diisi dengan persentase kerapatan yang tinggi agar dapat menahan beban yang diberikan.

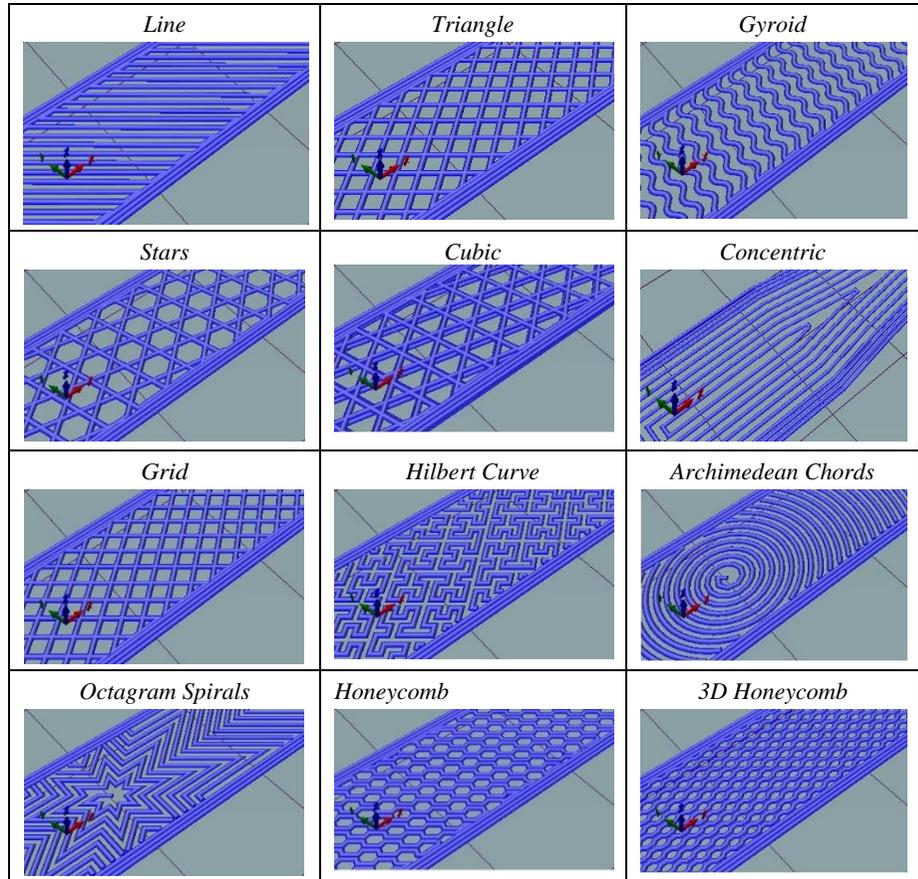


**Gambar 5.4.** Perbedaan Kerapatan Pengisian

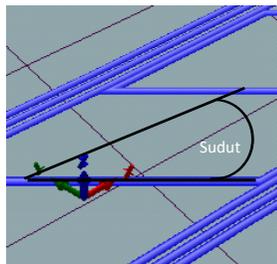
Rongga pada purwarupa dapat diisi dengan material menggunakan beberapa macam pola yang disebut dengan pola pengisian atau *infill pattern* seperti terlihat pada **Gambar 5.5**. Pola pengisian standar yang digunakan adalah berbentuk persegi panjang atau *rectangular*. Selain itu, pola pengisian lain yang dapat digunakan adalah *line*, *triangle*, *gyroid*, *stars*, *cubic*, *concentric*, *grid*, *hilbert curve*, *archimedean curve*, *octagram spiral*, *honeycomb*, dan *3D honeycomb*. Pola pengisian akan memengaruhi material dan kecepatan pencetakan yang dibutuhkan. Untuk melakukan pencetakan yang cepat dengan kebutuhan material yang sedikit, pola pengisian *gyroid* dapat digunakan (Wijayanto *et al.*, 2022). Sedangkan penggunaan pola pengisian *honeycomb* and *3D honeycomb* menyebabkan waktu pencetakan yang paling lama dan kebutuhan material yang paling

banyak. Selain itu, pola pengisian yang digunakan juga akan memengaruhi sifat mekanik dari purwarupa yang dicetak. Pola pengisian 3D *honeycomb* dapat menahan beban tekan yang paling besar dibanding dengan pola pengisian lain (Suteja, 2024). Jika purwarupa diinginkan untuk mempunyai kekuatan tekan yang baik tapi tetap ringan maka pola pengisian *honeycomb* dapat digunakan. Untuk menahan beban tarik, pola pengisian *honeycomb* and 3D *honeycomb* akan mampu menahan beban yang paling besar dari segala arah. Sedangkan untuk bisa menahan beban tarik yang besar yang bekerja sejajar dengan orientasi raster, pola pengisian *rectangular* atau *line* sebaiknya digunakan.

Setiap pola pengisian yang digunakan untuk mengisi rongga dapat diisikan dengan menggunakan berbagai macam sudut pengisian. Pengisian pola dapat dilakukan mulai dari sejajar dengan sumbu X dari mesin 3D printer atau 0° sampai dengan tegak lurus sumbu X atau 90°. Gambar sudut pengisian ini dapat dilihat pada **Gambar 5.6**. Sudut pengisian 90° secara umum dapat mempersingkat waktu pencetakan dan juga memperkecil material yang dibutuhkan untuk setiap pola pengisian yang digunakan (Suteja, 2021). Akan tetapi, penggunaan sudut pengisian 90° dapat menurunkan kekuatan tarik dari hasil cetakan. Hal ini dikarenakan ikatan antar raster yang terjadi saat menggunakan sudut pengisian 90° tidak sekuat ikatan dari filamen material yang digunakan. Akan tetapi, penggunaan sudut pengisian 90° dapat meningkatkan kekuatan tekan dari hasil cetakan karena raster yang terbentuk pada sudut pengisian 90° dapat menahan distribusi beban tekan yang lebih besar (Suteja, 2024). Sudut pengisian juga memengaruhi kekuatan dampak dari hasil cetakan. Penggunaan sudut pengisian 45° sebagai memberikan ketahanan dampak yang paling besar (Wibisono *et al.*, 2023).

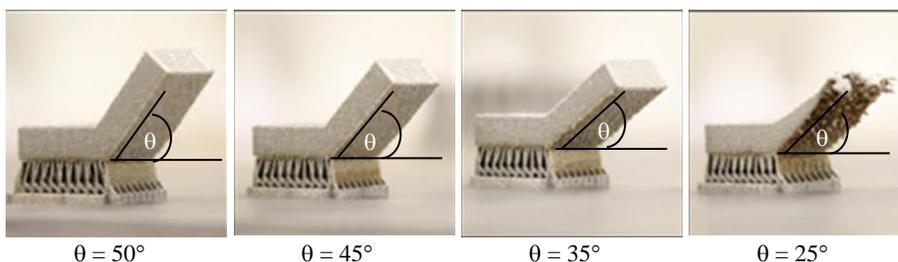


**Gambar 5.5.** Berbagai Macam Pola Pengisian  
(Sumber: Suteja, 2021)



**Gambar 5.6.** Sudut Pengisian  
(Sumber: Suteja, 2021)

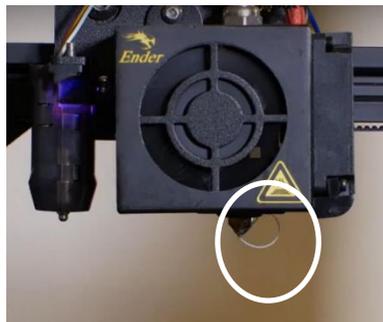
Purwarupa yang mempunyai fitur dengan permukaan yang menggantung umumnya membutuhkan penyangga (Viale *et al.*, 2022). Akan tetapi, penyangga tidak harus digunakan untuk sudut antara permukaan fitur yang menggantung dengan bidang horizontal yang lebih dari  $45^\circ$ . Walaupun begitu, penyangga tetap dapat diberikan untuk sudut permukaan antara  $45^\circ$  sampai sebelum  $90^\circ$ . Semakin kecil batas sudut pemberian penyangga, kebutuhan material akan semakin banyak dan waktu pencetakan akan semakin lama. Hal ini karena sudut permukaan menggantung yang semakin kecil akan diberi penyangga sehingga kebutuhan material dan waktu untuk membuat penyangga menjadi semakin banyak. Akan tetapi, semakin besar batas sudut pemberian penyangga akan menyebabkan kemungkinan kegagalan pencetakan yang semakin tinggi. Hal ini dikarenakan *3D printer* akan mencetak fitur menggantung dengan penyangga yang minimal. Penyangga yang semakin minimal menyebabkan kemungkinan deformasi akan semakin besar sehingga fitur tidak tercetak dengan sempurna. **Gambar 5.7** memperlihatkan deformasi yang terjadi karena tidak adanya penyangga akibat sudut batas pemberian penyangga yang semakin besar yaitu di atas  $50^\circ$ . Akibatnya fitur menggantung dengan sudut kurang dari dan sama dengan  $50^\circ$  tidak diberi penyangga. Fitur menggantung dengan sudut  $35^\circ$  dan  $25^\circ$  menjadi tidak sempurna akibat deformasi. Kemungkinan kegagalan dapat dikurangi dengan menurunkan ketebalan lapisan sehingga ikatan antar lapisan lebih kuat pada saat mencetak fitur menggantung.



**Gambar 5.7.** Deformasi Akibat Batas Sudut Penahan Terlalu Besar  
(Sumber: Mulherin, n.d.)

Kecepatan pencetakan umumnya ditentukan oleh kecepatan meja dan ekstruder dalam bergerak. Kecepatan pencetakan ini akan diiringi dengan kecepatan ekstruder dalam mengeluarkan filamen yang telah dilelehkan.

