

**ANALISIS KUALITAS CETAK PRODUK *FUSED DEPOSITION*
MODELING 3D PRINTING MENGGUNAKAN *POLYLACTIC*
ACID DAN *ACRYLONITRILE BUTADIENE STYRENE***

*Analysis of Print Quality of Fused Deposition Modeling 3D Printing
Product Using Polylactic Acid and Acrylonitrile
Butadiene Styrene*

NURHIDAYANTI

D022211005



**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK MESIN
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**

PENGAJUAN TESIS

**ANALISIS KUALITAS CETAK PRODUK *FUSED DEPOSITION*
MODELING 3D PRINTING MENGGUNAKAN *POLYLACTIC*
ACID DAN *ACRYLONITRILE BUTADIENE STYRENE***

Tesis

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gear Magister
Program Studi Teknik Mesin

Disusun dan diajukan oleh

NURHIDAYANTI

D022211005

Kepada

PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK MESIN

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

GOWA

2023

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISIS KUALITAS CETAK PRODUK *FUSED DEPOSITION MODELING 3D PRINTING* MENGGUNAKAN *POLYLACTIC ACID* DAN *ACRYLONITRILE BUTADIENE STYRENE*

Disusun dan diajukan oleh

NURHIDAYANTI

D022211005

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi Program Magister Program Studi Teknik Mesin

Fakultas Teknik

Universitas Hasanuddin

pada tanggal 22 Agustus 2023

dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui
Komisi Penasehat,

Pembimbing Utama



Dr. Eng. Lukmanul Hakim Arma, ST., MT
NIP. 197404151999031001

Pembimbing Pendamping



Dr. Eng. Andi Amijoyo Mochtar, ST., M.Sc
NIP. 197602162010121002

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin



Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli,
ST.,MT.,IPM.,ASEAN. Eng
NIP. 19730926 200012 1 002

Ketua Program Studi
Magister Teknik Mesin



Dr. Eng. Novriany Amaliyah, ST., MT
NIP. 19791112 200812 2 002

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Nurhidayanti
Nomor mahasiswa : D022211005
Program studi : S2 Teknik Mesin

Dengan ini menyatakan bahwa, tesis berjudul "*Analisis Kualitas Cetak Produk Fused Deposition Modeling 3D Printing Menggunakan Polylactic Acid dan Acrylonitrile Butadiene Styrene*" adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing (Dr. Eng. Lukmanul Hakim Arma, ST., MT selaku Pembimbing Utama dan Dr. Eng. Andi Amijoyo Mochtar, ST., M.Sc selaku Pembimbing Pendamping). Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apapun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka tesis ini. Sebagian dari isi tesis ini telah dipublikasikan di Jurnal/Prosiding (*AIP Conference Publishing*) sebagai artikel dengan judul "*Simulation Static Stress of 3D Printed Propeller FDM 3D Printing with Solidworks using PLA and ABS*".

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya berupa tesis ini kepada Universitas Hasanuddin.

Gowa, 22 Agustus 2023



Nurhidayanti

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas rahmatnya sehingga tesis ini dapat diselesaikan.

Gagasan utama Analisis Kualitas Cetak Produk *Fused Deposition Modeling 3D Printing* Menggunakan *Polylactic Acid* dan *Acrylonitrile Butadiene Styrene* yang diharapkan selanjutnya bisa diterapkan di sektor industri manufaktur untuk mendapatkan mutu kualitas produk dengan memanfaatkan teknologi industri 4.0

Bukan hal yang mudah untuk mewujudkan gagasan-gagasan tersebut dalam sebuah susunan tesis, berkat bimbingan, arahan dan motivasi berbagai pihak maka tesis ini bisa disusun sebagaimana kaidah-kaidah yang diprasyaratkan, dan untuk itu penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. Eng. Lukmanul Hakim Arma, ST., MT sebagai Pembimbing Utama yang selama ini senantiasa memberikan bimbingan dan arahan sampai terselesaikannya tesis ini.
2. Bapak Dr. Eng. Andi Amijoyo Mochtar. ST., M.Sc sebagai Pembimbing Pendamping senantiasa memberikan bimbingan dan motivasi sampai terselesaikannya tesis ini.
3. Bapak Dr. Hairul Arsyad, ST., MT., Dr. Muhammad Syahid, ST., MT., dan Fauzan, ST., MT., Ph.D sebagai komisi Tim Penguji atas waktu yang diberikan serta segala saran yang bermanfaat dalam penyusunan penulisan tesis ini.
4. Bapak Prof. Dr. Ir. Jamaluddin Jompa, M.Sc sebagai Rektor Universitas Hasanuddin.
5. Bapak Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, ST., MT., IPM., ASEAN. Eng sebagai Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
6. Ibu Dr. Eng. Novriany Amaliyah, ST., MT sebagai Ketua Program Studi Magister Jurusan Teknik Mesin Universitas Hasanuddin.
7. Bapak Dr. Eng. Lukmanul Hakim Arma, ST., MT yang telah mengizinkan untuk melaksanakan dan menggunakan fasilitas dan peralatan di Laboratorium Metalurgi Fisik Universitas Hasanuddin.
8. Bapak Rusdi Nur, S.ST., M.T., Ph.D sebagai Wakil Direktur I atas bantuan menggunakan fasilitas dan peralatan di Laboratorium Mekanik Politeknik

Negeri Ujung Pandang Makassar.

9. Seluruh staf pengajar/dosen pada Program Studi Magister Teknik Mesin Universitas Hasanuddin.

Akhirnya, kepada kedua orang tua tercinta saya mengucapkan terima kasih dan sembah sujud atas doa, pengorbanan dan motivasi mereka selama saya menempuh pendidikan. Penghargaan yang besar juga saya sampaikan kepada Nurdiansya, M.Mar.E., Nursan S.ST.Pel., dan Nurdiyanti S.Ak sebagai saudara saya atas motivasi dan dukungan yang tak ternilai.

Gowa, 22 Agustus 2023

Penulis

Nurhidayanti

ABSTRAK

NURHIDAYANTI. Analisis Kualitas Cetak Produk *Fused Deposition Modeling 3D printing* Menggunakan *Polylactic Acid* dan *Acrylonitrile Butadiene Styrene* (dibimbing oleh **Lukmanul Hakim Arma, Andi Amijoyo Mochtar**)

Teknologi *Fused Deposition Modeling* (FDM) *3D printing* menjadi revolusi digital yang memajukan sektor industri dengan fabrikasi berbasis adiktif manufaktur mampu memvisualisasikan desain menjadi produk fisik yang memiliki performa fungsional dan kualitas dari produk yang dihasilkan. Penerapan FDM memberikan kemudahan para *engineering* menciptakan produk dengan geometri yang lebih kompleks dibandingkan metode konvensional, selain mampu meningkatkan ketepatan dimensi dan efisiensi waktu proses. Namun, FDM terdapat keterbatasan pada indikator kualitas cetak produk, seperti tekstur kekasaran permukaan, *voids* yang terbentuk, dan kerusakan morfologi permukaan hal ini ketidaksesuaian pemilihan parameter proses. Penelitian ini berfokus menganalisis indikator kualitas produk cetak *propeller* terhadap kekasaran permukaan pada parameter proses *layer thickness* (0.1 mm; 0.2 mm; 0.3 mm) dan *infill density* (60%; 80%; 100%) menggunakan material polimer berbeda yaitu PLA dan ABS. Pengujian menggunakan Laser Scanning Microscope LEXT OLYMPUS-OLS4100 Metode Gaussian Filter *cut off* 800 μm dan 25 μm pada dua titik permukaan dengan lima kali replikasi dan validasi statistik Metode *Taguchi* dengan *orthogonal array* $L_9(3^2)$. Performa kekasaran permukaan yang optimum dari kedua material *cut off* 800 μm adalah parameter *layer thickness* 0.1 mm diperoleh 24.450 μm dibandingkan dengan *layer thickness* 0.2 mm didapatkan 28.811 μm dan *layer thickness* 0.3 mm terjadi peningkatan kekasaran sebesar 30.582 μm . Sedangkan *cut off* 25 μm tingkat kekasaran filamen yang keluar dari *tip nozzle* memiliki nilai kekasaran yang hampir sama. Sementara untuk parameter *infill density* persentase tertinggi 100% mempunyai kekuatan produk yang optimum karena kerapatan yang terbentuk dalam produk lebih baik sehingga mengurangi terjadinya *voids*. Berdasarkan analisis, proses FDM *3D printing* merekomendasikan ABS dibandingkan PLA sebab kekasaran permukaan ABS lebih stabil meskipun dengan tingkat *layer thickness* yang berbeda.

Kata kunci: FDM *3D printing*, *Roughness*, *Layer thickness*, *Infill density*

ABSTRACT

NURHIDAYANTI. *Analysis of Print Quality of Fused Deposition Modeling 3D Printing Product Using Polylactic Acid and Acrylonitrile Butadiene Styrene* (supervised by **Lukmanul Hakim Arma, Andi Amijoyo Mochtar**)

Fused Deposition Modeling (FDM) 3D printing technology is a digital revolution that advances the industrial sector with additive manufacturing-based fabrication capable of visualizing designs into physical products that have functional performance and product quality. The application of FDM makes it easy for *engineers* to create products with more complex geometries than conventional methods, besides being able to improve dimensional accuracy and process time efficiency. However, FDM has limitations on product print quality indicators, such as surface roughness texture, formed *voids*, and damage to surface morphology, this is due to inappropriate selection of process parameters. This study analyzes *propeller* printed products quality indicators for surface roughness in the process parameters of *layer thickness* (0.1 mm; 0.2 mm; 0.3 mm) and *infill density* (60%; 80%; 100%) using different polymer materials, namely PLA and ABS. Testing using the LEXT OLYMPUS-OLS4100 Laser Scanning Microscope Gaussian Filter method *cut off* 800 μm and 25 μm on two surface points with five times replication and statistical validation Taguchi method with *orthogonal array* $L_9 (3^2)$. The optimum surface roughness performance of the two materials *cut off* 800 μm is the parameter *layer thickness* of 0.1 mm obtained 24.450 μm compared to *the layer a thickness* of 0.2 mm obtained 28.811 μm and *a layer thickness* of 0.3 mm resulted in an increase in roughness of 30.582 μm . While the 25 μm *cut off* roughness level of the filament coming out of *the nozzle tip* has almost the same roughness value. Meanwhile, for the *infill density* parameter, the highest percentage of 100% has optimum product strength because the density formed in the product is better, there by reducing the occurrence of *voids*. Based on the analysis, the FDM *3D printing* process recommends ABS over PLA because the surface roughness of ABS is more stable even with different *layer thickness* levels.

Keywords: FDM *3D printing*, *Roughness*, *Layer thickness*, *Infill density*

DAFTAR ISI

	<u>Halaman</u>
HALAMAN JUDUL	i
PENGAJUAN TESIS.....	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS	iv
KATA PENGANTAR.....	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xvii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
I.1 Latar Belakang.....	1
I.2 Rumusan Masalah	6
I.3 Tujuan Penelitian.....	6
I.4 Manfaat Penelitian.....	7
I.5 Ruang Lingkup Penelitian	7
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	9
II.1 Penelitian Terdahulu.....	9
II.2 <i>Propeller</i>	12
II.2.1 Komponen <i>Propeller</i>	12
II.2.2 Faktor Kinerja <i>Propeller</i>	13
II.2.3 Tipe-Tipe <i>Propeller</i>	14
II.3 <i>Rapid Prototyping</i>	20

II.4	<i>Fused Deposition Modeling</i>	22
II.5	<i>3D Printing</i>	24
II.6	Solidworks	31
II.7	Ultimaker Cura <i>Slicer</i>	32
II.8	Polimer	33
II.8.1	<i>Polylactic Acid</i>	35
II.8.2	<i>Acrylonitrile Butadiene Styrene</i>	37
II.9	Kekasaran Permukaan (<i>Surface Roughness</i>)	38
II.10	<i>Design of Experiment</i>	40
II.11	Taguchi's <i>Method</i>	41
BAB III METODOLOGI PENELITIAN		43
III.1	Lokasi dan Waktu Penelitian	43
III.2	Diagram Alir Rancangan Penelitian	43
III.3	Spesifikasi Alat dan Bahan	47
III.3.1	Alat	47
III.3.2	Bahan	51
III.3.3	Perangkat Lunak Perancangan	53
III.4	<i>Pre-Processor</i>	53
III.5	<i>Processor</i>	55
III.6	<i>Post-Processor</i>	59
III.6.1	Pengukuran <i>Roughness</i>	59
III.6.2	Tahapan Pengambilan Morfologi	60
III.6.3	Pengukuran <i>Dimensional Layer</i>	61
III.7	Rancangan Percobaan	62
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		64
IV.1	<i>Static Structural Simulation</i>	64

IV.2 <i>Fluids Dynamics Simulation</i>	68
IV.3 Hasil Cetak <i>Propeller</i>	72
IV.4 Analisis <i>Roughness</i>	75
IV.4.1 <i>Roughness Cut off 800µm</i>	76
IV.4.2 <i>Roughness Cut off 25µm</i>	82
IV.5 Analisis Optimum Metode <i>Taguchi</i>	87
IV.5.1 <i>Signal to Noise Ratio ABS</i>	87
IV.5.2 <i>Signal to Noise Ratio PLA</i>	89
IV.6 Morfologi Cacat Permukaan Hasil Cetak <i>Propeller</i>	94
IV.7 Hasil Pengukuran <i>Dimensional Layer Filamen</i>	96
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	100
V.1 Kesimpulan.....	100
V.2 Saran	101
DAFTAR PUSTAKA	102
LAMPIRAN.....	111

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Nilai kekasaran <i>additive manufacturing process</i>	40
Tabel 2. <i>Technical properties 3D printing Anycubic i3 Mega 3D Drucker</i>	47
Tabel 3. <i>Material properties eSUN ABS</i>	51
Tabel 4. <i>Material properties eSUN PLA</i>	52
Tabel 5. Parameter kondisi fluida.....	55
Tabel 6. Parameter proses konstan FDM 3D printing.....	57
Tabel 7. Parameter proses dan pengaturan level	57
Tabel 8. Rancangan Eksperimen Matriks Orthogonal array L ₉	63
Tabel 9. Hasil simulasi <i>Static Analysis</i> pada desain produk <i>propeller</i>	68
Tabel 10. Hasil simulasi <i>Computational Fluids Dynamics</i>	71
Tabel 11. Rata-rata nilai kekasaran-Ra pada ABS <i>cut off</i> 800µm.....	77
Tabel 12. Rata-rata nilai kekasaran-Ra pada PLA <i>cut off</i> 800µm.....	79
Tabel 13. Rata-rata nilai kekasaran-Ra pada ABS <i>cut off</i> 25µm.....	83
Tabel 14. Rata-rata nilai kekasaran-Ra pada PLA <i>cut off</i> 25µm.....	85
Tabel 15. <i>Response signal to noise smaller is better</i> pada ABS	88
Tabel 16. <i>Response signal to noise smaller is better</i> pada PLA.....	90
Tabel 17. Hasil pengukuran ketepatan <i>dimensional layer thickness</i> pada ABS.....	96
Tabel 18. Hasil pengukuran ketepatan <i>dimensional layer thickness</i> pada ABS.....	98