Semakin tinggi kecepatan pencetakan maka proses pencetakan juga akan semakin cepat. Meningkatkan kecepatan cetak dapat mengurangi kemungkinan material meleleh keluar dari *nozzle* dengan sendirinya atau disebut dengan *oozing*. *Oozing* ini dapat menyebabkan material yang tidak dibutuhkan akan keluar tanpa adanya tekanan dari ekstruder dan menempel pada purwarupa. **Gambar 5.8** menunjukkan terjadi *oozing* pada saat pencetakan. Akan tetapi, kecepatan pencetakan yang terlalu tinggi akan menurunkan akurasi dimensi dari hasil cetakan. Kecepatan cetak yang terlalu tinggi dapat menyebabkan *under-extrusion* yaitu material tidak mendapat cukup waktu untuk meleleh dan mengisi penuh lapisan hasil cetakan. Hasil cetakan yang tidak sempurna akibat dari *under-extrusion* dapat dilihat pada **Gambar 5.9**. Kecepatan yang terlalu tinggi juga memengaruhi penyusutan dari material hasil cetakan karena material akan lebih cepat mendingin dan menimbulkan tegangan sisa. Sebagai akibatnya, kekuatan mekanik dari hasil cetakan akan menurun (Daly *et al.*, 2023). Untuk fitur dari purwarupa dengan ukuran kecil, menurunkan kecepatan cetak harus dilakukan agar material dapat menempel dengan baik ke meja cetak dan mencegah *warping*. Dengan menurunkan kecepatan cetak, perbedaan temperatur antara material dan meja cetak menjadi lebih kecil sehingga material tidak menyusut terlalu cepat dan dapat menempel ke meja cetak.

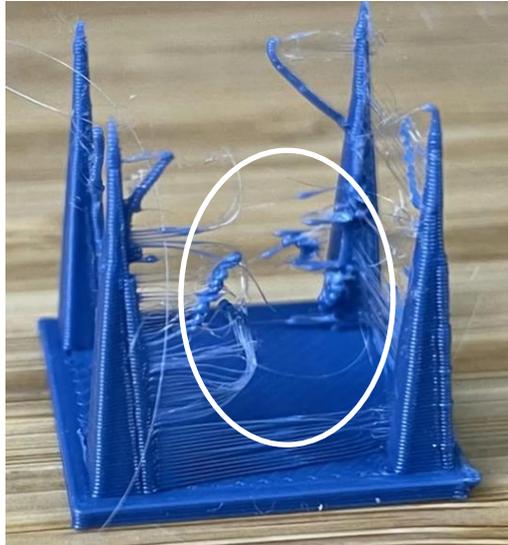


**Gambar 5.8.** *Oozing*



**Gambar 5.9.** *Under-extrusion*

Selain parameter pencetakan, parameter lain terkait filamen juga perlu diatur agar hasil cetakan sesuai dengan desain. Temperatur ekstruder perlu diatur agar bisa melelehkan material sebelum ditekan dan dideposisikan ke meja cetak. Jenis material yang berbeda membutuhkan rentang temperatur ekstruder tertentu agar material dapat meleleh dan dicetak. Semakin tinggi temperatur ekstruder yang digunakan maka material akan semakin lunak sehingga menyebabkan akurasi dimensi dan kualitas permukaan menurun. Temperatur ekstruder yang terlalu tinggi juga akan menyebabkan material keluar dari *nozzle* dengan sendirinya (*oozing*) dan dapat menyebabkan timbulnya serabut pada purwarupa (*stringing*). **Gambar 5.10** menunjukkan terjadinya *stringing* karena temperatur yang terlalu tinggi. *Stringing* dapat dikurangi dengan menarik kembali material yang ada di ekstruder sehingga tidak keluar dari *nozzle*. Sedangkan temperatur yang terlalu rendah akan menyebabkan *under-extrusion* karena material tidak mendapat cukup temperatur untuk meleleh dan mengisi penuh lapisan hasil cetakan. Jika pengaturan temperatur ekstruder menyebabkan penyusutan yang terlalu cepat maka akan terjadi *warping* dan bahkan delaminasi yaitu hasil cetakan mengelupas dari meja kerja. Temperatur ekstruder ini juga memengaruhi kekuatan mekanik dari hasil cetakan (Suteja, Firmanto, *et al.*, 2022). Jika temperatur ekstruder yang digunakan terlalu tinggi maka kekuatan mekanik dari hasil cetakan akan menurun karena ikatan mekanik yang terjadi rapuh dan mudah patah. Hal ini terjadi karena temperatur yang terlalu tinggi akan menyebabkan tegangan dalam yang lebih besar. Sedangkan, jika temperatur ekstruder terlalu rendah maka ikatan mekanik antar lapisan akan berkurang sehingga hasil cetakan akan mudah rusak.



**Gambar 5.10.** *Stringing*

Temperatur meja cetak perlu diatur menyesuaikan dengan temperatur ekstruder yang digunakan. Masing-masing material mempunyai rentang temperatur meja cetak yang perlu direkomendasikan. Jika temperatur ekstruder terlalu tinggi dibandingkan dengan temperatur meja maka hasil cetakan akan mengalami pelengkungan, *warping*, atau delaminasi. Hal ini disebabkan karena material yang menempel di meja cetak akan ditarik oleh material yang diletakkan di atasnya pada saat membeku. Sedangkan, jika temperatur meja terlalu tinggi dapat menyebabkan terjadinya *elephant foot* atau ketebalan yang terjadi pada bagian bawah hasil cetakan. Hal ini terjadi karena temperatur meja yang terlalu tinggi akan memperlambat pembekuan dari material yang diletakkan di meja cetak. Sebagai akibatnya, material tersebut akan tertekan oleh material yang diletakkan pada lapisan di atasnya. **Gambar 5.11** memperlihatkan *elephant foot* yang terjadi pada hasil cetakan. Temperatur meja juga akan memengaruhi kehalusan permukaan bagian bawah dari hasil cetakan. Jika temperatur meja terlalu rendah maka permukaan hasil cetakan yang menempel pada meja akan menjadi kasar dan tidak rata. Hal ini dikarenakan material yang bersentuhan dengan meja cetak yang lebih dingin akan menjadi lebih kental dan sulit menempel pada meja cetak dan tidak bisa menyebar

dengan merata ke atas meja cetak. Temperatur meja juga memengaruhi kekuatan dari hasil cetakan (Chadha *et al.*, 2019).



**Gambar 5.11.** *Elephant Foot*

Kecepatan kipas pendingin akan memengaruhi kecepatan pendinginan dari hasil cetakan. Jika kipas pendingin dimatikan maka hasil cetakan akan mendingin secara alami berdasarkan temperatur ruangan. Hal ini menyebabkan kecepatan penyusutan pada bagian yang baru saja dicetak menjadi berkurang (Si *et al.*, 2023). Penurunan kecepatan penyusutan akan menyebabkan berkurangnya tegangan sisa sehingga hasil cetakan akan lebih kuat. Kecepatan kipas pendingin yang lambat akan menyebabkan ikatan antar lapisan menjadi lebih kuat karena lapisan material tidak cepat membeku dan dapat terikat dengan lapisan di atasnya. Sedangkan jika kipas pendingin dinyalakan, maka detail fitur yang kecil dapat dicetak dengan tajam. Terjadinya *stringing* dapat dicegah karena material tidak terlalu cair saat *nozzle* bergerak. Selain itu, fitur yang menggantung akan lebih cepat membeku sehingga tidak mudah terdeformasi. Dengan menyalakan kipas pendingin, waktu pencetakan bisa dipercepat dengan meninggikan kecepatan pencetakan karena material dapat segera mendingin akibat ada perpindahan panas yang lebih cepat akibat aliran udara dari kipas pendingin. Untuk hasil cetakan yang mempunyai perbedaan ketebalan besar, kipas pendingin akan mengurangi penyusutan yang tidak merata sehingga *warping* bisa dikurangi.

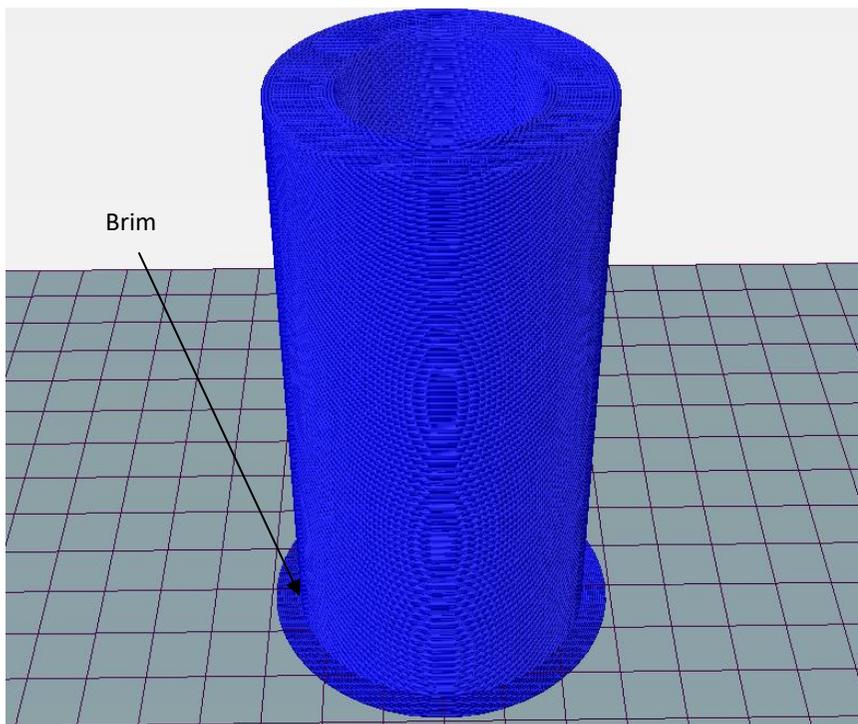
Diameter *nozzle* akan menentukan berapa ketebalan dari material yang keluar dari *nozzle*. Diameter *nozzle* akan memengaruhi berapa besar ketinggian lapisan cetakan. Untuk mendapatkan hasil cetakan yang baik, ketinggian lapisan tidak boleh melebihi 80% diameter *nozzle*. Diameter *nozzle* semakin kecil maka akan dapat menghasilkan bentuk yang lebih

detail pada permukaan horizontal. Diameter *nozzle* yang kecil mempermudah dalam membersihkan penyangga dan menghasilkan kualitas permukaan dari purwarupa yang baik. Sedangkan, diameter *nozzle* yang lebih besar dapat menambah kekuatan dari hasil cetakan (Sudin *et al.*, 2023). Semakin besar diameter *nozzle* ini akan memperbesar ketebalan material sehingga dapat menahan beban yang lebih besar. Selain itu, penggunaan diameter *nozzle* yang besar akan mempercepat proses pencetakan. Penggunaan diameter *nozzle* yang besar akan mengurangi risiko kegagalan pada pencetakan fitur yang menggantung karena dapat memberikan aliran material yang mencukupi dari ujung ke ujung fitur. Akan tetapi, diameter *nozzle* yang terlalu besar akan menyebabkan rongga antar raster pada hasil cetakan akan semakin besar sehingga menurunkan kekuatan dari hasil cetakan. Diameter *nozzle* yang besar dibutuhkan untuk mencetak material filamen yang kental atau mengandung penguat seperti serat agar tidak mudah terjadi penyumbatan (*clogging*).

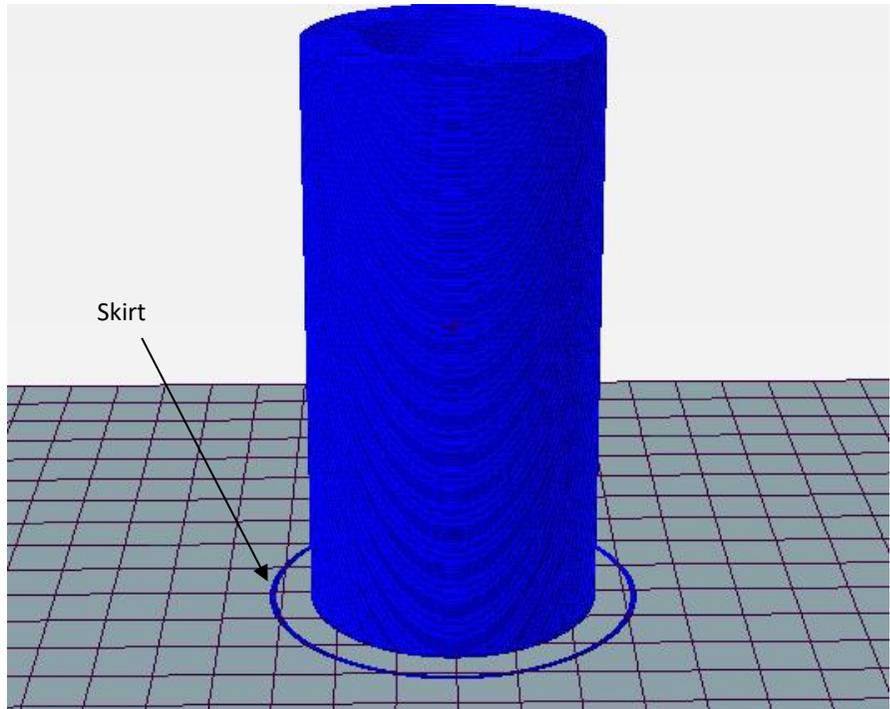
Selain parameter di atas, ada parameter tambahan pada proses *3D printing* yang dapat ditambahkan untuk membuat hasil cetakan yang lebih baik. Fitur dari purwarupa dengan perbandingan ketinggian dan luasan yang besar sebaiknya menggunakan *brim*. *Brim* adalah pembesaran lapisan pertama yang menyerupai topi dengan pinggiran melingkar. **Gambar 5.12** memperlihatkan *brim* yang ditambahkan dalam mencetak suatu silinder. Lapisan ini akan menempel pada bagian bawah fitur sehingga berfungsi untuk sebagai penopang dari fitur. *Brim* ini akan memperkuat daya tempel fitur pada meja cetak sehingga fitur tidak mudah terkelupas dari meja cetak. Semakin besar perbandingan ketinggian dan luasan, dimensi *brim* sebaiknya juga diatur semakin besar (Lv *et al.*, 2022). Semakin besar dimensi *brim* akan menyebabkan hasil cetakan akan semakin sulit untuk dilepas dari meja cetak. Penggunaan *brim* ini akan menambah penggunaan material dan juga meningkatkan waktu yang dibutuhkan.

Sedangkan parameter *skirt* akan dibutuhkan untuk melakukan pengecekan apakah dimensi meja cetak mencukupi untuk dapat mencetak purwarupa dengan ukuran yang diinginkan. *Skirt* adalah satu atau lebih putaran material yang dicetak di lapisan paling awal. *Skirt* ini diletakkan beberapa milimeter di luar bagian terluar dari purwarupa yang akan dicetak. **Gambar 5.13** menunjukkan penambahan *skirt* dalam proses pencetakan. *Skirt* juga digunakan untuk memastikan bahwa material pada

*nozzle* telah meleleh dan dapat digunakan untuk mencetak purwarupa. Selain itu, *skirt* ini juga digunakan untuk melindungi hasil cetakan dari aliran udara yang ada di sekitarnya sehingga tidak terjadi perpindahan panas dan penyusutan berlebihan (Nguyen *et al.*, 2022). Jika *skirt* masih tidak dapat melindungi hasil cetakan dari aliran udara yang mempunyai temperatur sesuai dengan lingkungan, maka dibutuhkan penutup (*enclosure*) mesin *3D printer* untuk mencegah terjadinya *warping* dan delaminasi. Keberhasilan pencetakan menggunakan material *acrylonitrile butadiene styrene* sangat dipengaruhi oleh penyusutan yang terjadi. Oleh karena itu, *3D printer* harus ditutup saat mencetak material *acrylonitrile butadiene styrene* agar tidak terjadi *warping* atau delaminasi. Ada sebagian *3D printer* yang sudah dilengkapi dengan penutup tapi ada juga yang belum menyediakan penutup. Jika *3D printer* belum dilengkapi dengan penutup, berbagai macam penutup juga sudah dijual bebas. Contoh penutup yang telah dijual bebas dapat dilihat pada **Gambar 5.14**.



**Gambar 5.12.** *Brim*



**Gambar 5.13.** *Skirt*



**Gambar 5.14.** *Penutup 3D Printer*

# BAB VI.

## MATERIAL 3D PRINTING

Material dari FFF/FDM umumnya adalah termoplastik yang mempunyai titik leleh yang tidak terlalu tinggi seperti *Polylactic Acid* (PLA), *Acrylonitrile Butadiene Styrene* (ABS), dan *Polyethylene Terephthalate Glycol* (PETG). Selain itu, ada material lain yang juga dapat digunakan seperti *Thermoplastic Polyurethane* (TPU), *Polyamide* (PA), sampai dengan *Polycarbonate* (PC). Selain untuk mencetak purwarupa, beberapa material juga digunakan untuk membantu dalam membuat *support* saat mencetak purwarupa dengan fitur yang menggantung. Contoh dari material untuk *support* ini adalah *Polyvinyl Alcohol* (PVA) dan *High Impact Polystyrene* (HIPS). Material ini dibentuk terlebih dahulu sehingga berbentuk filamen sebelum dimasukkan ke *3D printer* jenis FFF/FDM. Masing-masing material untuk mencetak purwarupa mempunyai kelebihan dan kekurangan masing-masing.

---

### 6.1. *Polylactic Acid*

---

*Polylactic Acid* (PLA) adalah material yang paling banyak digunakan karena merupakan material yang berasal dari bahan alam seperti jagung sehingga bersifat dapat diperbaharui (Sandanamsamy *et al.*, 2023). Selain itu, harga material ini juga tidak mahal. Proses pencetakan material ini menggunakan *3D printing* tidak membutuhkan temperatur tinggi. Pencetakan PLA tidak selalu membutuhkan penutup dan juga pemanas untuk meja karena PLA mempunyai penyusutan yang minimal sehingga tidak mudah mengalami *warping*. Material ini tidak berbau pada saat dipanaskan di ekstruder dan dikeluarkan dari *nozzle*. Pemberian warna pada PLA mudah untuk dilakukan sehingga tersedia dalam berbagai macam warna. Kekurangan material ini adalah tidak tahan terhadap panas dan kelembaban udara. Pada kelembaban tinggi, PLA akan menjadi getas dan mudah patah. PLA juga cepat terdegradasi pada lingkungan tertentu. Walaupun kekuatan mekanik material ini tidak terlalu besar tapi cukup

memadai untuk digunakan untuk berbagai keperluan seperti pembuatan purwarupa. Material ini dapat dimodifikasi sehingga menjadi berbagai macam komposit *polylactic acid* yang mempunyai kekuatan mekanik yang lebih baik. Oleh karena itu, material ini lebih sesuai untuk pembuatan purwarupa yang menampilkan fitur estetika dengan kekuatan mekanik yang cukup.

---

### **6.2. Acrylonitrile Butadiene Styrene**

---

Material lain yang banyak digunakan sebagai material FFF/FDM adalah *Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)*. Material ini murah dan mempunyai kekuatan mekanik terutama dampak yang lebih baik dari PLA (Ranjan *et al.*, 2022). Material ini lebih tahan lama dan dapat diproses *finishing* dengan menggunakan bahan kimia. Material ini juga tahan pada temperatur yang relatif tinggi tanpa mengalami deformasi. Akan tetapi, material ini tidak *biodegradable* karena dibuat dari bahan dasar minyak bumi. Selain itu, material ini akan mengeluarkan bau yang cukup menyengat pada saat proses pencetakan sehingga membutuhkan ruangan dengan pertukaran udara yang cukup pada saat pencetakan. Material ini menyusut cukup signifikan seiring dengan penurunan temperatur. Hal ini menyebabkan material ini mudah mengalami *warping*. Untuk mengurangi terjadinya *warping*, pencetakan material ini membutuhkan penutup *3D printer* dan pemanasan meja cetak agar penyusutan dapat dikurangi. Oleh karena itu, material ini bisa digunakan sebagai purwarupa fungsional yang membutuhkan ketahanan dampak yang tinggi dan juga bisa digunakan pada lingkungan dengan temperatur yang relatif tinggi.