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Komponen propeller (Gerr, 2018)	12
Gambar 2. Azimuth Propeller (Carlton, 2019)	17
Gambar 3. Tandem Propeller (Carlton, 2019)	17
Gambar 4. Overlapping Propeller (Carlton, 2019)	18
Gambar 5. Controllable Pitch Propeller (Carlton, 2019)	19
Gambar 6. APC UAV Propeller (Alfaridzi & Kurniawan, 2022)	20
Gambar 7. Siklus RP dimulai dengan desain CAD (Chua and Leong, 2014)	20
Gambar 8. Proses fused deposition modeling	22
Gambar 9. Ilustrasi proses didalam heated nozzle	23
Gambar 10. Mesin 3D printing	25
Gambar 11. Skema terjadinya warping di bagian samping pada FDM	25
Gambar 12. Ilustrasi proses additive manufacturing	26
Gambar 13. 3D printer cartesian (Redwood et al., 2017)	27
Gambar 14. 3D printer delta (Redwood et al., 2017)	27
Gambar 15. 3D printer polar (Redwood et al., 2017)	28
Gambar 16. Representasi build orientation (Feng et al., 2019)	29
Gambar 17. Ilustrasi parameter infill density (Tao et al., 2021)	29
Gambar 18. Ilustrasi proses terbentuknya parameter layer thickness	30
Gambar 19. Ilustrasi terbentuknya beads layer (Carneiro et al., 2015)	30
Gambar 20. Solidworks	31
Gambar 21. Proses perkembangan Solidworks (Mulyana. Wira, 2016)	31
Gambar 22. Ultimaker Cura	32
Gambar 23. Perkembangan polimer	33
Gambar 24. Diagram klasifikasi polimer	34
Gambar 25. Perbedaan bahan polimer yang digunakan AM	35
Gambar 26. Siklus produksi PLA di alam	36
Gambar 27. Skema produksi PLA	36
Gambar 28. Monomer ABS	37
Gambar 29. Grafik Profil Permukaan (Riyanto Rio, 2016)	39
Gambar 30. Illustration Arithmetical mean height	39
Gambar 31. Surface roughness data for fused deposition modeling	40

Gambar 32. Diagram alir rancangan penelitian.....	45
Gambar 33. Diagram alir proses 3D printing	46
Gambar 34. Representasi pengaplikasian mesin 3D printing.....	47
Gambar 35. LEXT OLYMPUS-OLS4100	48
Gambar 36. Portable LCD Digital Microscope (G1200)	48
Gambar 37. Ruler Microscope Micrometer Calibration Ruler.....	49
Gambar 38. Cutter	49
Gambar 39. Tang pemotong filamen.....	49
Gambar 40. Spatula stainless steel	50
Gambar 41. SD card	50
Gambar 42. Steel ruler.....	50
Gambar 43. Filamen ABS	51
Gambar 44. Filamen PLA.....	52
Gambar 45. Alkohol	53
Gambar 46. Desain <i>Propeller</i> dengan 7 blade (a) dimensional <i>propeller</i> PLA; (b) dimensional <i>propeller</i> ABS; (c) desain 3D bagian <i>propeller</i>	54
Gambar 47. Pengaturan Build Orientation	56
Gambar 48. Ilustrasi hasil slicing <i>propeller</i>	57
Gambar 49. Posisi pemasangan filamen pada dudukan	58
Gambar 50. Pengukuran pada hasil cetak <i>propeller</i>	59
Gambar 51. Pengukuran dimensi pada <i>blade propeller</i>	59
Gambar 52. Skema titik pengukuran kekasaran-Ra	60
Gambar 53. Skema pengambilan morfologi permukaan di setiap titik	61
Gambar 54. Contoh teknik pengukuran layer thickness pada geometri	62
Gambar 55. Tampilan hasil pengukuran ImageJ	62
Gambar 56 Tampilan <i>propeller</i> menggunakan standard mesh PLA-ABS	65
Gambar 57 Simulasi static structural design <i>propeller</i> material PLA	66
Gambar 58. Simulasi static structural design <i>propeller</i> material ABS.....	67
Gambar 59. (a) Desain <i>propeller</i> 7 blades; (b) Flow trajectories dengan 240 rpm	69
Gambar 60. Flow trajectories dengan 5000 rpm	70
Gambar 61. Skema proses FDM pada pencetakan produk <i>propeller</i>	72
Gambar 62. Pencetakan secara tertutup pada ABS	73

Gambar 63. Terbentuknya warping pada proses ABS secara terbuka	73
Gambar 64. Pencetakan secara terbuka pada PLA	74
Gambar 65. Tahapan proses pencetakan pada propeller (Dimensional 3D model, Stereolithography file, Transfer file to slicer Ultimaker Cura, Parameters process setup, Material PLA, Build product geometry; Printed product).....	75
Gambar 66. Grafik roughness-Ra ABS top point (ujung-1) cut off 800 μ m.....	77
Gambar 67. Grafik roughness-Ra ABS bottom point (ujung-3) cut off 800 μ m	78
Gambar 68. Grafik roughness-Ra PLA top point (ujung-1) cut off 800 μ m.....	80
Gambar 69. Grafik roughness-Ra PLA bottom point (ujung-3) cut off 800 μ m.....	81
Gambar 70. Grafik roughness-Ra ABS top point (ujung-1) cut off 25 μ m.....	83
Gambar 71. Grafik roughness-Ra ABS bottom point (ujung-3) cut off 25 μ m	84
Gambar 72. Grafik roughness-Ra PLA top point (ujung-1) cut off 25 μ m.....	85
Gambar 73. Grafik roughness-Ra PLA bottom point (ujung-3) cut off 25 μ m.....	86
Gambar 74. Plot Data Means ABS	88
Gambar 75. Plot S/N ratio ABS.....	88
Gambar 76. Plot Data Means PLA	89
Gambar 77. Plot S/N ratio PLA.....	89
Gambar 78. Hasil foto morfologi ABS titik permukaan (a) titik pangkal; (b) titik tengah; (c) titik ujung pada LT 0.1 mm ID 80%	91
Gambar 79. Hasil foto morfologi PLA titik permukaan (a) titik pangkal; (b) titik tengah; (c) titik ujung pada LT 0.1 mm ID 100%	93
Gambar 80. Permukaan void dengan LT 0.3 mm ID 100%-B	94
Gambar 81 Permukaan voids dengan LT 0.1 mm ID 60%-B	95
Gambar 82. Hasil pengukuran <i>layer thickness</i> 0.1 mm ABS	96
Gambar 83. Hasil pengukuran <i>layer thickness</i> 0.1 mm ABS	97
Gambar 84. Hasil pengukuran <i>layer thickness</i> 0.3 mm ABS	97
Gambar 85. Hasil pengukuran <i>layer thickness</i> 0.1 mm PLA	98
Gambar 86. Hasil pengukuran <i>layer thickness</i> 0.2 mm PLA	98
Gambar 87. Hasil pengukuran <i>layer thickness</i> 0.3 mm PLA	99

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Konsep <i>2D Drawing Propeller</i>	112
Lampiran 2. Konsep <i>2D Drawing Blade</i>	113
Lampiran 3. Proses Pencetakan Desain Produk pada PLA.....	114
Lampiran 4. Proses Pencetakan Desain Produk ABS.....	115
Lampiran 5. Data Waktu Pencetakan Material PLA.....	116
Lampiran 6. Data Waktu Pencetakan Material ABS.....	116
Lampiran 7. Dokumentasi Penelitian.....	117
Lampiran 8. Data Pengujian <i>Roughness Cut off 800 μm-ABS</i>	119
Lampiran 9. Data Pengujian <i>Roughness Cut off 800 μm-PLA</i>	121
Lampiran 10. Data Pengujian Kekasaran <i>Cut off 25 μm-ABS</i>	123
Lampiran 11. Data Pengujian <i>Roughness Cut off 25 μm-PLA</i>	125
Lampiran 12. Grafik Hasil Kekasaran Permukaan ABS <i>Cut off 800μm</i>	127
Lampiran 13. Grafik Hasil Kekasaran Permukaan PLA <i>Cut off 800μm</i>	128
Lampiran 14. Grafik Hasil Kekasaran Permukaan ABS <i>Cut off 25 μm</i>	129
Lampiran 15. Grafik Hasil Kekasaran Permukaan PLA <i>Cut off 25 μm</i>	130
Lampiran 16. Hasil Foto <i>Morphology</i> Permukaan ABS.....	131
Lampiran 17. Hasil Foto <i>Morphology</i> Permukaan PLA.....	137
Lampiran 18. Hasil Pengukuran <i>Dimensional Layer Image-J</i>	143

BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

3D printing (three-dimensional) merupakan mesin yang revolusioner pada teknik *additive manufacturing* (AM) dengan membuat objek tiga dimensi terhadap struktur yang beragam. Metode *additive manufacturing* kini diaplikasikan menjadi beberapa bagian yakni *Fused Deposition Modeling* (FDM); *StereoLithography Apparatus* (SLA); *Continuous Liquid Interface Production* (CLIP); *Digital Light Processing*; *Selective Laser Sintering* (SLS); dan *Laminated Object Manufacturing* (LOM) (Carneiro et al., 2015). Kemajuan teknologi *3D printing* saat ini berhubungan erat dengan berkembangnya berbagai pemodelan desain tiga dimensi yang akan menghasilkan objek nyata.

Metode *3D printing* dikenalkan sebagai media teknologi *additive manufacturing* dimana proses pencetakan objek tiga dimensi dibuat dengan meletakkan lapisan material secara lapis demi lapis. Pada proses mendesain mencakup tiga masalah yang saling terkait yaitu; pemilihan bahan, pemilihan geometri desain dan penentuan proses manufaktur (Harpool, 2016). Perkembangan *additive manufacturing* (AM) menjadi terobosan inovasi dalam sektor industri yang diperkenalkan oleh Charles Hull tahun 1980 (Lengua, 2017; Ngo et al., 2018), kini dikomersialkan Stratasys oleh Scott Crump dengan mengembangkan salah satu teknik manufaktur adiktif yaitu metode *Fused Deposition Modeling* (FDM) (Weng et al., 2016). Teknologi pencetakan FDM *3D printing* kini implementasinya semakin meluas yakni di lingkup media perawatan kesehatan, otomotif, kedirgantaraan, dan arsitektur (Aslani et al., 2020; Shahrubudin et al., 2019).

Teknologi pencetakan *3D* ini menjadi teknologi serbaguna yang akan memberikan nilai fungsional dan peluang pada perusahaan industri yang akan meningkatkan efisiensi proses manufaktur dengan metode pengaplikasiannya yang mudah, mengurangi biaya, material ramah lingkungan serta mampu meningkatkan performa pengembangan berbagai produk prototipe yang lebih kompleks. Manufaktur aditif menyederhanakan proses produksi objek *3D*

kompleks langsung dari data digital *Computer Aided Design* (CAD) yang membutuhkan analisis yang detail terhadap bagian geometri, bagaimana prinsip kerja mesin manufaktur adiktif dan pemilihan material yang akan digunakan untuk menghasilkan objek (Gibson et al., 2015).

Teknologi digital desain *Computer Aided Design* (CAD) dengan bantuan media komputer membawa kemajuan pesat pada proses manufaktur konvensional, dimana pekerjaannya membutuhkan waktu yang tidak efektif dan kesulitan mendapatkan hasil produk yang tepat (Jeong et al., 2018). Perkembangan FDM *3D printing* mengikuti kemajuan pengaplikasian perangkat lunak teknik desain yang bertujuan untuk membuat objek produk tiga dimensi. Perangkat lunak yang umum digunakan untuk mendesain objek tiga dimensi sebelum dicetak menggunakan *3D printing* adalah Solidwork dan Autodesk Inventor (Pambudi, 2017). Program desain Solidworks menjadi program pengaplikasian gambar yang berfungsi sebagai pemodelan dan simulasi analisis secara numerik statik yang menjadikan solusi pada engineer dalam memecahkan masalah dengan tingkat kerumitan geometri desain yang kompleks.

Teknologi *Fused Deposition Modeling* (FDM) *3D printing* berproses secara *layering bottom up* ketika proses pencetakan berlangsung. Berdasarkan metode pencetakannya, pengaplikasian FDM *3D printing* mempunyai karakteristik sifat mekanik yang tidak jauh berbeda dibandingkan dengan proses *injection moulding* sebab adanya penyimpangan hasil objek cetak pada setiap lapisan serta terjadi penyusutan (*shrinkage*) pada material saat proses pendinginan, hal itu karena fluktuasi pada temperatur nozel yang akan berdampak pada hasil performa permukaan objek (Narang and Chhabra, 2017). Meski demikian, teknologi *3D printing* ini memiliki keunggulan terhadap ketersediaan material yang mudah dan murah; kemampuan waktu produksi yang efisien; dan kemampuan mengurangi terjadinya kerusakan produksi pada produk dibandingkan metode prototipe lainnya (Chaidas et al., 2016; Dwiyati et al., 2019; Luis Pérez, 2002)

Teknologi FDM memudahkan para *engineering* dalam memvisualisasikan desain yang nyata dari produk, sebab faktor ketepatan dimensi dan performa fungsional produk menjadi peranan penting untuk meningkatkan indikator kualitas produk. Teknologi ini memanfaatkan perangkat lunak *slicer* dengan

mendapatkan program *g.code* yang akan dibaca oleh mesin *3D printing* dengan prinsip kerja penambahan material setiap lapisan (Kang et al., 2020). Kemajuan FDM *3D printing* kini sudah menggunakan material yang beragam seperti polimer, keramik, logam hingga komposit yang mampu mengubah material padat menjadi cair (*molten*) (Wickramasinghe et al., 2020). Namun, dalam proses FDM *3D printing* merekomendasikan menggunakan material termoplastik, karena sifat material yang fleksibilitas, tahan korosi, tidak mengandung unsur beracun, dan kemampuan untuk menghasilkan produk geometri yang sangat kompleks yang tepat (Galetto et al., 2021), seperti pada material termoplastik *Acrylonitrile Butadiene Styrene* (ABS), *Polycarbonate* (PC), *Polystyrene*, *Nylon*, *Polylactic Acid* (PLA), dan *Polyethylene Terephthalate Glycol* (PETG) karena sifat yang dimiliki material plastik mudah mengalami pemanasan dengan temperatur yang rendah sekitar 300°C (Alsoufi and Elsayed, 2017; Prayoga and Puspitasari, 2021).