---

### **6.3. Polyethylene Terephthalate Glycol**

---

*Polyethylene terephthalate glycol (PETG)* adalah juga material FFF/FDM yang banyak digunakan. Material ini berasal dari bahan dasar *Polyethylene Terephthalate (PET)* yang banyak digunakan sebagai kemasan air minum. Material ini murah, transparan, fleksibel, tahan air, tahan benturan, dan tahan lama. Material ini mempunyai penyusutan minimal seperti PLA dan mempunyai ketahanan seperti ABS (Holcomb *et al.*, 2022). Material ini elastis sehingga tidak mudah patah dan mempunyai ketahanan terhadap bahan kimia dan juga kelembaban. Akan tetapi, material ini tidak bisa digunakan di lingkungan yang relatif panas. Material

ini sangat dipengaruhi oleh temperatur cetak. Sebagai contoh, jika temperatur cetak terlalu tinggi maka tingkat transparansi dapat berkurang. Selain itu, material ini juga mudah tergores, tidak *biodegradable* dan lengket pada saat dipanaskan. Oleh karena itu, material ini cocok digunakan untuk purwarupa fungsional yang membutuhkan elastisitas dan kekuatan yang seimbang serta ketahanan terhadap air.

---

#### **6.4. Thermoplastic Polyurethane**

---

Sedangkan material *Thermoplastic Polyurethane* (TPU) banyak digunakan karena mempunyai sifat sangat elastis seperti karet (Rodríguez-Parada *et al.*, 2021). Walaupun sangat elastis, material ini mempunyai sifat tahan terhadap dampak dan abrasi. Material ini juga dapat digunakan pada lingkungan dengan temperatur yang relatif tinggi. Selain itu, material ini juga mempunyai ketahanan terhadap bahan kimia. Akan tetapi, material ini sulit dicetak karena sifatnya yang sangat elastis dan membutuhkan temperatur cetak yang lebih tinggi. Harga material ini juga relatif lebih mahal dibanding material lainnya. Oleh karena itu, material ini sesuai untuk digunakan sebagai purwarupa fungsional yang membutuhkan sifat elastis dan daya tahan terhadap lingkungan.

---

#### **6.5. Nylon**

---

Beberapa purwarupa menggunakan filamen PA atau *nylon* sebagai materialnya. Material ini lebih mahal dibanding material PLA, ABS, PETG, maupun TPU. Selain itu, material ini membutuhkan temperatur tinggi untuk dapat dicetak. Sebagai akibatnya, pencetakan material ini membutuhkan tutup *3D printer* dan meja cetak yang dipanaskan agar tidak terjadi *warping* (Arioli *et al.*, 2024). Akan tetapi, material ini mempunyai elastisitas yang baik dibanding material lain kecuali TPU. Material ini juga ketahanan dampak tinggi seperti ABS dan kekuatan tarik yang relatif lebih tinggi dibanding material lain. Oleh karena itu, material ini cocok digunakan sebagai purwarupa fungsional yang membutuhkan kekuatan dan ketahanan dampak tinggi.

---

## 6.6. Polycarbonate

---

Material lain yang dapat digunakan untuk pembuatan purwarupa adalah *Polycarbonate* (PC). Material ini mempunyai kelebihan terutama terkait sifat mekanik material terutama ketahanan terhadap impak. Material ini juga mempunyai transparansi tinggi. Selain itu, material ini juga tahan pada temperatur relatif tinggi (Bahar *et al.*, 2022). Akan tetapi, material ini mempunyai harga yang mahal. Proses pencetakan material ini membutuhkan temperatur cetak yang tinggi. Pencetakan material ini juga membutuhkan pemanasan pada meja cetak dengan temperatur yang lebih tinggi dibanding material lain. Material ini harus dikeringkan terlebih dahulu sebelum dicetak karena bersifat higroskopis atau menyerap kelembaban. Oleh karena itu, material ini sesuai untuk purwarupa yang membutuhkan transparansi dan ketahanan impak dan ketahanan panas yang tinggi.

# BAB VII.

## APLIKASI 3D PRINTING UNTUK PEMBUATAN PURWARUPA

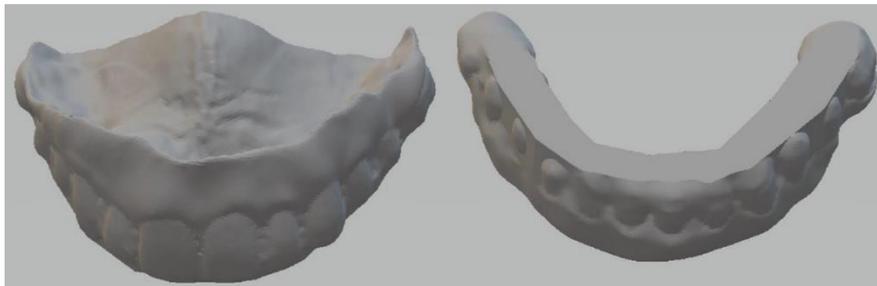
FFF/FDM sudah digunakan dalam membuat purwarupa di berbagai sektor industri seperti alat kesehatan, mekanik, dan elektronik.

---

### 7.1. Aplikasi Sektor Industri Kesehatan

---

Salah satu aplikasi FFF/FDM di sektor industri kesehatan yang sudah dilakukan adalah pembuatan purwarupa *bite registration* seperti terlihat pada **Gambar 7.1** (Lüchtenborg *et al.*, 2021). Umumnya plat dari *bite registration* ini dibuat dari akrilik dan dinding lilin. Hal ini membutuhkan waktu yang lama dan proses yang tidak bersih. Dengan menggunakan FFF/FDM, penggunaan lilin digantikan oleh material termoplastik sehingga pengguna lebih nyaman dalam menggunakan *bite registration* ini.



**Gambar 7.1.** Plat *Bite Registration*  
(Sumber: Lüchtenborg *et al.*, 2021)

Selain itu, FFF/FDM juga telah digunakan untuk membuat purwarupa alat bantu pemandu dalam operasi gigi seperti terlihat pada **Gambar 7.2** (Lüchtenborg *et al.*, 2021). Alat bantu ini digunakan untuk memandu dalam pemasangan implan gigi. Dengan menggunakan FFF/FDM, biaya

produksi alat bantu ini lebih murah. Alat ini menggunakan material yang biokompatibel sehingga tidak mengganggu kesehatan dan dapat digunakan langsung setelah sterilisasi.



**Gambar 7.2.** Alat Bantu Pemandu Operasi Gigi  
(Sumber: Lüchtenborg *et al.*, 2021)

Aplikasi lain FFF/FDM di sektor industri kesehatan adalah pembuatan implan tulang seperti terlihat pada **Gambar 7.3** (Wong, 2016). Implan ini digunakan sebagai pengganti dari tulang yang patah. Penggunaan implan yang dicetak dengan FFF/FDM dapat memfasilitasi pelekatan implan dengan tulang yang ada dan mengurangi kekakuan implan.

---

## 7.2. Aplikasi Sektor Industri Manufaktur

---

FFF/FDM juga telah digunakan untuk bermacam pembuatan purwarupa untuk produk manufaktur. Salah satu purwarupa yang telah dibuat dengan menggunakan FFF/FDM adalah komponen *venturi injector* seperti terlihat pada **Gambar 7.4** (Marin *et al.*, 2022). Alat ini merupakan komponen dari suatu produk penyemprot air. Alat ini didesain ulang agar dapat berfungsi dengan lebih baik. Hasil cetakan komponen dengan FFF/FDM mempunyai dimensi yang akurat. Kemudian, berdasarkan percobaan yang dilakukan, penyemprot air yang menggunakan komponen ini dapat berfungsi dengan optimal.



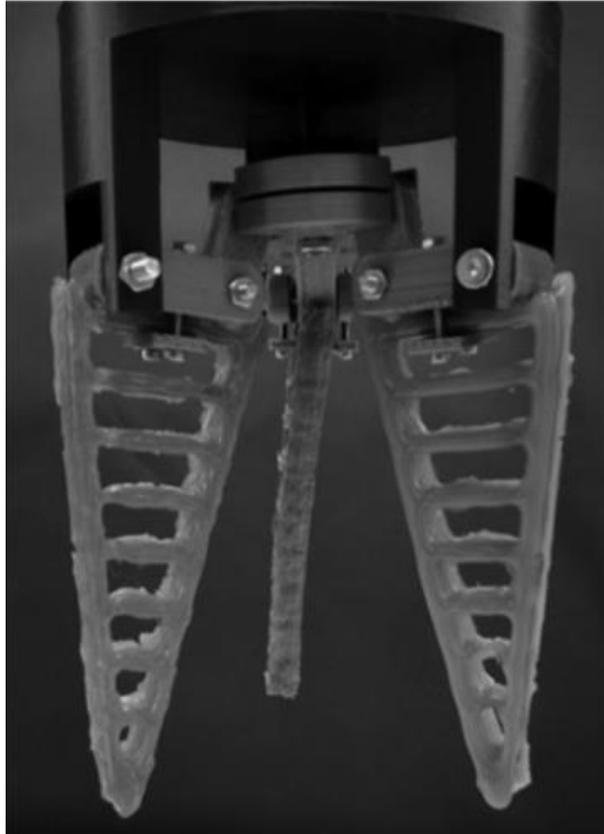
**Gambar 7.3.** Implan Tulang  
(Sumber: Wong, 2016)



**Gambar 7.4.** *Venturi Injector*  
(Sumber: Marin *et al.*, 2022)

Purwarupa lain yang dapat dibuat dengan menggunakan FFF/FDM adalah pencekam atau *gripper*. Purwarupa yang terlihat pada **Gambar 7.5** ini adalah komponen dari sebuah *self healing soft robot* (Roels *et al.*, 2020). *Gripper* ini berfungsi untuk mengambil sesuatu benda. FFF/FDM

menggunakan panas untuk melunakkan material dan juga untuk membuat mobilitas molekul dari material semakin tinggi sehingga dapat menambal pecahan yang terjadi pada *gripper*.



**Gambar 7.5.** *Gripper Robot*  
(Sumber: Roels *et al.*, 2020)

**Gambar 7.6** menunjukkan purwarupa alat bantu pemegang *endotracheal tubes* yang berfungsi untuk membantu bayi baru lahir yang bermasalah dengan pernafasan (Phunapai *et al.*, 2024). Purwarupa pemegang ini berfungsi untuk meminimalkan risiko tergelincirnya tabung ventilator yang dipasangkan pada pasien. Dengan menggunakan FFF/FDM, purwarupa ini dapat mengakomodir variasi dari peralatan *endotracheal tube* dengan menawarkan ketinggian yang dapat diatur sehingga sesuai dengan berbagai posisi bayi.



**Gambar 7.6.** Pemegang *Endotracheal Tube*  
(Sumber: Phunapai *et al.*, 2024)

---

### 7.3. Aplikasi Sektor Industri Elektronik

---

Purwarupa lain yang terlihat pada **Gambar 7.7** adalah sebuah *keyboard* yang dicetak dengan menggunakan FFF/FDM. Material yang digunakan untuk membuat *keyboard* adalah TPU. Tujuan pembuatan purwarupa ini adalah untuk mendapatkan *keyboard* yang lebih fleksibel atau elastis sehingga pengguna dapat lebih nyaman dalam menggunakannya.



**Gambar 7.7.** *Keyboard*  
(Sumber: Rodríguez-Parada *et al.*, 2021)

---

#### 7.4. Aplikasi Sektor Industri Otomotif

---

**Gambar 7.8** menunjukkan salah satu aplikasi purwarupa di sektor industri otomotif yaitu untuk membuat *intake manifold* untuk saluran udara atau campuran dengan bahan bakar ke mesin kendaraan (Ilardo & Williams, 2010). Dengan menggunakan FFF/FDM, *intake manifold* dapat dibuat lebih ringan dibandingkan dengan komponen konvensional.

---

#### 7.5. Aplikasi Sektor Industri Pesawat

---

FFF/FDM juga digunakan di sektor industri pesawat seperti pembuatan berbagai komponen yang terlihat pada **Gambar 7.9** (Hanaphy, 2020). Penggunaan *3D printing* dapat mengurangi biaya yang dikeluarkan dan juga meningkatkan efisiensi di industri pesawat terbang. Komponen yang dicetak akan lebih ringan sehingga dapat mengurangi konsumsi bahan bakar pesawat. Pengurangan konsumsi ini akan berdampak pada penghematan biaya operasional dan pengurangan emisi dari pesawat.



**Gambar 7.8.** *Intake Manifold*  
(Sumber: Ilardo & Williams, 2010)

---

## 7.6. Aplikasi Sektor Industri Kreatif

---

**Gambar 7.10** menunjukkan aplikasi 3D *printing* di sektor industri kreatif khususnya pembuatan bahan pakaian yang dinamakan *E-Textile* (M. Zhang *et al.*, 2019). *E-Textile* ini menggunakan kombinasi material khusus seperti *carbon nanotubes* sebagai inti konduktif dan *silk fibroin* sebagai selubung dielektrik untuk menciptakan bahan pakaian pintar multifungsi yang dicetak dengan menggunakan FFF/FDM. Bahan pakaian ini dapat memanen energi biomekanik dari gerakan tubuh manusia sehingga pakaian yang dibuat dengan bahan ini mempunyai sistem manajemen energi. Selain itu, penggunaan FFF/FDM dapat menghasilkan serat yang memiliki fleksibilitas baik, tahan air, dan memiliki adhesi yang kuat.



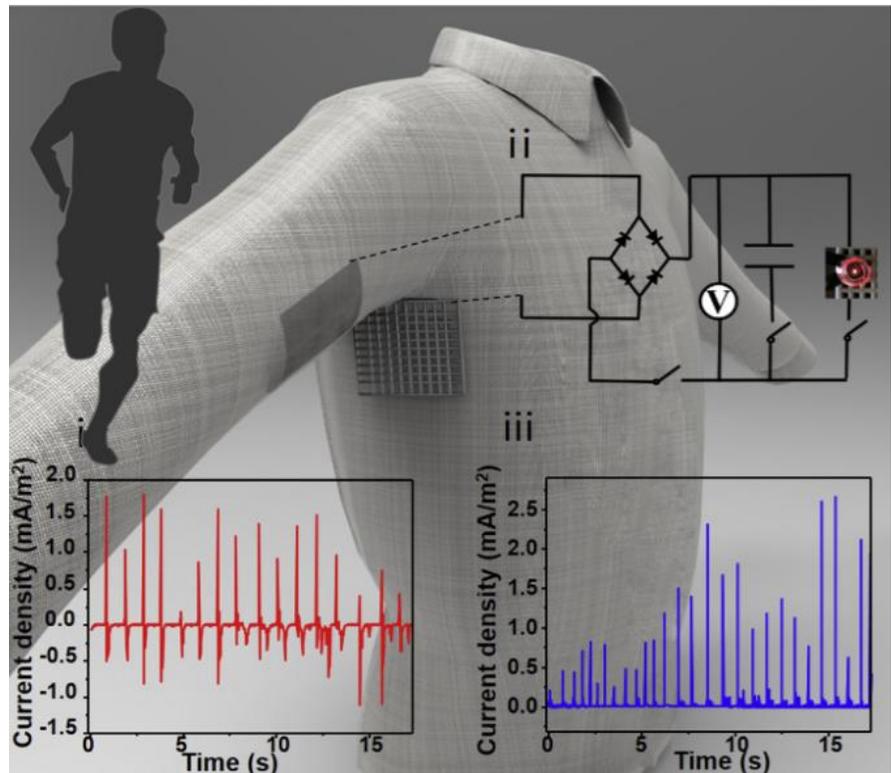
**Gambar 7.9.** Berbagai Komponen Pesawat Terbang  
(Sumber: Hanaphy, 2020)

Selain untuk mengatur energi, bahan pembuat pakaian juga bisa dibuat sehingga mampu mengirimkan data. **Gambar 7.11** menunjukkan baju dari petugas pemadam kebakaran yang dapat mengukur data detak jantung, mendeteksi adanya gas beracun, mengukur temperatur dan kelembaban di dalam maupun di luar baju (Soukup *et al.*, 2014). Data

tersebut kemudian dikirimkan ke pusat komando untuk bisa memonitor kondisi dari petugas yang menggunakannya.

### 7.7. Aplikasi Sektor Industri Pengolahan Makanan

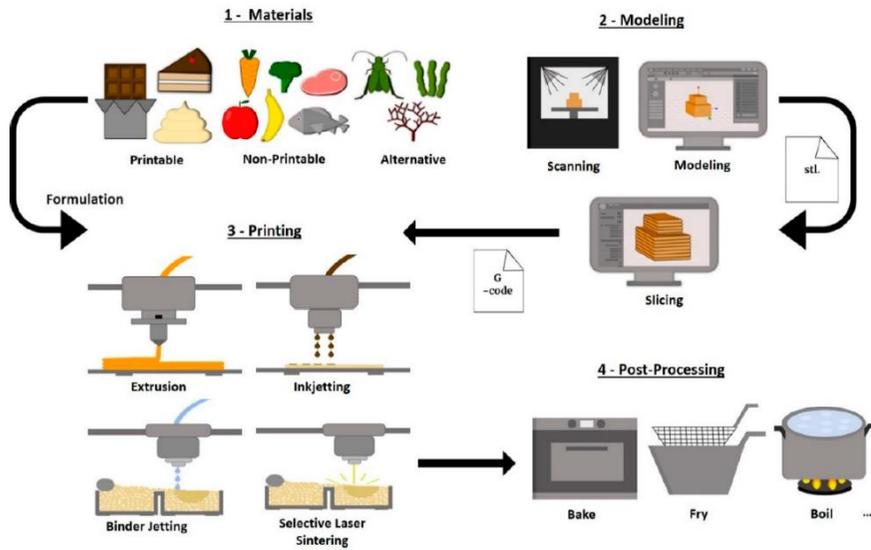
Pada sektor industri pengolahan makanan, *3D printing* juga dapat digunakan seperti terlihat pada **Gambar 7.12** (Pereira *et al.*, 2021). Berbagai material makanan dapat diolah sehingga menghasilkan makanan yang sesuai dengan kebutuhan nutrisi spesifik individu menggunakan FFF/FDM. Teknologi ini juga dapat membuat makanan dengan tekstur yang aman dan mudah ditelan misalnya oleh bayi atau lansia yang tidak mampu mengunyah makanan. Produk makanan dengan bentuk kompleks yang sulit dibuat dengan metode tradisional juga dapat dicetak menggunakan FFF/FDM.



**Gambar 7.10.** *E-Textile*  
(Sumber: M. Zhang *et al.*, 2019)



**Gambar 7.11.** Baju Petugas Pemadam Kebakaran  
(Sumber: Soukup *et al.*, 2014)



**Gambar 7.12.** 3D Printed Food  
(Sumber: Pereira *et al.*, 2021)

# BAB VIII.

## TEKNOLOGI *3D PRINTING* DALAM MEMPERCEPAT PROSES PEMBUATAN PURWARUPA

Teknologi *3D printing*, khususnya metode FFF/FDM, telah membuktikan diri sebagai alat yang sangat efektif dalam mempercepat proses pembuatan purwarupa. Teknologi ini memungkinkan pengurangan waktu produksi dari hitungan minggu atau bulan menjadi hanya beberapa jam atau hari, sekaligus menekan biaya pembuatan karena tidak memerlukan peralatan skala produksi di tahap awal pengembangan produk. Selain itu, *3D printing* memungkinkan pembuatan bentuk dan geometri kompleks yang sulit dicapai dengan metode manufaktur tradisional sehingga mendukung inovasi desain baik untuk keperluan estetika maupun fungsional. Teknologi ini juga mendukung personalisasi produk yang menjadi tren pada saat ini dan mendatang. Teknologi ini memungkinkan purwarupa dapat disesuaikan secara spesifik untuk kebutuhan individu atau pelanggan.

Buku ini memberikan strategi tentang desain purwarupa, parameter proses *3D printing* yang penting, serta pemilihan material untuk membuat hasil cetakan yang optimal. Dengan kombinasi desain yang tepat dan parameter yang dioptimalkan, hasil cetakan dapat mencapai kualitas tinggi. Buku ini juga menjabarkan aplikasi *3D printing* yang luas di berbagai sektor seperti kesehatan, mekanik, dan juga elektronik dalam mendukung inovasi dan efisiensi.

Sebagai kesimpulan, *3D printing* bukan hanya teknologi masa kini, tetapi juga teknologi masa depan yang mendukung kreativitas dan efisiensi dalam pengembangan produk. Buku ini diharapkan dapat menjadi referensi penting bagi praktisi, akademisi, dan pelaku industri dalam memanfaatkan teknologi *3D printing* secara maksimal.