Polylactic Acid (PLA) merupakan material termoplastik *semi-crystalline* yang dikenal sebagai material *biodegradable* yang mudah terurai dengan lingkungan (Peterson, 2019; Suteja and Soesanti, 2020). Sementara *Acrylonitrile Butadiene Styrene* (ABS) tergolong material *amorphous* yang terdiri dari monomer akrilonitril, butadiena dan stirena sehingga kemampuan kekuatan dan keuletan yang tinggi terhadap benturan, sinar ultraviolet dan ketahanan terhadap senyawa kimia (Cole et al., 2016). Selain karena faktor pemilihan bahan, pemodelan geometri desain menjadi pertimbangan terhadap indikator kualitas cetak produk yang dihasilkan dalam fabrikasi proses FDM sebab akan berdampak pada nilai fungsional produk.

Fused Deposition Modeling menjadi media pembuatan prototipe cepat, namun ternyata metode ini terdapat keterbatasan terhadap kualitas cetak yang dihasilkan, misal terjadinya *warping* pada *platform/bed printer*; terbentuknya tekstur kekasaran permukaan akibat pengendapan material pada lapisan yang diekstrusi oleh nozel adanya tekanan dan perpindahan kepala nozel; keterbatasan toleransi bagian produk; terbentuknya kecacatan berupa *void* sebab kemampuan rekat ikatan antar lapisan yang lemah sehingga mengakibatkan kerusakan tribologi permukaan pada produk hal ini tentu mencakup lingkup proses produksi dimana mencakup pemilihan parameter proses; material dan geometri produk cetak.

Alsoufi & Elsayed, (2018) telah melakukan investigasi terhadap kualitas kekasaran permukaan (*surface roughness*) dan keakuratan dimensi (*dimensional accuracy*) produk dari hasil cetak *3D printing* dengan kerapatan pengisi (*infill density*) sebesar 100% menggunakan material polimer PLA; PLA+; ABS dan ABS+ dengan hasil yang diperoleh secara eksperimental bahwa material polimer termoplastik PLA+ menunjukkan permukaan yang sangat halus dan lebih akurat sementara material tergolong ABS menunjukkan nilai kekasaran permukaan (*surface roughness*) yang tinggi dan bergelombang. Selanjutnya peneliti Taufik et al., (2020) mengembangkan dengan melakukan riset terhadap nilai kekasaran permukaan (*surface roughness*) pada produk yang dibuat menggunakan *3D printing* dimana penelitiannya memvariasikan parameter *printing speed* dengan nilai kecepatan 50 mm/s; 100 mm/s, dan 150 mm/s dengan nilai rata-rata hasil pengukuran *surface roughness* (Ra) cenderung mengalami peningkatan dengan mengartikan bahwa permukaan semakin kasar apabila nilai *printing speed* semakin ditingkatkan.

Dalam proses FDM *3D printing* tentu terdapat berbagai variabel dan parameter yang akan mempengaruhi tingkat ketelitian dan hasil kualitas objek tiga dimensi dengan tujuan mendapatkan rancangan desain yang diharapkan. Variabel tersebut diantaranya adalah tipe printer yang digunakan, kapasitas dimensi objek yang akan dicetak, pemilihan material filamen yang digunakan; dan *licer 3D printing* (mencakup pengaturan nilai *travel speed*, *print speed*; *wall thickness*; *layer thickness*; *infill pattern*; *infill density*; *temperature*, *support*; *diameter nozzle*; *fan speed*; dan seterusnya). Fadhil Alani et al., (2017) melakukan eksperimental terhadap pengaruh densitas pengisi (*infill density*) dengan material yang diuji adalah asam polilaktat (PLA) dengan memvariasikan kepadatan pengisi yang berbeda (20%, 35%, 50%, 65% dan 80%) hasil penelitian dinyatakan bahwa kekuatan tekan (*compressive strength*) maksimum terhadap material PLA adalah 30 MPa dengan kepadatan pengisi 80% dan semakin kecil kepadatan pengisi (*infill density*) yang diberikan maka waktu pencetakan lebih efisien dan menghemat material yang digunakan dalam mencetak. Selanjutnya Seol et al., (2018) melakukan penelitian terhadap kerapatan pengisi (*infill density*) dengan memvariasikan nilainya yaitu 25%; 50% 75% dan 100% menggunakan bantuan

program *slicer 3DWox* dengan material PLA dari penelitian masih terdapat kelemahan karena tidak menambahkan material lain sebagai pembanding untuk mengetahui *properties* mekanik dan tingkat kualitas hasil cetaknya. Pemilihan *infill density* dilihat dari aspek penerapannya, karena semakin tinggi *infill density* maka semakin padat dan kuat produk, namun akan semakin banyak material dan waktu yang dibutuhkan untuk mencetak (Laricha et al., 2020).

Kondisi yang sangat berpengaruh lainnya terhadap kualitas produk hasil cetak *3D printing* adalah pemilihan ketebalan lapisan (*layer thickness*) dimana jika semakin tinggi *layer* dan *printing speed* yang diberikan menyebabkan efek yang semakin kasar pada permukaan produk. Ketebalan lapisan (*layer thickness*) merupakan ketinggian setiap lapisan (*layer*) yang ditumpuk satu sama lain untuk membuat bagian hingga menjadi produk *3D* nyata (Deswal et al., 2019). Beberapa peneliti telah melakukan penelitian terhadap pengaruh *layer thickness* pada penggunaan *3D printing*, peneliti Sammaiah et al., (2020) menganalisis kekasaran permukaan sampel cetak FDM berbentuk persegi menggunakan material ABS terhadap dampak parameter *infill density* (20%, 40%, 60%, 80% dan 100%) dan *layer thickness* (0.06 mm; 0.1 mm; 0.14 mm; 0.18 mm; 0.22 mm dan 0.26 mm). Mereka menemukan pendekatan bahwa parameter *infill density* 20% dengan *layer thickness* 0.26 mm menghasilkan kekasaran permukaan yang buruk. Kemudian pada tahun berikutnya Sukanto et al., (2020) mengembangkan dengan memvariasikan *infill density* 20%; 40%; 60% dan 80% terhadap diameter nozel 0.5 mm menggunakan material cetak PLA berbentuk ASTM D792 mengungkapkan bahwa ketebalan lapisan memperhitungkan kepadatan produk, sehingga lapisan yang lebih tipis cenderung menghasilkan produk yang lebih padat daripada yang lebih tebal. Vidakis et al., (2022) dalam studinya menganalisis terhadap kualitas kekasaran permukaan, keakuratan dimensi dan kecacatan model sampel cetak ASTM D638 material PLA, peneliti menyimpulkan parameter pencetakan *infill density* dan *nozzle temperature* signifikan berpengaruh besar pada faktor kekasaran permukaan, sedangkan *bed temperature*, *nozzle temperature*, dan *layer thickness* berperan penting terhadap keakuratan dimensi. Selain itu, mereka mengungkapkan persentase kecacatan terbesar dipengaruhi oleh parameter *layer thickness*, *infill density*, dan *deposition angle*.

Berdasarkan kondisi permasalahan yang telah dijelaskan diatas, kini banyak peneliti melakukan penyelidikan parameter proses pencetakan terhadap indikator kualitas cetak. Namun, sedikit informasi yang menghubungkan kekasaran permukaan dan keberadaan cacat (*voids*) dengan geometri model lengkungan pada fabrikasi proses berbasis FDM, sehingga penelitian ini dilakukan untuk mengetahui dan menganalisis performa hasil cetak produk bergeometri kompleks *curve*. Melalui penelitian ini, penulis sangat berharap analisis data hasil penelitian nantinya diharapkan dapat menjadi media rujukan atau pertimbangan dalam menghasilkan produk *3D*, khususnya bidang industri produksi manufaktur.

I.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian dari permasalahan pada latar belakang yang telah dibahas, maka rumusan masalah dalam penelitian ini sebagai berikut:

1. Bagaimana simulasi *static structural stress* pada desain *propeller* terhadap material plastik *polylactic acid* dan *acrylonitrile butadiene styrene* menggunakan teknologi perangkat lunak Solidwork 2019?
2. Bagaimana analisa kekasaran permukaan (*surface roughness*) pada produk cetak *blade propeller* metode fused deposition modeling *3D printing* terhadap ketebalan lapisan (*layer thickness*) 0.1 mm; 0.2 mm dan 0.3 mm dengan kerapatan pengisi (*infill density*) 60%; 80% dan 100%?

I.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian yang akan dilakukan oleh penulis, sebagai berikut :

1. Mengidentifikasi hasil simulasi *static structural stress* pada desain *propeller* terhadap material plastik *polylactic acid* dan *acrylonitrile butadiene styrene* menggunakan teknologi perangkat lunak Solidwork 2019.
2. Menganalisis kekasaran permukaan (*surface roughness*) pada produk cetak *blade propeller* metode fused deposition modeling *3D printing* terhadap ketebalan lapisan (*layer thickness*) 0.1 mm; 0.2 mm dan 0.3 mm dengan kerapatan pengisi (*infill density*) 60%; 80% dan 100%.

I.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian yang dilakukan oleh penulis adalah sebagai berikut:

1. Sebagai media informasi mengenai penggunaan dan pengaplikasian pencetakan *3D* berbasis metode *Fused Deposition Modeling* (FDM) dengan menggunakan material termoplastik yang berbeda.
2. Sebagai media referensi untuk penelitian selanjutnya untuk memilih parameter yang tepat untuk meningkatkan kualitas hasil cetak yang diharapkan.
3. Sebagai media pembelajaran dan pengaplikasian di jenjang perkuliahan dengan mengenalkan teknologi digital industri 4.0 dengan menerapkan *3D printing* sebagai media menciptakan produk prototipe yang memiliki nilai fungsional.
4. Penerapan teknologi digital desain mampu mendorong pengembangan kapasitas manusia dengan meningkatkan potensi terampil yang inovatif.

I.5 Ruang Lingkup Penelitian

Pada penelitian ini digunakan batasan masalah untuk membatasi asumsi-asumsi parameter yang pengaruhnya sangat kecil dan bersifat homogen. Adapun batasan masalah yang dimaksud sebagai berikut :

1. Perancangan desain dan simulasi produk *propeller* menggunakan perangkat lunak Solidwork versi 2019.
2. Simulasi *propeller* hanya untuk mengetahui nilai kekuatan *static stress* yang dimana mencakup *von mises stress*; *strain*; *displacement*; dan *safety factor* tidak membahas simulasi secara aerodinamis pada desain *propeller*.
3. Tipe printer yang digunakan Anycubic i3 Mega *3D Drucker*; material (*filament*) produksi dari Esun; dan perangkat lunak *licer* Ultimaker Cura untuk mendapatkan program g-code dari desain.
4. Pengaturan *licer* untuk variabel tetap yakni *fan speed* 100%; *print speed* 50 mm/s; *angle printing* 60°; diameter nozzle 0,4 mm; diameter filament 1.75 mm; *support Touch Platform Only type Brim*; *wall thickness* 0,8 mm; *print rate* 100%; *infill pattern line*; posisi pencetakan secara axial (horizontal).

5. Pengaturan *print temperature* untuk material PLA 210°C dengan *bed temperature* 70°C dan material ABS *print temperature* 240°C dengan *bed temperature* 100°C berwarna putih natural.
6. Tidak membahas kondisi eksperimental produk secara statis dan dinamis dimana mencakup penerapan pengaplikasiannya.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

II.1 Penelitian Terdahulu

Pencetakan *3D* adalah sebuah teknologi yang memungkinkan penerapan untuk berbagai aplikasi terbaru dengan sudut pandang yang memberikan kemajuan pesat seperti ketersediaan material, kecepatan fabrikasi dan resolusi proses pencetakan *3D*. Teknologi *3D printing* tidak berproses dengan sendirinya, melainkan menjadi satu kesatuan bagian dari sistem multi-proses dari beberapa sistem teknologi agar sesuai dengan perkembangan material dan persyaratan produk baru (Lee et al., 2017). Meski demikian, teknologi ini masih memiliki keterbatasan terhadap indikator kualitas produk yang dihasilkan. Berdasarkan literatur yang dilakukan melihat permasalahan yang terjadi, telah banyak peneliti melakukan penelitian terhadap mutu kualitas produk cetak berbasis ekstrusi FDM terhadap parameter proses. Peneliti Fadhil Alani et al., (2017) melakukan riset terhadap teknologi *Fused Deposition Modeling 3D printing* dengan parameter utama, yaitu *infill density* dengan persentase berbeda yaitu 20%; 35%; 50%; 65% dan 80% dengan parameter konstan *layer thickness* 0.1 mm; orientasi arah 90° dan *printing speed* 75 mm/s yang menjadi pertimbangan dalam pengujian mekanis dan keakuratan dimensi terhadap spesimen yang dicetak menggunakan material PLA dengan standar spesimen ASTM D695. Mereka menyimpulkan bahwa kekuatan (*strength*) maksimum adalah 30 MPa dengan variasi *infill density* yang terbaik 80%, artinya semakin besar nilai persentase *infill density* yang digunakan maka spesimen mengalami kerapatan yang lebih baik sehingga kekuatan hasil cetak optimum namun waktu proses dan material yang digunakan kurang efisien.

Alsoufi & Elsayed, (2018) melakukan penelitian dengan menyelidiki kualitas kekasaran permukaan dan dimensi keakuratan produk yang dihasilkan proses fabrikasi FDM *3D printer* terhadap parameter proses *infill density* 100% dengan menggunakan material termoplastik yang berbeda yaitu PLA, PLA+, ABS dan ABS+. Peneliti melakukan eksperimen dengan membuat produk geometri persegi berukuran 40 mm (L) x 40 mm (W) x 15 mm (H), dengan mengukur kekasaran permukaan pada bagian *top face*, *bottom face* dan *side face* menggunakan

profilometer dan digital vernier caliper untuk pengukuran dimensional produk, dari hasil penelitian tersebut filamen PLA+ menunjukkan *performance* kekasaran permukaan yang lebih baik dan akurat sementara ABS menunjukkan kekasaran permukaan yang tinggi.