## DAFTAR PUSTAKA

- 3D Printing Support Structures: A Complete Guide.* (n.d.).  
<https://amfg.ai/2018/10/17/3d-printing-support-structures-guide>
- Abdelrhman, A. M., Wei Gan, W., & Kurniawan, D. (2019). Effect of Part Orientation on Dimensional Accuracy, Part Strength, and Surface Quality of Three Dimensional Printed Part. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 694(1).  
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/694/1/012048>
- Ahn, J., Doh, J., Kim, S., & Park, S. I. (2022). Knowledge-Based Design Algorithm for *Support* Reduction in Material Extrusion Additive Manufacturing. *Micromachines*, 13(10).  
<https://doi.org/10.3390/mi13101672>
- Arioli, M., Puiggali, J., & Franco, L. (2024). Nylons with Applications in Energy Generators, 3D *Printing* and Biomedicine. *Molecules*, 29(11).  
<https://doi.org/10.3390/molecules29112443>
- Bahar, A., Belhabib, S., Guessasma, S., Benmahiddine, F., Hamami, A. E. A., & Belarbi, R. (2022). Mechanical and Thermal Properties of 3D Printed Polycarbonate. *Energies*, 15(10), 1–11.  
<https://doi.org/10.3390/en15103686>
- Berbagai Teknik yang Digunakan dalam 3D Printing.* (n.d.).  
<https://idseducation.com/teknik-yang-digunakan-3d-printing>
- Bhardwaj, A. R., & Ulhe, P. (2024). Rapid Prototyping Technology : A Driving Force in Product Development. *September*, 10–13.
- Çevik Aka, D. (2023). 3D Printer Technology Selection in Rapid Prototyping: A Spherical Fuzzy AHP Approach. *Business and Economics Research Journal*, 14(4), 503–523.  
<https://doi.org/10.20409/berj.2023.428>
- Chadha, A., Ul Haq, M. I., Raina, A., Singh, R. R., Penumarti, N. B., & Bishnoi, M. S. (2019). Effect of Fused Deposition Modelling Process Parameters on Mechanical Properties of 3D Printed Parts. *World Journal of Engineering*, 16(4), 550–559.  
<https://doi.org/10.1108/WJE-09-2018-0329>

- Cheng, C. (2021). Three-Dimensional Printing of Product Design Models Using Continuous-Fiber-Reinforced Composites. *Sensors and Materials*, 33(9), 3269–3282. <https://doi.org/10.18494/SAM.2021.3385>
- Daly, M., Tarfaoui, M., Chihi, M., & Bouraoui, C. (2023). FDM Technology and The Effect of *Printing* Parameters on the Tensile Strength of ABS Parts. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 126(11–12), 5307–5323. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11486-y>
- Dejene, N. D., & Lemu, H. G. (2023). Current Status and Challenges of Powder Bed Fusion-Based Metal Additive Manufacturing: Literature Review. *Metals*, 13(2). <https://doi.org/10.3390/met13020424>
- Egan, P. F. (2023). Design for Additive Manufacturing: Recent Innovations and Future Directions. *Designs*, 7(4). <https://doi.org/10.3390/designs7040083>
- Eva, S.-C., Sover, A., & Ermolai, V. (2023). The Impact of the G-Code Flavour Selection in FFF. *July*, 54–62. <https://doi.org/10.4995/bmt2022.2022.15547>
- Evan, M., Suteja, T. J., & Tjandra, S. (2023). The Influence of Annealing Temperature and Holding Time Near Glass Transition Temperature on the Tensile Strength of Fused Deposition Modeling Printed Polylactic Acid. *Jurnal Polimesin*, 21(1), 25–29.
- Gedik, E., & Toğay, A. (2016). Association Crafter Approach with Technology: Customized Product Design with 3D Printer. *New Trends and Issues Proceedings on Humanities and Social Sciences*, 2(1), 584–594. <https://doi.org/10.18844/prosoc.v2i1.512>
- Gülcan, O., Günaydın, K., & Tamer, A. (2021). The State of the Art of Material Jetting—A Critical Review. *Polymers*, 13(16). <https://doi.org/10.3390/polym13162829>
- Gupta, V., Nesterenko, P., & Paull, B. (2019). 3D Printing in Chemical Sciences: Applications Across Chemistry. Royal Society of Chemistry.
- Haidiezul, A. H. M., Hazwan, M. H. M., Lee, W. S., Gunalan, Najihah, N. F., & Fadhli, I. (2020). Shrinkage Optimisation on the 3D Printed Part Using Full Factorial Design (FFD) Optimisation Approach. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 932(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/932/1/012109>

- Hanaphy, P. (2020). *Hexcel Launches Conductive New Hexpekk Polymer for 3D Printing “Flight Ready” Aerospace Parts*. September 27th 2020. <https://3dprintingindustry.com/news/hexcel-launches-conductive-new-hexpekk-polymer-for-3d-printing-flight-ready-aerospace-parts-176436/>
- Harki Apri Yanto, Heru Suprpto, Antonius Kristijono, & Febri Setianto. (2022). Implementasi Prototyping Produk Fleksible dengan Mesin CNC Multifungsi (Milling, Laser Co2, dan 3d Printing). *SERENADE: Seminar on Research and Innovation of Art and Design*, 1, 228–233. <https://doi.org/10.21460/serenade.v1i1.36>
- Holcomb, G., Caldon, E. B., Cheng, X., & Advincola, R. C. (2022). On the Optimized 3D Printing And Post-Processing of PETG Materials. *MRS Communications*, 12(3), 381–387. <https://doi.org/10.1557/s43579-022-00188-3>
- Huutilainen, E., Salmi, M., Chekurov, S., & Flores Ituarte, I. (2016). Effect of Build Orientation in 3D Printing Production for Material Extrusion, Material Jetting, Binder Jetting, Sheet Object Lamination, Vat Photopolymerisation, and Powder Bed Fusion. *International Journal of Collaborative Enterprise*, 5(3/4), 218. <https://doi.org/10.1504/ijcent.2016.10003187>
- Ilardo, R., & Williams, C. B. (2010). Design and Manufacture of a Formula SAE Intake System Using Fused Deposition Modeling and Fiber-Reinforced Composite Materials. *Rapid Prototyping Journal*, 16(3), 174–179. <https://doi.org/10.1108/13552541011034834>
- ISO/ASME International. (2015). *Additive Manufacturing-General Principles-Terminology*. 5. [www.iso.org/iso/astm.org/itehstandardpreview/ASTM52900:2015](http://www.iso.org/iso/astm.org/itehstandardpreview/ASTM52900:2015) <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/d9adc3ce-ca51-4c21-b508-00fbb01687d/iso-astm-52900-2015>
- Jiang, X., Cheng, X., Peng, Q., Liang, L., Dai, N., Wei, M., & Cheng, C. (2017). Models Partition for 3D Printing Objects Using Skeleton. *Rapid Prototyping Journal*, 23(1), 54–64. <https://doi.org/10.1108/RPJ-07-2015-0091>
- Kantaros, A., Ganetsos, T., Petrescu, F. I. T., Ungureanu, L. M., & Munteanu, I. S. (2024). Post-Production Finishing Processes Utilized in 3D Printing Technologies. *Processes*, 12(3), 1–24. <https://doi.org/10.3390/pr12030595>

- Lüchtenborg, J., Burkhardt, F., Nold, J., Rothlauf, S., Wesemann, C., Pieralli, S., Wemken, G., Witkowski, S., & Spies, B. C. (2021). Implementation of Fused Filament Fabrication in Dentistry. *Applied Sciences (Switzerland)*, *11*(14). <https://doi.org/10.3390/app11146444>
- Luo, R. C., & Tseng, P.-K. (2017). Trajectory Generation and Planning for Simultaneous 3D Printing of Multiple Objects. *2017 IEEE 26th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, 1147–1152. <https://doi.org/10.1109/ISIE.2017.8001407>
- Lv, N., Li, Y., & Qiao, Y. (2022). Generation Algorithm of a Novel Platform Attached Support Structure for FDM-Fused Deposition Modeling. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/1532924>
- Lygin, R. (CAD E. (n.d.). *The Challenge Of The Mesh To A Solid BRep Conversion*. <https://cadexchanger.com/blog/the-challenge-of-the-polygonal-to-brep-conversion/>
- Macdonald, E., Salas, R., Espalin, D., Perez, M., Aguilera, E., Muse, D., & Wicker, R. B. (2014). 3D Printing for the Rapid Prototyping of Structural Electronics. *IEEE Access*, *2*, 234–242. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2014.2311810>
- Marin, E., Gheorghe, G. V., Bălțatu, C., & Mateescu, M. (2022). Application of 3D Printing Technology for the Design and Manufacture of Some Component Parts of Spraying Machine With Solution Recovery. *INMATEH-Agricultural Engineering*, *67*(2), 147–154. <https://doi.org/10.35633/inmateh-67-14>
- Matos, M. A., Rocha, A. M. A. C., & Pereira, A. I. (2020). Improving Additive Manufacturing Performance By Build Orientation Optimization. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *107*(5–6), 1993–2005. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-04942-6>
- Mehrabi, O., Seyedkashi, S. M. H., & Moradi, M. (2023). Functionally Graded Additive Manufacturing of Thin-Walled 316L Stainless Steel-Inconel 625 by Direct Laser Metal Deposition Process: Characterization and Evaluation. *Metals*, *13*(6). <https://doi.org/10.3390/met13061108>
- Mohd Ariffin, M. K. A., Sukindar, N. A., Baharudin, B. T. H. T., Jaafar, C. N. A., & Ismail, M. I. S. (2018). Slicer Method Comparison Using Open-Source 3D Printer. *IOP Conference Series: Earth and*

- Environmental Science*, 114(1), 0–4. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/114/1/012018>
- Msallem, B., Neha, S., Shuaishuai, C., Halbeisen, F. S., & Hans-Florian Zeilhofer, F. M. T. (2020). Evaluation of the Dimensional Accuracy of 3D-Printed Anatomical Mandibular Models Using. *Journal of Clinical Medicine*, 9(3), 1–18.
- Muenks, D., & Kyosev, Y. (2023). Productivity Comparison Between Vat Polymerization and Fused Filament Fabrication Methods for Additive Manufacturing of Polymers. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 10(1), 40–49. <https://doi.org/10.1089/3dp.2021.0009>
- Mughir, W., & Mughir, W. A. (2022). A Review in 3D Printing Technique: Types, Applications, and Process Parameters. *Journal of University of Babylon for Engineering Sciences*, January 2022. [www.journalofbabylon.com](http://www.journalofbabylon.com)
- Mulherin, K. (n.d.). *Metal 3D Printing: Who Needs Supports?* <https://www.machinedesign.com/3d-printing-cad/article/21154652/metal-3d-printing-who-needs-supports>
- Mulyani, L., Setiawan, F., & Sofyan, E. (2022). Analisis Karakteristik Keausan Material dengan Matriks Resin Menggunakan Filler Serat Bambu dan Pasir Besi Untuk Aplikasi Kampas Rem. *Teknika STTKD: Jurnal Teknik, Elektronik, Engine*, 8(1), 103–111. <https://doi.org/10.56521/teknika.v8i1.549>
- Nguyen, H. T., Crittenden, K., Weiss, L., & Bardaweel, H. (2022). Experimental Modal Analysis and Characterization of Additively Manufactured Polymers. *Polymers*, 14(10). <https://doi.org/10.3390/polym14102071>
- Nie, J., Xu, X., Yue, X., Guo, Q., & Zhou, Y. (2023). Less is more: A strategic Analysis of 3D Printing with Limited Capacity. *International Journal of Production Economics*, 258(February), 108816. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2023.108816>
- Pereira, T., Barroso, S., & Gil, M. M. (2021). Food Texture Design By 3D Printing: A Review. *Foods*, 10(2), 1–26. <https://doi.org/10.3390/foods10020320>
- Phunapai, N., Sriromreun, P., Sriromreun, P., Panburana, J., Rearkyai, S., Tawkaew, S., & Limboonruang, T. (2024). A Novel Safety Holder Device Designed for Securing the Endotracheal Tube in Neonates

- with Severe Respiratory Conditions. *Inventions*, 9(2). <https://doi.org/10.3390/inventions9020032>
- Prawata, A. A., Tjandra, S., & Suteja, T. J. (2023). Optimizing Surface Quality and Processing Time of 3D Printed Polylactic Acid Material for Rapid Tooling. *Academic Journal of Manufacturing Engineering*, 21(2), 82–85.
- Prawoto, Y., Manville, S., Sakai, T., Tanaka, M., & Gnauple-Herold, T. (2020). Manufacturing Process Beyond Conventional Plasticity Theory: Case Study in Manufacturing Low Spring Index Coil. *Current Journal: International Journal Applied Technology Research*, 1(2), 98–104. <https://doi.org/10.35313/ijatr.v1i2.32>
- Qi, Y., Mao, Z., Zhang, M., & Guo, H. (2020). Manufacturing Practices and Servitization: The Role Of Mass Customization and Product Innovation Capabilities. *International Journal of Production Economics*, 228(January 2019), 107747. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107747>
- Ranjan, R., Kumar, D., Kundu, M., & Chandra Moi, S. (2022). A Critical Review on Classification of Materials Used In 3D Printing Process. *Materials Today: Proceedings*, 61(2), 43–49. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.308>
- Ravi, B. (2016). SMART Foundry 2020. *IEEE Potentials*, 35(4), 29–32. <https://doi.org/10.1109/MPOT.2016.2540081>
- Rodríguez-Parada, L., De La Rosa, S., & Mayuet, P. F. (2021). Influence of 3D-printed TPU Properties for the Design of Elastic Products. *Polymers*, 13(15). <https://doi.org/10.3390/polym13152519>
- Roels, E., Terryn, S., Brancart, J., Verhelle, R., Van Assche, G., & Vanderborght, B. (2020). Additive Manufacturing for Self-Healing Soft Robots. *Soft Robotics*, 7(6), 711–723. <https://doi.org/10.1089/soro.2019.0081>
- Sandanamsamy, L., Harun, W. S. W., Ishak, I., Romlay, F. R. M., Kadirgama, K., Ramasamy, D., Idris, S. R. A., & Tsumori, F. (2023). A Comprehensive Review on Fused Deposition Modelling of Polylactic Acid. *Progress in Additive Manufacturing*, 8(5), 775–799. <https://doi.org/10.1007/s40964-022-00356-w>
- Si, H., Zhang, Z., Huseynov, O., Fidan, I., Hasan, S. R., & Mahmoud, M. (2023). Machine Learning-Based Investigation of the 3D Printer

- Cooling Effect on Print Quality in Fused Filament Fabrication: A Cybersecurity Perspective. *Inventions*, 8(1). <https://doi.org/10.3390/inventions8010024>
- Siregar, W., Napitupulu, R. A. M., & Siagian, P. (2020). Desain dan Manufaktur Model Piston Jupiter MX 135 cc Dengan Menggunakan 3D Printer. *Sprocket Journal of Mechanical Engineering*, 1(2), 73–80. <https://doi.org/10.36655/sprocket.v1i2.161>
- Somireddy, M., & Czekanski, A. (2018). Material Properties Of 3D Printed Parts: Challenges In Design And Analysis. 1–4. <https://doi.org/10.25071/10315/35409>
- Son, J., Yun, S., Park, K., Ryu, S., & Kim, S. (2022). Isotropic 3D Printing Using Material Extrusion of Thin Shell and Post-Casting of Reinforcement Core. *Additive Manufacturing*, 58(March), 102974. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102974>
- Soukup, R., Blecha, T., Hamacek, A., & Reboun, J. (2014). Smart Textile-Based Protective System for Firefighters. *ESTC 2014-5th Electronics System-Integration Technology Conference, November 2019*. <https://doi.org/10.1109/ESTC.2014.6962821>
- Sudin, M. N., Daud, N. M., Ramli, F. R., & Yusuff, M. A. (2023). The Effect of *Nozzle* Size on the Tensile and Flexural Properties of PLA Parts Fabricated Via FDM. *Science, Engineering and Technology*, 3(1), 33–43. <https://doi.org/10.54327/set2023/v3.i1.71>
- Surya Teja, R., Lokesh, M., Deepak Kumar, S., & Ramana Rao, P. S. V. (2023). 3D *Printing* of Complex Structures: Case study of Eiffel Tower. *Materials Today: Proceedings*, 76, 640–646. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.12.037>
- Suteja, T. J. (2006). The Role of Step-Nc in Improving the Performance of Supply Chain. *Jurnal Teknik Industri*, 7(2), 113–118. <https://doi.org/10.9744/jti.7.2.113-118>
- Suteja, T.J. (2021). Effect of Infill Pattern, Infill Density, and Infill Angle on the *Printing* Time and Filament Length of 3D *Printing*. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 12(1), 145. <https://doi.org/10.21776/ub.jrm.2021.012.01.16>
- Suteja, T.J. (2024). *Experimental Investigation of Infill Parameters Influence on Compressive Strength-to-Mass Ratio of PLA 3D Printed Part*. 21(1), 45–59.

- Suteja, T. J., Candra, S., & Yuniyanti, T. (2010). Optimasi Proses Reverse Engineering untuk Memodelkan Irregular Part Menggunakan Response Surface Methodology. *Seminar Nasional Ritektra 2010*.
- Suteja, T. J., Candra, S., Yuniyanti, T., & Kalirungkut, R. (2006). *Optimization Of Reverse Engineering Process for Constructing Rotational Part Model Using Response Surface Methodology*.
- Suteja, T. J., Evan, M., & Tjandra, S. (2022). the Effect of Thermal Annealing Between Glass Transition Temperature and Crystallization Temperature on Dimensional Accuracy of 3D Printed Part. *Media Mesin: Majalah Teknik Mesin*, 23(1), 36–43. <https://doi.org/10.23917/mesin.v23i1.16280>
- Suteja, T. J., Firmanto, H., Soesanti, A., & Christian, C. (2022). Properties Investigation of 3D Printed Continuous Pineapple Leaf Fiber-Reinforced PLA Composite. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 35(11), 2052–2061. <https://doi.org/10.1177/0892705720945371>
- Suteja, T. J., Handoko, R., & Soesanti, A. (2023). Optimization of Infill Density, Layer Height, and Shell Thickness to Achieve Maximum Bending Strength and Minimum Printing Time of PLA 3D Printed Part. *Polimesin*, 21(5), 1–5. <https://ejournal.pnl.ac.id/polimesin/article/view/3626/3230>
- Suteja, T. J., & Soesanti, A. (2020). Mechanical Properties of 3D Printed Polylactic Acid Product for Various Infill Design Parameters: A Review. *Journal of Physics: Conference Series*, 1569(4). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1569/4/042010>
- Tomaz, I., Gupta, M. K., & Pimenov, D. Y. (2021). Subtractive Manufacturing of Different Composites BT-Additive and Subtractive Manufacturing of Composites (S. Mavinkere Rangappa, M. K. Gupta, S. Siengchin, & Q. Song (Eds.); pp. 137–165). Springer Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-3184-9\\_6](https://doi.org/10.1007/978-981-16-3184-9_6)
- Viale, V., Stavridis, J., Salmi, A., Bondioli, F., & Saboori, A. (2022). Optimisation of Downskin Parameters to Produce Metallic Parts Via Laser Powder Bed Fusion Process: An Overview. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 123(7–8), 2159–2182. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10314-z>

- Vinod Kumar, S., Reddy, U., Nagpal, A., Kumar, A., Jayronia, S., & Hussien, R. A. (2024). Towards Sustainable Additive Manufacturing: Exploring Eco-Friendly Materials for Green 3D Printing. *E3S Web of Conferences*, 505. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202450501009>
- Wibisono, V., Suteja, T. J., & Firmanto, H. (2023). *The Effect of Infill Angle and Build Orientation on the Impact Strength and Production Time of Porous Infill Structure*. 6(1), 1–6.
- Wijayanto, S. E. Y., Handoko, R., Noel, J. C., Anggawirawan, T. W., & Suteja, T. J. (2022). Identifikasi Jenis Infill Pattern Pada Proses 3D Printing Yang Menghasilkan Hasil Cetak dengan Kekuatan Tekan dan Panjang Filamen Yang Optimal. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 13(2), 531–539. <https://doi.org/10.21776/jrm.v13i2.1097>
- Wong, K. C. (2016). 3D-Printed Patient-Specific Applications in Orthopedics. *Orthopedic Research and Reviews*, October, 57–66. <https://doaj.org/article/c88b18aa36c1468b9d19df6a646c9b96>
- Yeo, C., Park, C., & Mun, D. (2018). Development of a System to Convert a 3D Mesh Model in STL Format into OBJ Format. *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, 17(3), 78–86. <https://doi.org/10.14775/ksmpe.2018.17.3.078>
- Zhang, C., Bills, B. J., & Manicke, N. E. (2017). Rapid Prototyping Using 3D Printing in Bioanalytical Research. *Bioanalysis*, 9(4), 329–331. <https://doi.org/10.4155/bio-2016-0293>
- Zhang, M., Zhao, M., Jian, M., Wang, C., Yu, A., Yin, Z., Liang, X., Wang, H., Xia, K., Liang, X., Zhai, J., & Zhang, Y. (2019). Printable Smart Pattern for Multifunctional Energy-Management E-Textile. *Matter*, 1(1), 168–179. <https://doi.org/10.1016/j.matt.2019.02.003>

# GLOSARIUM

**3D Printing.** Proses *additive manufacturing* yang membentuk objek fisik dengan menambahkan material lapisan demi lapisan berdasarkan model tiga dimensi digital.