Vidakis et al., (2022) melakukan studi penelitian efek parameter proses yaitu *infill density (ID)*, *layer thickness (LT)*, *nozzle temperature (NT)*, *printing speed (PS)*, *bed temperature (BD)*, *deposition angle* terhadap kekasaran permukaan, keakuratan dimensional dan kecacatan void pada proses FDM 3D *printing* menggunakan material termoplastik PLA jenis Ingeo 3052D by Heraklin, Greece dengan membuat sampel ASTM D630 type IV, berdasarkan analisis *Design of Experiment Taguchi Method* dengan *orthogonal array L25* menyimpulkan bahwa maximum kekasaran didapatkan 35.9 μm dengan parameter proses yang dominan berpengaruh adalah *layer thickness*, *infill density* dan *deposition angle* begitu pula void yang terbentuk. Respon keakuratan dimensi diperoleh *infill density* 100%, *deposition angle* 90° dan *nozzle temperature* yang tinggi 210°C memiliki tingkat keakuratan yang lebih baik untuk objek geometri bidang datar.

Parameter pencetakan yang berbeda mempengaruhi efek kekasaran permukaan yang diteliti oleh peneliti Vyavahare et al., (2020) dalam eksperimen yang dilakukan memilih parameter proses *layer thickness*, *orientation*, *print speed*, *wall thickness*, dan *temperature*. Dalam studinya menyatakan bahwa parameter *layer thickness* dan *orientation* signifikan mempengaruhi kekasaran permukaan. Kini perkembangan FDM 3D printer semakin meluas, dengan kemajuannya metode fabrikasi ini telah mampu menghasilkan produk fisik dengan geometri profil yang sangat kompleks seperti bentuk *curve*, *ellips*, dan sebagainya. Luis Pérez, (2002) melakukan karakterisasi pada produk terhadap kekasaran permukaan menggunakan mesin FDM 3000 pada material ABS dengan membuat geometri prototipe lengkung (*curve*). Pengambilan respon kekasaran permukaan yaitu Ra dan Rq dengan *cut off* 800 μm menggunakan pengukuran stylus, diindikasikan bahwa *shape curve* pada objek sangat berefek terhadap kekasaran permukaan selain parameter proses *layer thickness* dengan didapatkan nilai Ra sebesar 48.1 μm dan Rq 55.4 μm .

Ahn et al., (2009) melakukan penelitian dalam studinya dengan membuat produk model 3D material ABS dengan penampang lengkungan elips atau parabola pada sudut permukaan yang tidak seragam menggunakan metode FDM *layered manufacturing*. Model produk yang dirancang diukur kekasaran permukaan menggunakan SurfTest Formtracer dengan sudut bidang yang berputar pada permukaan model. Dalam studinya, nilai kekasaran yang diaplikasikan adalah kekasaran rata-rata (Ra) dari garis tengah pengukuran ke profil permukaan, mereka menyimpulkan bahwa distribusi kekasaran permukaan signifikan dipengaruhi faktor geometri penampang, sudut permukaan dan ketebalan lapisan. Buj-Corral et al., (2021) menganalisis respon kekasaran permukaan pada produk cetak cangkir hemispherical dengan geometri setengah bola diameter internal 32 mm dan diameter eksternal 50 mm menggunakan filamen PLA terhadap proses pencetakan *layer thickness, nozzle diameter, temperature, dan print speed*. Pengukuran kekasaran pada produk cangkir di bagian permukaan eksternal dan internal menggunakan Talysurf 2 *contact roughness* dengan Gaussian Filter *cut off* 0.8 mm, disimpulkan bahwa nilai kekasaran pada permukaan eksternal dan internal tidak ada perbedaan, namun pemilihan kondisi parameter pencetakan *layer thickness* memiliki pengaruh besar terhadap kekasaran permukaan.

Chohan et al., (2016) melakukan pembuatan produk geometri kompleks pada aplikasi biomedis yaitu implan pinggul menggunakan teknologi proses FDM terhadap kekasaran permukaan dengan memberikan perlakuan *vapour smoothing* menggunakan bahan ABS P-40. Pengujian kekasaran awal dan akhir diukur menggunakan Mitutoyo SJ-210 dengan Gaussian Filter panjang *cut off* 0.25 μm dilakukan pengukuran secara acak dengan tiga kali di titik yang berbeda. Berdasarkan pengamatan yang dilakukan, diperoleh nilai kekasaran permukaan sebelum *smoothing* sebesar 8.4846 μm sedangkan setelah diberikan perlakuan *vapour smoothing* dengan waktu yang berbeda nilai kekasaran yang terendah adalah 0.3317 μm .

Berdasarkan tinjauan pustaka di atas, kombinasi parameter *layer thickness* dan *infill density* dengan tingkatan yang berbeda masih kurang didapatkan dalam penelitian dan belum ditemukan pembuatan produk yang kompleks seperti *blade propeller* dengan menggunakan dua material berbeda dari polimer termoplastik

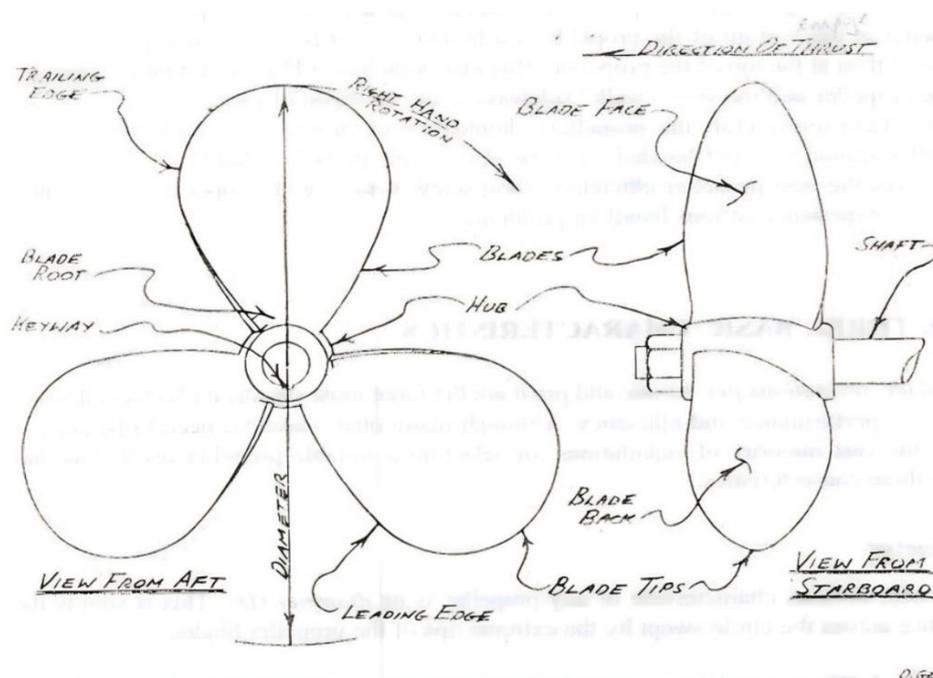
yaitu PLA dan ABS, dalam penelitian ini hasil pengambilan kekasaran permukaan-Ra akan dianalisis menggunakan SNR metode *Taguchi*.

II.2 Propeller

Propeller merupakan komponen mesin yang digunakan untuk mentransmisikan daya dengan mengkonversi gerakan *rotating* menjadi daya dorong (*thrust*) sesuai dengan parameter kecepatan yang ditentukan. Pada *propeller* terjadi perbedaan tekanan antara permukaan depan dan belakang sudu (*blades*), pengaplikasian *propeller* kini digunakan dalam industri manufaktur, penerbangan; dan maritim. Namun, untuk menghasilkan gaya dorong yang searah dengan pergerakan memerlukan bentuk konstruksi pendesainan yang tepat sehingga menghasilkan daya dorong yang semakin besar.

II.2.1 Komponen Propeller

Menurut Gerr, (2018) dalam buku *The Propeller Handbook* menjelaskan beberapa komponen yang terdapat pada *propeller*, sebagai berikut:



Gambar 1. Komponen *propeller* (Gerr, 2018)

1. Hub

Hub atau bos dari *propeller* adalah bagian yang menancap pada cakram tengah padat yang disebut *crankshaft* (poros engkol) dimana *propeller* terpasang.

Root hub terletak di bagian dekat dengan *hub* disebut *shank* (tulang kering) memiliki ketebalan dan kekuatan yang cukup.

2. *Keyway*

Keyway atau alur pasak, sebagian besar poros baling-baling mentransmisikan torsi dari poros ke baling-baling melalui kunci. Kuncinya adalah logam persegi panjang di sepanjang poros yang masuk ke dalam alur pasak yang digiling ke *interior hub*.

3. *Blades*

Blades atau bilah baling-baling adalah sirip atau foil lengkung yang keluar dari *hub*, bagian tersebut bertujuan untuk menggerakkan sesuatu melalui udara.

4. *Blade Face* dan *Back Face*

Blade Face merupakan bagian sisi permukaan bertekanan tinggi dari *blade*. Bagian tersebut mendorong udara untuk bergerak. Lengkungan bawah yang datar disebut *flat side*. Bagian *back face* merupakan sisi permukaan bertekanan rendah atau permukaan hisap *blade* dimana sisi ini menghadap ke depan. Lengkungan atas dari *blade* disebut *cambered side*.

5. *Blade Root* dan *Blade Tip*

Bagian *propeller* yang berada pada titik dimana *blade* terpasang ke *hub*. *Tip blade* merupakan bagian ujung bilah terluar yang ekstrem, sejauh mungkin dari pusat poros *propeller*.

6. *Leading* dan *Trailing Edge*

Leading and Trailing Edges adalah ujung pisau yang membelah air. *Leading edge* terletak ujung depan yang mengiris atau memotong datangnya aliran udara. *Trailing edge* berada di ujung belakang berlawanan dengan *leading edge*.

7. *Blade Elements*

Bagian ini merupakan kombinasi lengkungan atas dan bawah membentuk *blade propeller*. *Blade* ini berubah bentuk dan sudut dari *hub* sampai ke *tip blade*.

II.2.2 Faktor Kinerja *Propeller*

1. Diameter

Karakteristik utama dari pembuatan *propeller* adalah diameter (D) yang menentukan jumlah daya yang diserap dan jumlah dorongan yang diterima. Untuk

sebagian besar, semakin besar diameternya semakin besar efisiensinya. Peningkatan pada diameter secara umum meningkatkan beban dorong dan torsi sehingga memperlambat RPM porosnya.

2. *Revolution Per Menit*

Putaran per menit (RPM atau N) adalah jumlah putaran atau putaran penuh yang dilakukan *propeller* dalam satu menit, sebab *propeller* berputar dengan kecepatan yang sama dengan poros *propeller* maka disebut RPM poros.

3. *Pitch*

Istilah *pitch* digunakan untuk memperkirakan aksial *propeller* namun disebut sebagai *screw propeller*. Face pitch sama seperti screw, secara teori *propeller* akan bergerak maju dengan jarak tertentu untuk setiap putaran penuh. Jarak ini disebut sebagai *pitch*, istilah lainnya adalah *face pitch* yang menentukan sudut *blades face*.

II.2.3 Tipe-Tipe *Propeller*

Menurut Wankhede, (2020) *propeller* diklasifikasikan berdasarkan beberapa tipe-tipe, berikut ini:

A. Klasifikasi berdasarkan jumlah *blade*

Blade propeller divariasikan dengan beragam jumlah *blade*, efisiensi *propeller* akan meningkat untuk *propeller* dengan jumlah *blade* rendah yaitu 2 *blade propeller*. Meski demikian untuk mendapatkan kekuatan dan ketahanan yang baik terhadap pembebanan berat, *propeller* dengan jumlah *blade* yang minimum tidak direkomendasikan untuk diaplikasikan.

1. *3 Blades Propeller*

Tipe *propeller* dengan 3 *blade* memiliki karakteristik sebagai berikut:

- Biaya dan material pembuatannya lebih efisien;
- Kinerja kecepatan putar yang tinggi;
- Akselerasinya lebih baik dari tipe model lain;
- Penanganan kecepatan rendah tidak efisien

2. *4 Blades Propeller*

Karakteristik pada *propeller 4 blade*, sebagai berikut:

- Biaya dan penggunaan materialnya relatif tinggi dibandingkan dengan

jumlah *blade* yang rendah;

- Kekuatan dan daya tahan terhadap gaya dorong (*thrust*) yang diberikan cukup baik;
- Kinerja kecepatan yang rendah;
- Memiliki daya cengkeram yang cukup mampu diterapkan di laut.

3. *5 Blades Propeller*

Propeller 5 bilah memiliki karakteristik sebagai berikut:

- Biaya produksi pembuatan lebih tinggi
- Adanya getaran yang terjadi dari semua jenis lainnya
- Kemampuan daya cengkram yang lebih baik di laut.

4. *6 dan 7 Blades Propeller*

Tipe *propeller* dengan jumlah *blade* yang lebih banyak, mempunyai karakteristik yang berbeda dari tipe *blades* yang lainnya, sebagai berikut:

- Biaya produksi pembuatannya lebih tinggi, terutama dari penggunaan material.
- Timbulnya getaran dan kebisingan ketika diberikan kecepatan putaran yang tinggi.
- Mempercepat terjadinya kavitasi (gelembung *high forced*) karena kecepatan putaran yang berlebihan.
- Mempercepat terjadinya kelelahan (*fatigue*) pada *propeller* sebab terjadi penumpukan pada permukaan dinding hisap
- Kemampuan dan kekuatan daya cengkeram lebih baik, sehingga layak direkomendasikan di laut.

B. Klasifikasi berdasarkan rancangan

Gerr, (2018) dalam buku *The Propeller Handbook* menjelaskan dua tipe rancangan *propeller*, sebagai berikut:

1. *Ducted Propeller*

Ducted Propeller atau disebut *Kort nozzle propeller* merupakan *propeller* yang memiliki saluran (*duct*) yang mengelilingi baling-baling sehingga membentuk selubung atau tabung (*nozzle*). Unit ini juga disebut sebagai tabung Kort. Kort diambil dari nama Ludwig Kort, yaitu merancang *propeller* tabung (*ducted propeller*). Efek *propeller* tipe ini mampu meningkatkan daya dorong

yang dihasilkan oleh mesin, secara luas bahwa penerapan *ducted propeller* menguntungkan dalam permasalahan beban gaya dorong yang tinggi, karena kort nozzle memberikan keefektifan propulsi akibatnya percepatan aliran terbatas. Sehingga menimbulkan kecepatan rendah sekitar 9 knot untuk di laut.

2. *Surface Propeller*

Jenis *propeller* ini dirancang untuk beroperasi dengan prinsip kerja aliran setengah masuk dan setengah keluar. *Surface propeller* mampu mencegah terjadinya kavitasi karena jenis rancangan *propeller* ini, apabila menerima putaran maka setiap permukaan *blade* terakrasi penuh. Pengaruh *surface propeller* pada dasarnya efisien, sebab kemampuan beroperasi pada RPM tinggi dan menghasilkan kecepatan yang tinggi tanpa masalah kavitasi. Tipe *propeller* ini beroperasi secara teratur diatas 35 knot.

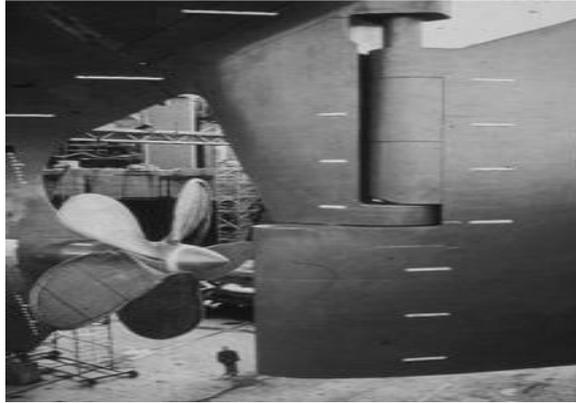
C. Klasifikasi berdasarkan model *blades*

1. *Solid Propeller*

Tipe model *propeller* ini umum digunakan dikenal sebagai *Fixed Pitch Propeller* (FPP) dengan bentuk monoblok atau *built-up*. FPP dibuat dengan cara dicetak dalam satu blok sehingga letak *propeller* dan pitch *propeller* tetap, dengan pitch tertentu yang tidak dapat diubah dalam pengoperasiannya. Model *propeller* ini terdapat dua jenis yaitu *propeller* monoblok dan *built-up*. Geometri mono-blok umumnya sudah banyak diaplikasikan dibandingkan *propeller built-up* dimana bladennya dibuat secara terpisah dari bos dan kemudian dibaut.

Pembuatan *propeller* tipe FPP bervariasi dalam berbagai desain dan dimensi. Untuk *propeller* dengan skala besar ukuran diameter berkisar lebih dari 300 mm menggunakan material *non-ferrous*, sementara kuningan, mangan, dan nikel-aluminium bronze adalah material yang sering digunakan. Berbeda *stainless steel* menjadi bahan yang terbatas. *Cast iron* yang menjadi material unggul untuk produksi *propeller* kini pengaplikasiannya sudah langka, sehingga alternatif untuk pembuatan *propeller* berskala kecil hingga sedang menggunakan bahan dari kelas polimer, nilon, dan komposit serat karbon. Tipe *Fixed Pitch Propeller* cukup efisien dibandingkan *propeller* lainnya serta perawatannya sederhana. Menurut Carlton, (2019) beberapa model tipe dari *Fixed Pitch Propeller*, berikut ini:

a) *Azimuth Propeller*

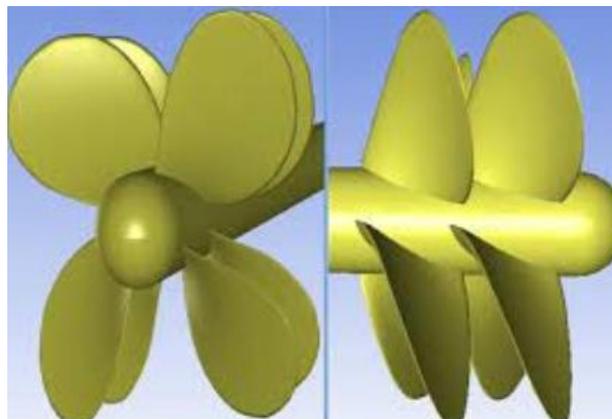


Gambar 2. *Azimuth Propeller* (Carlton, 2019)

Tipe *propeller* ini sudah umum digunakan selama tahunan karena memiliki pengaturan *propeller* tanpa duct atau dengan duct saluran, sehingga penggunaan tipe *propeller azimuth* mempunyai *maneuverability* (daya gerak) dan *speed control* yang baik serta kemungkinan terjadi vibrasi sangat kecil.

b) *Tandem Propeller*

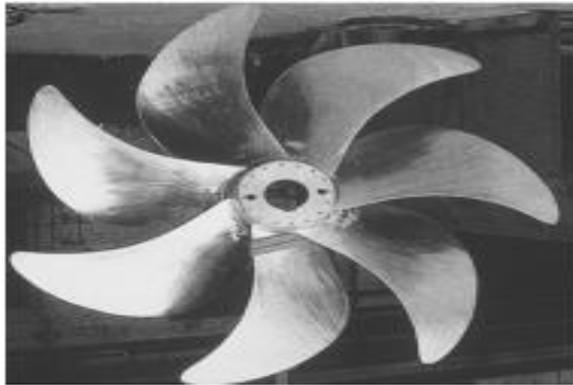
Tandem propeller memiliki dua *propeller* yang dipasang pada *shaft* tunggal yang akan berputar ke arah yang sama. Penggunaan tipe *propeller* ini memudahkan kondisi pembebanan pada *propeller* dengan tujuan mengurangi beban pada *single propeller* yang menyebabkan terjadinya kavitasi. Gaya dorong (*thrust*) yang terjadi dibagi antara dua *propeller* dengan ukuran dan jumlah yang sama. Namun, kelemahan tipe *propeller* ini distribusi aksial *propeller* menciptakan momen lentur yang besar sehingga memberikan kerugian pada *stern tube bearing*.



Gambar 3. *Tandem Propeller* (Carlton, 2019)

c) *Overlapping Propeller*

Tipe *overlapping propeller* membagi beban dimana *shaft* ditempatkan pada jarak horizontal. *Overlapping propeller* ini terbatas dalam pengaplikasian penelitian dan pengembangan sebab masih kurang ditemukan dalam praktik kapal di lapangan. Namun dalam penelitian sebagian besar berpusat pada efek poros dengan rasio diameter *propeller* pada efisiensi propulsi. Tipe *propeller* ini sebagian besar menguntungkan bagian area *wake factor* dengan kecepatan rendah sehingga meningkatkan efisiensi propulsi. *Overlapping propeller* dinilai memberikan efisiensi lambung kapal yang lebih tinggi karena bekerja di daerah yang *wake*-nya tinggi. *Wake* merupakan interaksi antara kapal dengan air yang memiliki kecepatan relatif terhadap kapal.

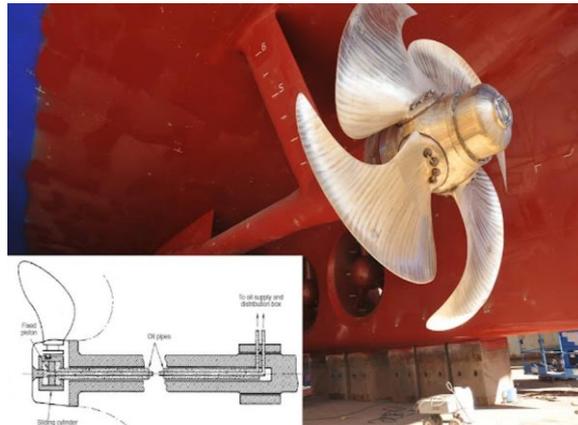


Gambar 4. *Overlapping Propeller* (Carlton, 2019)

2. *Variable Pitch (V.P.) Propeller*

Jenis *propeller* ini dikenal sebagai *Controllable Pitch Propellers* (CPP). Dasar *blade* variable pitch *propeller* dipasang pada bos *propeller* dengan flensa yang terhubung ke *body hub* bagian dalam. Mekanisme ini memungkinkan *blade propeller* berputar di sekitar sumbu pin tengahnya yang memberikan pitch variabel tergantung pada sudut putar *propeller*. Model *propeller* ini memiliki kemampuan untuk mengontrol pitch *propeller*, daya propulsi yang diserap keseluruhan oleh *propeller* dalam kondisi adanya pembebanan. Berbeda hal dengan model solid *propeller*, daya propulsi yang diserap berdasarkan ketentuan dari rancangan desain kapal. Penggunaan *propeller variable pitch* memerlukan poros *propeller* berongga, memudahkan pemasangan pada bos *propeller*. *Propeller* CPP relatif mahal daripada *propeller* tipe FPP, sebab hub *propeller* memiliki ruang mekanisme secara hidrolik untuk mengontrol *pitch* (sudut) *blade*

dan *hub* yang relatif besar, sehingga efisiensi *propeller* sedikit lebih rendah. CPP tepat digunakan pada kapal sejenis *shuttle tanker* yang memerlukan kemampuan *manuver* (gerakan tangkas dan cepat dari kapal) tingkat tinggi. Keunggulan CPP dibandingkan FPP adalah tipe CPP memberikan akselerasi, manuver kapal yang lebih baik, kecepatan kapal divariasikan tanpa mengubah kecepatan mesin, bahkan kecepatan dapat dikontrol langsung. Namun, tipe ini memiliki kelemahan terhadap mekanisme kontrolnya yang lebih kompleks sehingga memerlukan biaya *maintenance* yang sangat tinggi dibandingkan FPP.



Gambar 5. *Controllable Pitch Propeller* (Carlton, 2019)

3. APC Propeller

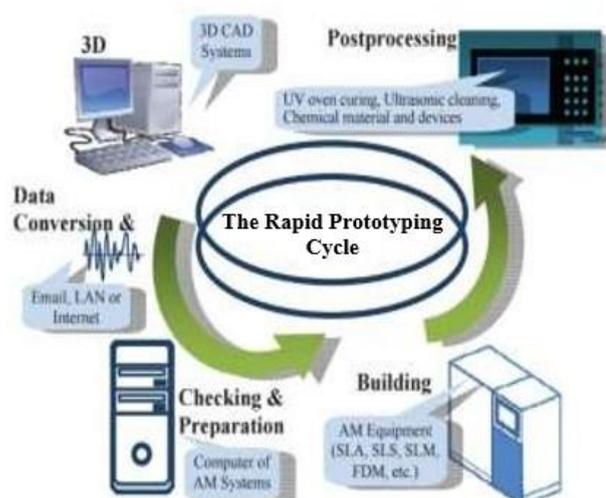
Tipe model blade propeller ini umumnya diterapkan dalam industri penerbangan. APC propeller ini masuk kedalam contra rotating propeller yang dimana sistem propulsinya terdapat dua buah propeller yang saling berputar berlawanan arah dalam satu sumbu. Kelebihan tipe propeller ini energi rotasi slipstream yang bekerja tidak mudah hilang sehingga lebih stabil sehingga pengaplikasiannya pada UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) atau yang biasa disebut pesawat tanpa awak adalah pesawat yang pengoperasiannya secara otomatis bahkan dapat Menggunakan media control. Pesawat tanpa awak memiliki beberapa jenis bentuk diantaranya bertipe *fixed wing* atau sayap tetap dan multi rotor yang dapat *take off* dan *landing* secara vertikal.



Gambar 6. APC UAV Propeller (Alfaridzi & Kurniawan, 2022)

II.3 Rapid Prototyping

Manufaktur aditif merupakan istilah dari *prototype* cepat yang kini disebut sebagai pencetakan *3D*. *Rapid Prototyping* (RP) didefinisikan bahwa desain dibangun dengan mengaplikasikan bahan lapis demi lapis dimana bergantung pada teknologinya yang digunakan ada yang mengalami sintering, peleburan, perekatan, atau *curing* dengan laser dengan memanfaatkan bantuan computer *Computer Aided Design* (CAD) (Cader and Kiński, 2022). *Rapid prototyping* diaplikasikan di berbagai industri untuk memvisualisasikan proses dalam menciptakan sistem bagian dengan cepat sebelum dikomersialisasikan. Prinsip dasar dari teknologi manufaktur adiktif adalah menyederhanakan proses untuk menciptakan produk *3D* yang kompleks dari data digital *Computer Aided Design* (Gibson et al., 2015). Teknologi dikembangkan untuk membantu para desainer dan insinyur untuk menuangkan ide-ide mereka dalam tiga dimensi yang menjadikan alternatif untuk memproduksi prototipe yang efisien dibandingkan dengan proses konvensional (Cooper, 2001).



Gambar 7. Siklus RP dimulai dengan desain CAD (Chua and Leong, 2014)

Teknologi *prototyping* tidak hanya untuk mendesain model sederhana dengan kelebihan mampu menciptakan produk sesungguhnya dengan berbagai material misal logam, plastik dan keramik (Wong and Hernandez, 2012). Keunggulan lain dari *rapid prototyping* mampu membangun bagian berlapis-lapis dengan geometri yang lebih kompleks dan model struktural internal yang rumit untuk diproduksi dibandingkan dengan proses subtraktif atau pencetakan injeksi tradisional (Backeris and Borrello, 2017). Teknologi ini sangat mampu mengefisienkan proses produksi dimana berproses tanpa pengawasan sehingga efisien untuk diterapkan dalam bidang industri. Gambar 1 skema pembuatan file CAD, dimana format model yang solid untuk membangun prototipe. Pemodelan desain CAD mengubah format file menjadi .STL oleh sistem 3D untuk *STereoLithography*. Namun, setelah file .STL dibuat, perlu disiapkan bantuan jenis sistem RP lainnya. Beberapa sistem dapat menerima .STL file secara langsung, sedangkan yang lain memerlukan *preprocessing*.