**Additive Manufacturing.** Teknologi manufaktur yang membuat objek dengan cara menambahkan material secara bertahap.

**Binder Jetting.** Teknologi *3D printing* yang menggunakan serbuk material dan cairan pengikat untuk mencetak lapisan demi lapisan.

**Cura.** Perangkat lunak *Slicer* yang digunakan untuk memproses model tiga dimensi menjadi instruksi cetak dalam format *G-Code*.

**Directed Energy Deposition.** Teknologi *3D printing* yang menggunakan sinar laser untuk melelehkan permukaan logam dan menyuntikkan bubuk logam ke area tersebut sesuai pola desain lapisan demi lapisan.

**Filamen.** Bahan cetak berupa kawat termoplastik yang digunakan dalam teknologi *3D printing* jenis *Fused Filament Fabrication* (FFF/FDM).

**FFF/FDM (*Fused Filament Fabrication/Fused Deposition Modeling*).** Teknologi *3D printing* berbasis ekstrusi material, di mana filamen dipanaskan, dilelehkan, dan diletakkan lapisan demi lapisan untuk membentuk objek.

**Finishing.** Proses akhir setelah pencetakan *3D printing* untuk memperbaiki permukaan, menghapus penyangga, atau meningkatkan kualitas hasil cetakan.

**G-Code.** Bahasa pemrograman yang digunakan oleh mesin *3D printer* untuk mengatur gerakan *nozzle*, suhu ekstruder, dan perintah lainnya.

**Infill Pattern (Pola Pengisian).** Pola pengisian material di dalam rongga cetakan hasil *3D printing*.

**Infill Density (Kerapatan Pengisian).** Tingkat kepadatan material di dalam rongga cetakan hasil *3D printing*.

**Isotropi.** Sifat material atau objek yang memiliki karakteristik mekanik yang sama di semua arah.

**Layer Height (Ketinggian Lapisan).** Ketebalan lapisan material yang dicetak pada setiap proses penambahan lapisan dalam *3D printing*.

**Material Extrusion.** Teknologi *3D printing* yang mengekstrusi material termoplastik melalui *nozzle* untuk membentuk objek.

**Material Jetting.** Teknologi *3D printing* yang memancarkan material cair secara selektif melalui *nozzle* yang kemudian disinari untuk mengeringkan lapisan demi lapisan sesuai pola desain

**Mesh.** Model tiga dimensi yang terdiri dari titik-titik dan poligon yang terhubung, membentuk permukaan dari objek digital.

**Nozzle.** Komponen pada *3D printer* yang mengekstrusi material dalam bentuk filamen untuk dicetak lapisan demi lapisan.

**Overhang.** Bagian desain atau hasil cetakan *3D printing* yang menggantung tanpa penopang dan memerlukan dukungan tambahan (*support*).

**Parameter Cetak.** Nilai-nilai yang dikonfigurasi dalam perangkat lunak *Slicer*, seperti ketinggian lapisan, kecepatan cetak, suhu, dan pola pengisian.

**Photopolymerization.** Proses pengerasan resin cair menggunakan cahaya ultraviolet pada teknologi *3D printing* seperti *stereolithography* (SLA).

**Purwarupa.** Model awal dari suatu produk yang dibuat untuk tujuan evaluasi desain dan fungsi sebelum produksi massal.

***Powder Bed Fusion.*** Teknologi *3D printing* yang menggunakan material berupa bubuk yang dipanaskan menggunakan sinar berenergi tinggi sesuai pola desain lapisan demi lapisan.

***Slicing.*** Proses memecah model tiga dimensi menjadi lapisan-lapisan tipis menggunakan perangkat lunak *Slicer* untuk menghasilkan *G-Code*.

***Slicer.*** Perangkat lunak yang digunakan untuk mengonversi model tiga dimensi menjadi instruksi cetak berupa *G-Code*.

***Support Structure (Penyangga).*** Struktur tambahan dalam pencetakan *3D printing* untuk mendukung bagian objek yang menggantung atau *overhang*.

***Warping.*** Cacat pada hasil cetakan *3D printing* yang berupa ujung atau bagian permukaan melengkung akibat pendinginan yang tidak merata.

***Vat Photopolymerization.*** Teknologi *3D printing* yang menggunakan resin cair yang dipadatkan dengan sinar.

# INDEKS

- 3D printing*, v, 4, 5, 6, 7, 12, 13, 14, 15, 18, 20, 24, 25, 35, 46, 49, 58, 60, 62, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 71, 72, 73, 74
- additive manufacturing*, 2, 4, 66
- akurasi, 12, 14, 17, 28, 42, 43
- aplikasi, v, 6, 53, 58, 59, 62
- brim*, 46
- diameter *nozzle*, 29, 31, 35, 36, 45
- FFF/FDM, 6, 7, 15, 16, 18, 25, 26, 28, 49, 50, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 62, 72
- filamen, 7, 12, 15, 16, 22, 25, 30, 35, 37, 38, 39, 41, 43, 46, 49, 51, 72, 73
- G-Code*, 21, 22, 72, 74
- isotropi, 14, 25
- kecepatan pencetakan, 35, 38, 42, 45
- kerapatan pengisian, 35, 37
- ketebalan lapisan, 9, 35, 41
- ketebalan perimeter, 35, 36
- kipas, 17, 23, 35, 45
- material, 1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 14, 15, 16, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 31, 37, 38, 39, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 56, 59, 60, 62, 64, 65, 69, 72, 73, 74
- nozzle*, 7, 9, 15, 16, 22, 23, 25, 26, 28, 30, 35, 36, 42, 43, 45, 47, 49, 72, 73
- orientasi, 21, 25, 26, 34, 39
- overhang*, 13, 74
- penyangga, 13, 15, 24, 25, 26, 28, 30, 34, 35, 41, 46, 72
- pola pengisian, 35, 38, 39, 73
- purwarupa, v, 1, 4, 5, 6, 13, 14, 18, 20, 25, 26, 27, 28, 29, 36, 37, 38, 42, 43, 46, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 56, 57, 58, 59, 62
- raster, 25, 39, 46
- skirt*, 46
- slicer*, 21, 34, 72, 73, 74
- slicing*, 20, 21, 74
- sudut pengisian, 35, 39
- temperatur ekstruder, 35, 43, 44
- temperatur meja cetak, 35, 44

## PROFIL PENULIS

The Jaya Suteja adalah seorang tenaga pendidik di Program Studi Teknik Mesin, Universitas Surabaya dengan latar belakang di bidang Teknik Mesin dengan gelar Doktor dari Queensland University of Technology, gelar Master dari Delft University of Technology, dan gelar Sarjana dari Universitas Kristen Petra.

Sejak tahun 1999, mengajar beberapa mata kuliah terkait perancangan dan pengembangan produk rekayasa seperti Desain Produk, Analisis dan Pengembangan Mekanisme, dan *Design Project*. Selain mengajar, juga aktif terlibat dalam penelitian dan telah mendapatkan berbagai dana hibah penelitian dari Universitas Surabaya dan institusi lainnya. Mempunyai catatan publikasi di jurnal nasional maupun internasional bereputasi dan saat ini fokus di peta jalan penelitian terkait *3D printing*.

Komitmen untuk melakukan pengabdian pada masyarakat terlihat dari keterlibatannya dalam memberdayakan berbagai individu maupun institusi terkait teknologi *3D printing*. Selain itu, terlibat dalam berbagai kolaborasi dengan industri untuk mengembangkan berbagai produk mulai dari alat tulis, peralatan rumah tangga, hingga alat transportasi.

# Strategi Desain dan Proses Pembuatan Purwarupa dengan **3D Printing**

Persaingan industri manufaktur menjadikan teknologi terus menerus dikembangkan. Salah satu teknologi tersebut adalah *prototyping* atau pembuatan purwarupa. Purwarupa ini dibutuhkan agar pengembang produk bisa memvisualisasikan ide dalam bentuk fisik sebelum memasuki tahap produksi massal. Purwarupa harus dibuat dalam waktu cepat untuk memotong biaya pengembangan maupun waktu peluncuran produk ke pasar. Pembuatan purwarupa dapat dilakukan dalam dengan menggunakan berbagai macam material dan proses. Buku ***Strategi Desain dan Proses Pembuatan Purwarupa dengan 3D Printing*** ini lebih lengkap mengulas dasar-dasar *3D printing*, panduan desain, panduan proses, dan aplikasi nyata dalam pembuatan purwarupa di berbagai sektor industri.

**Penerbit Deepublish (CV BUDI UTAMA)**

Jl. Kaliurang Km 9,3 Yogyakarta 55581

Telp/Fax : (0274) 4533427

Anggota IKAPI (076/DIY/2012)

✉ [cs@deepublish.co.id](mailto:cs@deepublish.co.id)

📘 Penerbit Deepublish

📱 @penerbitbuku\_deepublish

🌐 [www.penerbitdeepublish.com](http://www.penerbitdeepublish.com)



Kategori : Teknik

ISBN 978-623-02-9951-3



9

786230

299513