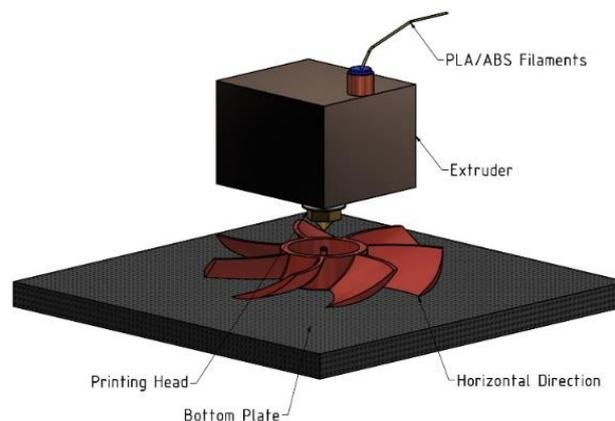
Dalam proses *additive manufacturing*, teknologi ini mengklasifikasikan proses tersebut kedalam bentuk cairan, bubuk dan padat. Menurut Cooper (2001) perkembangan industri RP, kini teknologi berhasil diperkenalkan dengan berbagai teknik prototype lainnya sebagai berikut:

1. *JP-System 5* (JP5) oleh Schroff Development, metode membuat desain dari data CAD menggunakan kertas label dan *plotter*. JP5 adalah pemodelan sederhana untuk pembuatan desain kasar tiga dimensi.
2. *Ballistic Particle Manufacturing* (BPM), teknik mencetak model lilin dengan menembakkan *microdroplet* lilin cair dari jet yang bergerak ke platform.
3. *Model Maker* (MM), *Model Maker II* (MM2) dan *Rapid Tool Maker* (RTM) oleh Sanders Prototype, Inc. berproduksi dengan menggunakan teknologi pencetakan ink-jet dengan lilin cair.
4. *Multi-Jet Modeling* (MJM) oleh 3D Systems, Corp., metode teknologi pencetakan inkjet dengan penggunaan jet masuk ke dalam cetakan kepala untuk menghasilkan desain konsep.
5. *Direct Shell Production* (DSP) oleh Soligen, Inc., menggunakan teknologi pencetakan pengikat yang dikembangkan oleh MIT. Pengikatnya adalah

dicetak di atas lapisan bubuk keramik untuk menghasilkan produk langsung dari CAD.

6. *Z402 system* oleh Z-Corp menggunakan MIT dengan teknik cetak untuk membangun desain konsep yang sangat cepat dari bahan seperti pati. Berbeda halnya untuk membangun bagian logam menggunakan metode Sistem *ProMetal* oleh *Extrude Hone*.
7. *Fused Deposition Modeling (FDM)* oleh Stratasys, Inc., memproduksi model dari lilin atau material termoplastik menggunakan kontrol gerak dimana teknologi ekstrusi ini hampir seperti lem panas.
8. *Laminated Object Manufacturing* oleh Helisys, Inc., membuat model fisik dengan menumpuk lembaran kertas atau bahan plastik memotong bahan dengan cara laser.
9. *Stereolithography* oleh 3D Systems, Corp., adalah sistem RP tertua dengan metode pemodelan menggunakan resin epoksi dengan daya laser yang rendah.
10. *Selective Laser Sintering* oleh DTM, Corp., metode dengan berbagai material dengan sistem kerja melelehkan bubuk dengan laser menjadi bentuk yang diinginkan.
11. *Laser Engineered Net Shaping* oleh Optomec Design Co., teknik pembuatan langsung dari bubuk logam dengan menggabungkan bubuk dengan sinar laser.

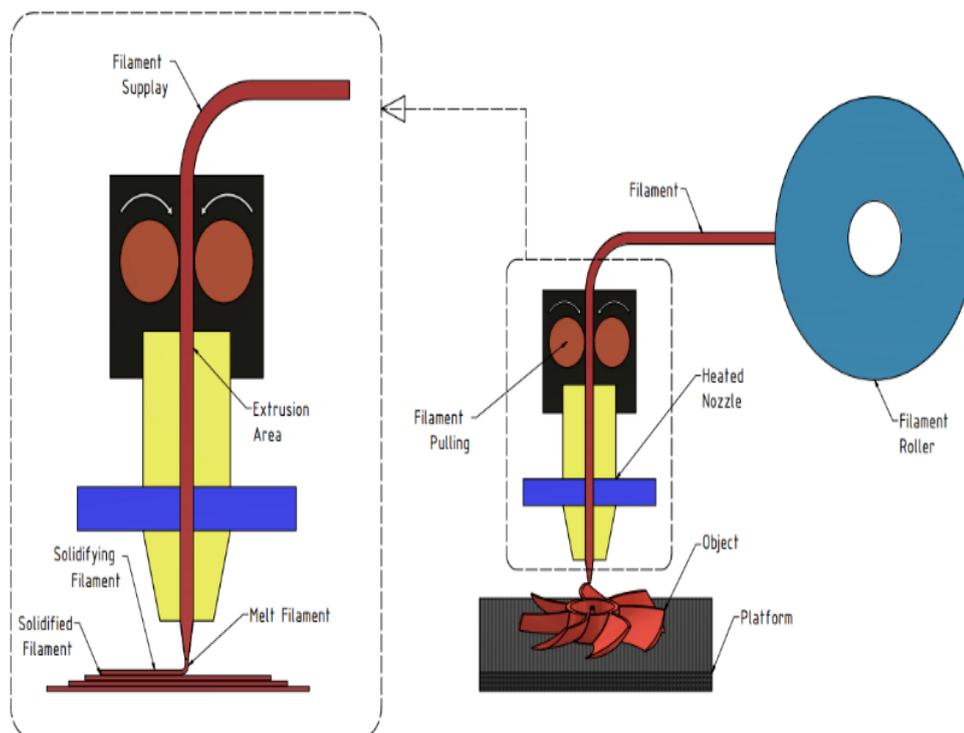
II.4 *Fused Deposition Modeling*



Gambar 8. Proses *fused deposition modeling*

Fused Deposition Modeling (FDM) pertama kali dikembangkan dan diimplementasikan pada 1980-an oleh Scott Crump, pendiri Stratasys Ltd., dengan teknik pemodelan kesederhanaan dan kemudahan dalam penggunaannya (Harpool, 2016). Metode *fused deposition modeling* merupakan teknologi AM yang memberikan dasar berbasis ekstrusi sebutan ini diperkenalkan dalam kelas 3D printer dengan melalui pelapisan termoplastik secara berurutan (Backeris and Borrello, 2017). Teknologi FDM membentuk bagian lapis demi lapis dengan memanaskan dan mengekstrusi material termoplastik melalui nozzle kecil dengan yang diameternya berkisar antara 0.35–0.60 mm (Alafaghani dan Qattawi, 2018).

Fused deposition modeling bekerja dengan menggunakan ruang pemanas untuk mencairkan material polimer yang akan dimasukkan ke dalam sistem yang dikenal dengan sebutan filamen kemudian diekstrusi oleh kepala nozel secara lapis demi lapis untuk membuat objek tiga dimensi secara nyata. Gambar 9 dimana material filamen dilunakkan di dalam *molten chamber* pada suhu diatas titik lelehnya. Saat bergerak, material yang diekstrusi diletakkan kemudian dilakukan pengisian untuk setiap lapisan objek siklus ini berproses secara berulang-ulang.



Gambar 9. Ilustrasi proses didalam *heated nozzle*

Menurut Alafaghani & Qattawi (2018) metode FDM memberikan banyak keuntungan yang utama memiliki kemampuan untuk membuat dan menghasilkan objek dengan geometri kompleks yang rumit, mengurangi tahapan perakitan karena kemampuan dalam memproduksi telah dirancang oleh fitur, dan mudah menghilangkan sisa cetakan produksi. Penerapan *fused deposition modeling* (FDM) dalam industri mempunyai beberapa keuntungan, antara lain :

1. Menjadi perangkat teknologi serba guna untuk pembuatan *prototype* dalam pengembangan produk.
2. Pengaplikasian teknologi pencetakan FDM *3D* menggunakan material ramah lingkungan, mudah didapatkan dan biaya yang relatif hemat selain itu mengurangi risiko yang cukup fatal.
3. Material yang digunakan *thermoplastic* sangat mendukung proses produksi bersifat stabil baik secara mekanik ataupun permasalahan lingkungan.
4. Bentuk geometri yang kompleks mungkin selama ini menjadi permasalahan dalam lingkungan produksi saat ini tidak menjadi kendala dengan adanya teknologi *fused deposition modeling* (FDM).
5. Mudah dalam tahap *finishing* (pembersihan support).

II.5 3D Printing

Pencetakan *3D* menjadi populer dengan sebutan aditif manufaktur sebagai fabrikasi bentuk bebas, pembuatan prototipe cepat dan manufaktur berbasis lapisan secara *layer by layer* (Gibson and Shukla, 2016). *3D* mampu mengkonversi dari bentuk maya ke bentuk fisik, dimana proses ini dimulai dengan model geometri digital *3D* dengan memanfaatkan bantuan perangkat lunak *Computer Aided Design* (CAD). Teknologi *3D printing* menjadi teknologi unggul dalam proses manufaktur karena sistem kerja yang berbasis digital menciptakan objek fisik yang memiliki nilai fungsional dengan estimasi harga yang relatif murah (Durgun and Ertan, 2014). Bagian yang dibangun melalui proses dengan meletakkan lapisan material secara berurutan sampai seluruh objek menjadi geometri bagian akhir nyata yang ditentukan oleh ketebalan lapisan (Galeta et al., 2016; Gibson and Shukla, 2016).

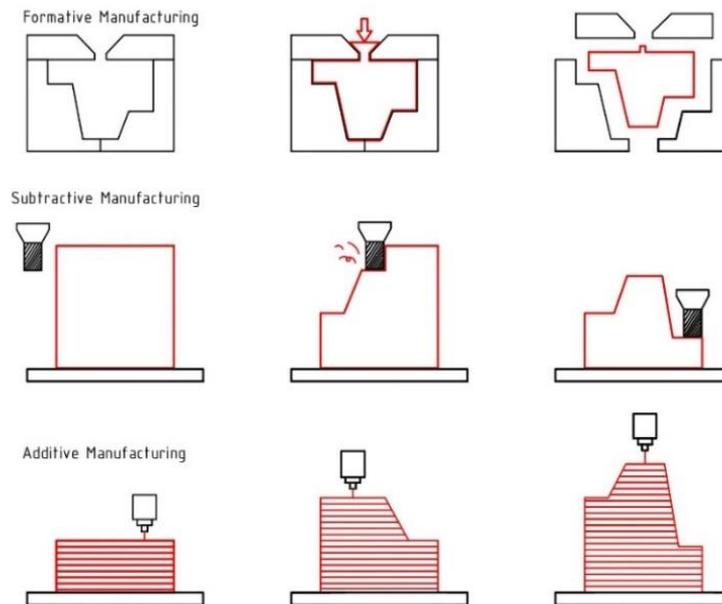


Gambar 10. Mesin *3D printing*

Teknologi ini menggunakan jenis material polimer plastik yang dilelehkan pada temperatur panas. Kemajuan printer *3D* kini dikatakan sebagai perangkat dengan memanfaatkan lelehan plastik yang akan mendingin dan mengeras di lapisan bawah pada objek tiga dimensi (Daniel and Kelly, 2011). Keunggulan lain dari pengaplikasian *3D* printer dengan verifikasi yang cepat; pengembangan prototipe dan produksi volume rendah, meski demikian keterbatasan dari mesin ini karena ketidakmampuan untuk menciptakan bagian dengan sifat material yang setara dibuat melalui subtraktif sebab adanya bagian pencetakan *3D* mengalami *warping* (pembengkokan selama proses). Teknologi FDM dalam prinsip kerjanya akan membentuk terjadinya *warping* karena pengaruh temperatur yang rendah atau mengalami proses pendinginan (*cooling*) hingga mengalami penyusutan (*shrinkage*) sehingga terbentuk lengkungan (Redwood et al., 2017). Ketika lapisan baru mengalami pengendapan maka lapisan akan menyusut hingga menarik lapisan di bagian bawahnya akibatnya terbentuk lengkungan, seperti Gambar 11.



Gambar 11. Skema terjadinya *warping* di bagian samping pada FDM

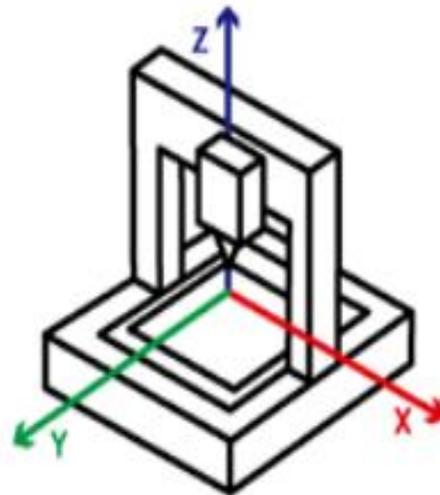


Gambar 12. Ilustrasi proses *additive manufacturing*

Namun, pemanfaatan teknologi ini masih memiliki keterbatasan dalam mencetak material berbeda, misal material plastik hingga karet; logam dan paduan, resin dan keramik meski proses kerja yang digunakan sama dengan memanfaatkan desain digital diubah menjadi objek nyata *3D* (Laricha et al., 2020). Kemajuan teknologi pencetakan *3D* komersial digunakan untuk menciptakan *prototyping* dan distribusi manufaktur yang bertujuan untuk aplikasi di lingkup industri teknik (arsitektur, desain industri, otomotif); kedokteran (gigi dan alat medis, biotek) dan gaya hidup manusia (alas kaki, perhiasan, kacamata) (Setyoadi et al., 2015). Laricha et al., (2020) teknologi pencetakan *3D* metode FDM menjadi beberapa tipe berdasarkan sistem proses gerakannya sebagai berikut :

1. Tipe Cartesian

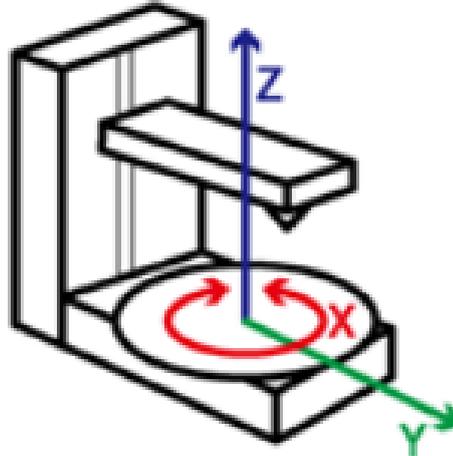
Tipe *printer 3D* Cartesian merupakan printer metode FDM *3D* yang mudah ditemukan dalam sektor market. Teknologi ini hanya menggunakan tiga sumbu yakni: X; Y; dan Z sebagai penentuan posisi dan arah *extruder* yang tepat. Tipe pencetakan *3D* Cartesian bergerak pada sumbu Z dan komponen *extruder* akan bekerja pada bidang sumbu X dan Y.



Gambar 13. *3D printer cartesian* (Redwood et al., 2017)

2. Tipe Delta

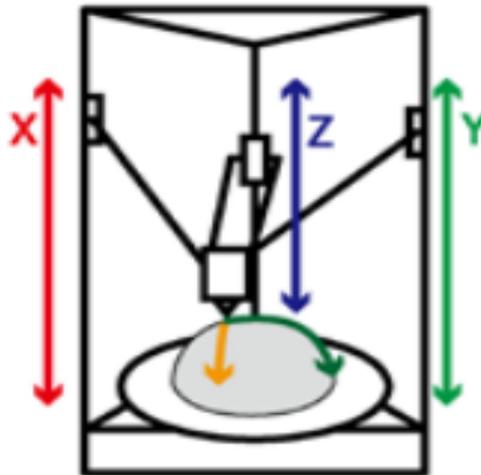
Jenis mesin ini bekerja dengan koordinat Cartesian, namun bagian alasnya berbentuk bulat dengan *extruder* yang dipasangkan pada tiga titik. Titik-titik bergerak dari atas ke bawah hingga membuat gerakan *extruder* bebas pada koordinat sumbu X; Y; dan Z.



Gambar 14. *3D printer delta* (Redwood et al., 2017)

3. Tipe Polar

Teknologi mesin *3D printer* jenis polar menjadi salah satu tipe mesin yang sulit ditemukan di area pasaran, karena penempatan posisi tipe *3D printer* polar tidak dapat ditentukan titik koordinatnya (X; Y; dan Z) hanya berdasarkan sudut dan panjang. Prinsip kerja tipe *3D printer* ini bergerak dengan bersama-sama dengan *extruder* bekerja ke arah vertikal atas dan bawah.



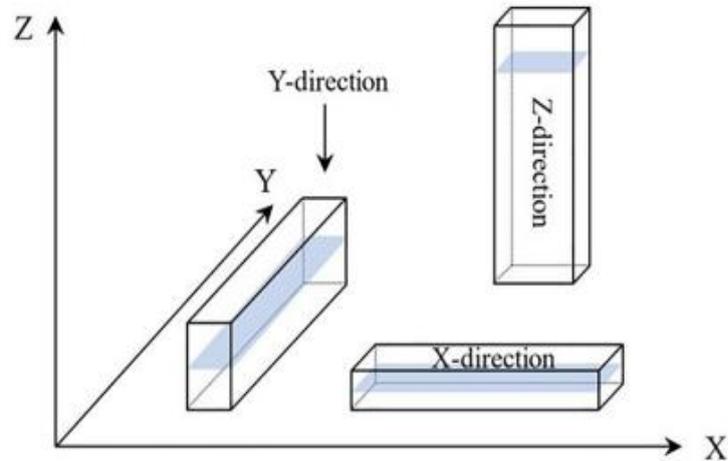
Gambar 15. *3D printer polar* (Redwood et al., 2017)

Perkembangan teknologi ini, memberikan manfaat pesat terhadap kemajuan dalam bidang industri dan riset, sebagai berikut :

1. Mengurangi *lead time* dalam memproduksi objek desain;
2. Meningkatkan potensi untuk memvisualisasikan bagian geometri karena keberadaan fisiknya secara nyata;
3. Meminimalisir kesalahan desain;
4. Mengurangi limbah material dan biaya yang efisien.
5. Melalui proses *layer manufacturing*, sehingga objek yang dibuat tidak dibatasi dengan tingkat kompleksitas/kerumitan geometri, dimana kondisi tersebut tidak dikerjakan dengan proses konvensional.

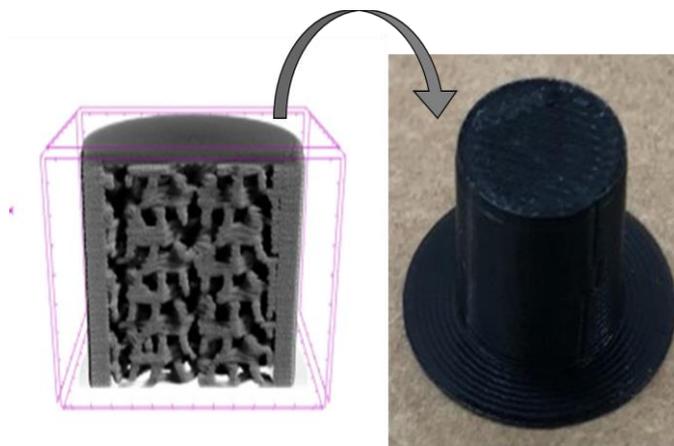
Dalam pengaplikasian teknologi pencetakan *3D* terdapat berbagai parameter yang dikendalikan dengan bantuan *slicer* yang akan menentukan hal-hal seperti nilai kualitas (*quality*), waktu pencetakan (*print time*), kecepatan proses (*speed rate process*) dan kekuatan produk yang dihasilkan diantaranya sebagai berikut:

- a. *Build orientation* merupakan menggambarkan cara kerja dimana komponen yang diberikan dapat disesuaikan pada platform/bed printer dengan tiga sumbu utama yaitu X, Y dan Z dari mesin yang akan digunakan.



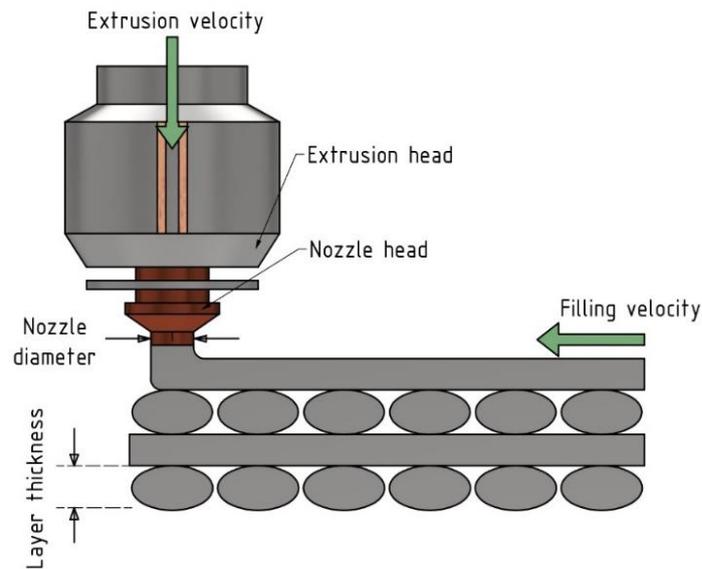
Gambar 16. Representasi build orientation (Feng et al., 2019)

- b. *Infill* merupakan kepadatan pengisi menunjukkan volume material yang dicetak pada komponen. Kepadatan pengisi secara langsung mendominasi sifat komponen yang dicetak. Parameter *infill* dalam bentuk nilai persentase berapa banyak model solid yang diberikan pengisi dengan material saat dicetak dan bentuk dari pemilihan *infill* itu sendiri (*infill pattern geometry*).

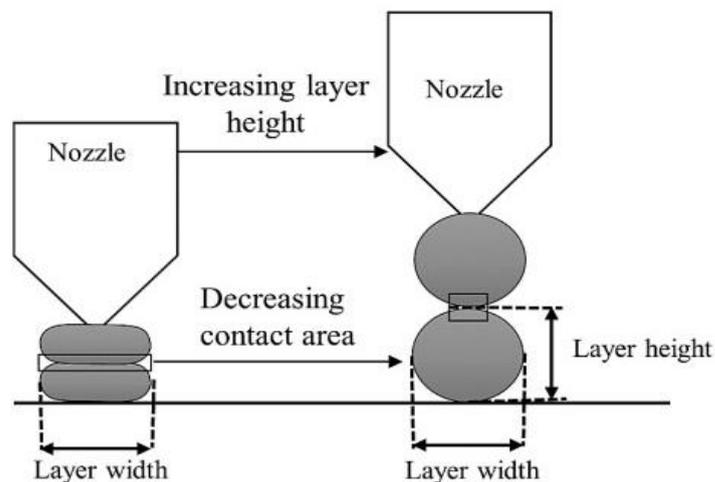


Gambar 17. Ilustrasi parameter *infill density* (Tao et al., 2021)

- c. *Layer thickness* (ketebalan lapisan) adalah parameter utama yang mempengaruhi kualitas cetak karena menentukan ketebalan setiap lapisan yang sedang dicetak. Semakin rendah angkanya, semakin tipis setiap lapisan, semakin baik kualitas yang didapatkan dari cetakan *3D*. Namun menurunkan ketebalan lapisan juga berarti lebih banyak lapisan akan diperlukan untuk dicetak dan waktu yang dibutuhkan untuk pencetakan *3D* dapat meningkat secara signifikan.



Gambar 18. Ilustrasi proses terbentuknya parameter *layer thickness*



Gambar 19. Ilustrasi terbentuknya *beads layer* (Carneiro et al., 2015)

- d. *Extruder temperature* adalah suhu dimana *extruder* mencairkan filamen yang diperlukan saat mencetak. Suhu yang tepat ini tergantung pada bahan yang digunakan, nilai standar 230°C biasanya digunakan untuk mencetak menggunakan filamen PLA atau ABS, namun filamen fleksibel biasanya memerlukan suhu *extruder* yang lebih rendah.
- e. *Printer speed* (*kecepatan pencetakan*) adalah kecepatan dimana kepala cetak bergerak saat mengekstrusi filamen untuk menciptakan representasi fisik model 3D.
- f. *Movement speed* (*kecepatan gerakan*) adalah kecepatan kepala pencetakan bergerak saat tidak mengekstrusi filamen.

II.6 Solidworks

Solidworks merupakan program perangkat lunak *Computer-Aided Design* (CAD), *Computer Aided Manufacture* (CAM), *Computer Aided Engineering* (CAE) yang dipopulerkan menjadi media untuk membantu proses desain suatu objek hingga menciptakan produk dengan mudah yang dikembangkan oleh Dassault Systems. Kini solidworks implementasi dalam industri menjadi peranan penting karena mampu mengubah sketsa 2D menjadi bentuk 3D meskipun dari rancangan sederhana maupun rumit (Mulyana. Wira, 2016).



Gambar 20. Solidworks
(SolidWorks Corporation, n.d.)

1993	SolidWorks Corp didirikan oleh Jon Hirschtick untuk membangun perusahaan yang mengembangkan perangkat lunak CAD 3D di Concord, Massachusetts.
1995	SolidWorks untuk pertama kali di release dan dikirimkan kepada customer.
1997	Dassault Systems mengakuisisi SolidWorks.
2001	Dassault Systems mengakuisisi Structural Research and Analysis Corporation untuk melakukan analisa simulasi.
2006	Dassault Systems mengakuisisi Conisio untuk memperkuat portofolio SolidWorks di bidang Product Data Management.
2007	Dassault Systems mengakuisisi Seemage untuk menambahkan 3DVIA Composer kedalam Product SolidWorks untuk pembuatan assembly
2012	SolidWorks Plastic dan SolidWorks Electrical ditambahkan untuk memperkuat portofolio SolidWorks.
2014	Menambahkan 3D EXPERIENCE Solution dan SolidWorks Inspection.
2015	Solidworks menambahkan MBD (Model Base Definition) fungsi ini membantu customer mendefinisikan, mengorganisir dan mem publis 3D Product manufacturing information.

Gambar 21. Proses perkembangan Solidworks (Mulyana. Wira, 2016)

Perangkat lunak aplikasi solidworks ini tentu menjadi aset industri untuk melakukan pemodelan objek atau produk yang akan memiliki nilai fungsional,

berbagai keunggulan dari penerapan aplikasi solidworks sebagai berikut:

1. *User friendly* mudah diterapkan;
2. Kemampuan melakukan perhitungan material dan desain sistem produksi;
3. Penggambaran *3D* sangat baik dan *render* realistis diatas Autodesk;
4. Aplikasi yang sangat mudah untuk di gabungkan dengan *software* analisa yang lain, seperti ANSYS;
5. Relatif lebih ringan run di komputer ketika dilakukan simulasi.

II.7 Ultimaker Cura Slicer

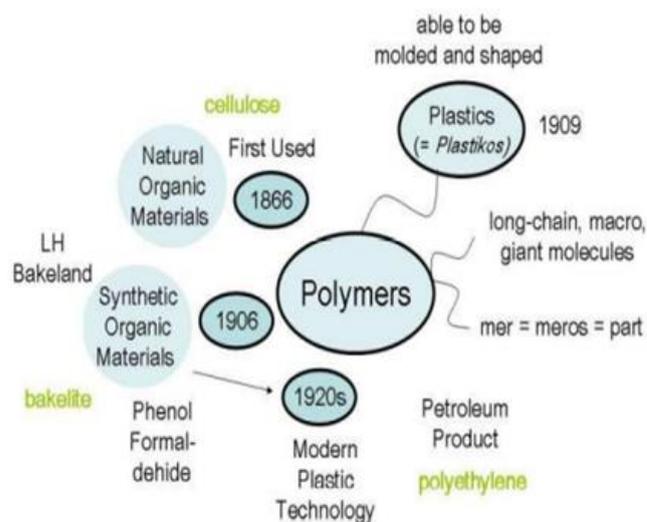
Objek *3D* model desain terlebih dahulu diolah menggunakan *software* pemotong yang disebut *slicer*. Cura merupakan salah satu perangkat lunak aplikasi pengiris *open-source* untuk printer *3D* yang dirancang oleh David Braam kemudian dikomersilkan oleh Ultimaker, sebagai perusahaan industri manufaktur yang penerapannya pada printer *3D* (“Cura home page,” n.d.; “Professional 3D printing made accessible | Ultimaker,” n.d.). Awal mula Cura diperkenalkan Affero General *public license* kemudian mengalami kemajuan diubah menjadi LGPLv3, dengan memberikan perubahan integrasi pada pengaplikasian CAD yang akan dirancang. Beberapa *plugin* CAD yang mendukung perangkat lunak *slicer* Ultimaker Cura dalam proses kerja produksi, diantaranya Solidworks dan Siemens NX (“Ultimaker Cura and Cura Connect launch at TCT 2017 - 3D Printing Industry,” n.d.) membantu para desainer dan insinyur dalam menghasilkan objek produk berdasarkan kebutuhan manufaktur.



Gambar 22. Ultimaker Cura
 (“Professional 3D printing made accessible | Ultimaker,” n.d.)

Perangkat lunak Ultimaker Cura bertujuan untuk menghasilkan bahwa produk yang dalam kondisi kompatibilitas, keandalan dan kinerja yang didukung dengan jenis *file* yang kompatibel misal *STL*; *OBJ*; *X3D*; *3MF*; *BMP*; *GIF*; dan *JPG*. Perangkat ini mampu menerjemahkan potongan desain menjadi program *g.code* yang akan memberi instruksi kepada mesin printer 3D (Kang et al., 2020). Namun sebelum proses produksi, *slicer* Ultimaker Cura dilakukan pengaturan pada parameter pencetakan yang diinginkan (Hartcher-O'Brien et al., 2019). Kemudian *slicer* ini akan menentukan cara kerja suatu model produk yang akan dicetak oleh mesin printer 3D. Kemajuan aplikasi Ultimaker Cura menjadi populer dalam industri, seperti pada sektor industri yang bergerak di bidang otomotif; perkakas; arsitektur, dan sebagainya hingga pengaplikasiannya dengan tipe printer lain sangat mudah.

II.8 Polimer

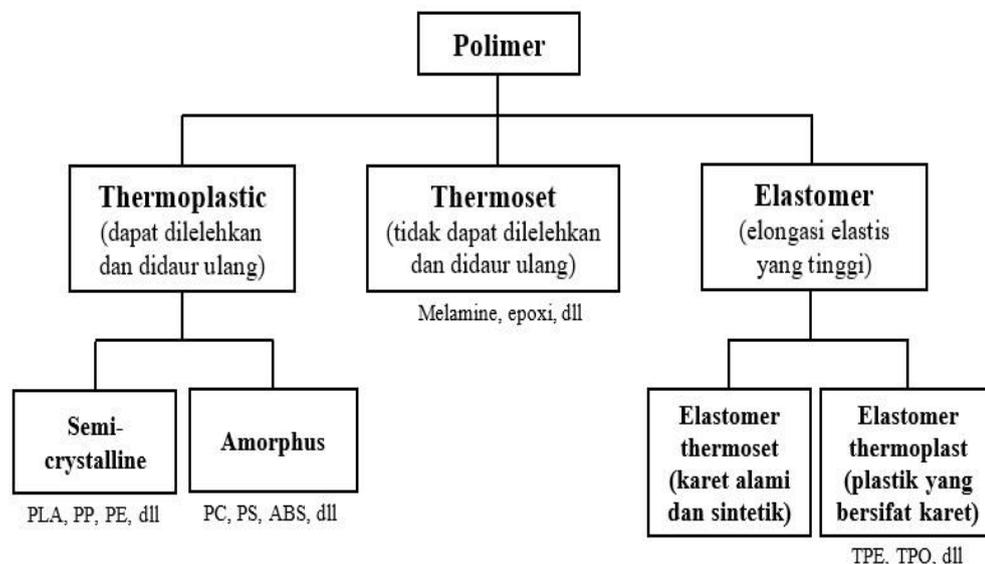


Gambar 23. Perkembangan polimer

Polimer berasal dari kata “*poli*” yang artinya banyak dan “*mer*” yang berarti satuan. Dalam istilah, polimer merupakan molekul rantai panjang yang tersusun dari molekul besar dari struktur yang identik. Identik struktur didefinisikan sebagai unit yang terdiri dari dua atau lebih molekul untuk membentuk rantai panjang. Perkembangan polimer semakin pesat dimana beberapa komponen logam dan kayu telah digantikan dengan bahan tergolong plastik. Keunggulan polimer memiliki massa jenis yang rendah; kekakuan

(*stiffness*) rendah, permukaan tidak sangat kasar, tingkat konduktivitas panas lebih rendah dibandingkan material yang berasal dari logam (Hadi, 2017). Polimer diperkenalkan sebagai material isolator, karena mempunyai ketahanan lebih besar daripada logam, yaitu sekitar 10^{20} . Jenis material polimer rentan terhadap larutan organik, minyak dan bahan bakar. Material polimer mengalami proses penuaan yang lama karena dipengaruhi atmosfer ozon (O_3) dan sinar matahari sehingga polimer yang awalnya dikatakan material *ductile* akan menjadi *brittle*.

Polimer diamati dengan menganalisis morfologi polimer berdasarkan ketidakteraturan yang ditunjukkan oleh rantai molekul. Daerah yang teratur disebut kristal dan yang tidak teratur adalah amorf. Di daerah kristal, rantai polimer tersusun teratur dengan gaya antarmolekul yang kuat. Namun biasanya, dalam polimer kristal, ditemukan daerah teratur dan tidak teratur hal ini disebut polimer semikristalin. Polimer dengan jenis amorf memiliki morfologi tidak teratur pada rantai dan terlihat kaku. Polimer sendiri memiliki sifat fisis seperti kelenturan (*elongation*); kelelahan (*melting index*); kekerasan (*hardness*) yang dipengaruhi struktur molekul (arsitektur polimer; ikatan di dalam rantai; bentuk kristal dan amorf) dan berat molekul.

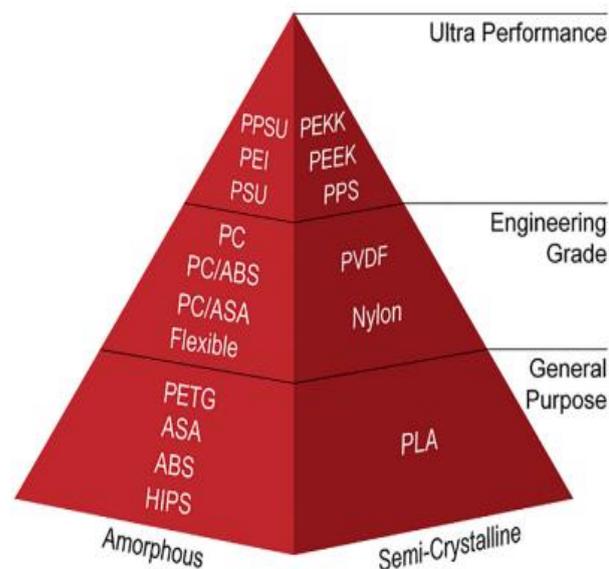


Gambar 24. Diagram klasifikasi polimer

Kini sistem manufaktur adiktif menggunakan bahan mentah utama yaitu jenis filamen polimer termoplastik sebagai pembentukan ikatan antar lapisan selama proses pencetakan dan kemudian memadat (*solid*) pada suhu ruangan tertentu (Kristiawan et al., 2021). Teknologi FDM menggunakan material

termoplastik yang dimana polimer akan berubah menjadi cairan ketika mengalami panas kemudian material keluar melalui nozel menuju platform (Samyano et al., 2019).

Termoplastik merupakan suatu polimer yang dipanaskan (*“termo”*) akan menjadi lunak dan meleleh hingga dapat dibentuk (*“plastis”*) saat didinginkan. Termoplastik sendiri diperoleh dari sifat plastik ini yang dapat diproduksi ulang dengan cara pemanasan. Plastik memiliki karakteristik material mekanik, seperti kekuatan; kekakuan; kekerasan; dan ketangguhan. Material termoplastik adalah salah satu jenis bahan khusus dengan panas yang unggul dan resistensi yang baik (Youcai, 2017). Pada proses FDM, filamen yang populer untuk digunakan terbuat dari polimer murni dengan karakteristik leleh yang rendah, seperti *polylactic acid*, *acrylonitrile butadiene styrene*, *polypropylene* (Solomon et al., 2020).



Gambar 25. Perbedaan bahan polimer yang digunakan AM (Saldívar-Guerra and Vivaldo-Lima, 2013)

II.8.1 *Polylactic Acid*

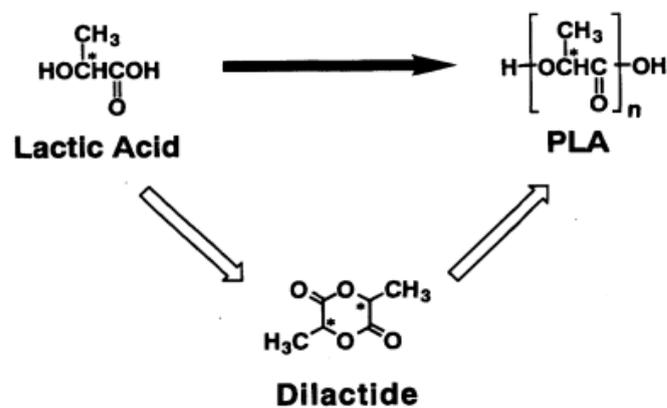
Poli asam laktat atau *polylactic acid* (PLA) merupakan kelas polimer biodegradable yang diperoleh dari asam laktat termasuk ke dalam golongan poliester alifatik yang dapat terdegradasi maupun diuraikan di dalam tanah yang dikembangkan berbagai bidang aplikasi, dan banyak dikembangkan dalam lingkup medis karena kompatibilitasnya yang aman secara metabolik (Kristiawan et al., 2021). Material PLA seutuhnya berasal dari bahan baku yang

dapat didaur ulang seperti jagung, gula, gandum, dan bahan – bahan yang memiliki pati dalam jumlah banyak. Material PLA dikenal sebagai polimer termoplastik *biodegradable* yang disusun oleh monomer – monomer asam laktat. Kemudian mengalami polimerisasi asam laktat yang akan dibentuk PLA. Material ini bersifat *biodegradable* karena memiliki beberapa gugus hidroksil pada ujung rantainya dan *biokompatibel* yang artinya polimer ini dapat diterima dalam tubuh tanpa menimbulkan efek berbahaya.



Gambar 26. Siklus produksi PLA di alam

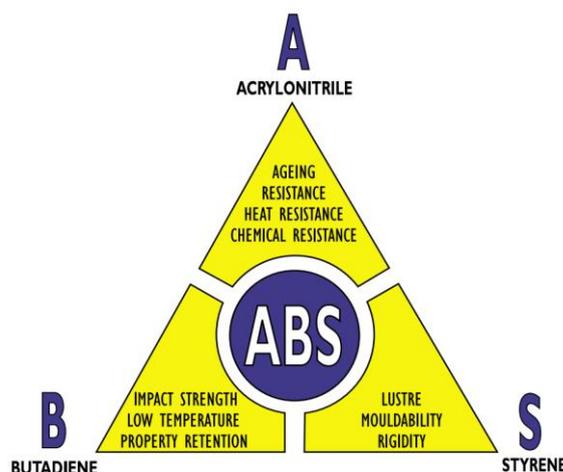
Polylactic Acid diproduksi dari monomer asam laktat dapat melalui dua proses yang dikenal dengan jalur *polikondensasi* langsung dan jalur polimerisasi pembukaan cincin. Asam laktat untuk proses tersebut diperoleh dari fermentasi gula asam laktat diubah menjadi laktida dan akhirnya menjadi PLA. Material PLA memiliki struktur *semicrystalline* dengan polimer yang mengkilap, kaku dan tidak berwarna (Farah et al. 2016).



Gambar 27. Skema produksi PLA

II.8.2 Acrylonitrile Butadiene Styrene

Material ABS merupakan campuran dan kopolimer akrilonitril, butadiena dan polimer yang mengandung *styrene-acrylonitrile* (SAN) atau karet nitril. Nitril adalah karet dan SAN merupakan kaca dan suhu ruangan yang menjadikan bahan amorf, tangguh, dan tahan benturan (Peterson, 2019). ABS mempunyai morfologi struktur yang kompleks dengan beragam komposisi dan efek adiktif yang menjadikannya buruk (Kristiawan et al., 2021). Namun, ABS mempunyai kekuatan dan keuletan yang tinggi, ketahanan kimia yang baik, kualitas estetika yang baik bahkan tahan terhadap paparan sinar ultraviolet dan tidak beracun ataupun bernoda (Torrado Perez et al., 2014). Kini penggunaan ABS sudah banyak digunakan dalam industri manufaktur, misal pembuatan komponen pesawat terbang; bagian alat otomotif; dan prototipe mesin. Selain itu dibidang kesehatan material ini sering kali diaplikasikan sebagai pembuatan produk kaki palsu.



Gambar 28. Monomer ABS

Berdasarkan kandungan monomer ABS yang dikutip dalam buku Sains Kimia, n.d.) sebagai berikut :

1. Akrilonitril: diproduksi secara sintetis dari amonia dan propilena. Ini adalah cairan tidak berwarna dan mudah menguap dengan bau menyengat seperti bawang putih. Monomer ini membuat ABS tahan bahan kimia dan stabil pada suhu tinggi.
2. Butadiena: adalah gas sintetis tidak berwarna dengan bau aromatik ringan. Meskipun tidak ada konsumen yang menggunakan butadiena, butadiena digunakan sebagai perantara monomer dan kimiawi untuk

menghasilkan berbagai polimer. Di ABS, komponen ini berkontribusi pada ketangguhan dan kekuatan benturan.

3. Stirena: adalah cairan sintesis tidak berwarna yang mudah menguap dan berbau harum. Miliaran *pound* diproduksi setiap tahun untuk membuat produk seperti plastik, pipa, *fiberglass*, dan karet. Ini memberikan kemampuan proses dan kekakuan pada polimer ABS.

II.9 Kekasaran Permukaan (*Surface Roughness*)

Kekasaran permukaan merupakan suatu karakteristik permukaan dan ketidakraturan konfigurasi permukaan berupa guratan yang terlihat pada profil permukaan. Konfigurasi permukaan merupakan suatu karakteristik geometri golongan *microgeometri*, yang termasuk golongan *macrogeometri* adalah permukaan secara keseluruhan yang membuat bentuk atau rupa yang spesifik, misalnya permukaan lubang, permukaan poros, permukaan sisi dan lain-lain yang tercakup pada elemen geometri ukuran, bentuk dan posisi. Faktor yang mempengaruhi nilai kekasaran antara lain: mekanisme parameter proses, dimensi dan geometri objek, dan cacat pada material (Bika Pratama, 2021). Kekasaran permukaan diindikasikan sebagai jarak penyimpangan rata-rata dari garis rata-rata profil. Adapun profil –profil pada kekasaran permukaan yaitu:

1. Profil Geometris Ideal (*Geometrically Ideal Profile*)

Profil ini merupakan profil dari geometris permukaan yang ideal yang dapat berupa garis lurus, lingkaran, dan garis lengkung.

2. Profil Referensi (*Reference Profile*)

Profil ini digunakan sebagai dasar dalam menganalisis karakteristik dari suatu permukaan. Bentuknya sama dengan bentuk profil geometris ideal, tetapi tepat menyinggung puncak tertinggi dari profil terukur pada panjang sampel yang diambil dalam pengukuran.

3. Profil Terukur (*Measured Profile*)

Profil terukur adalah profil dari suatu permukaan yang diperoleh melalui proses pengukuran.

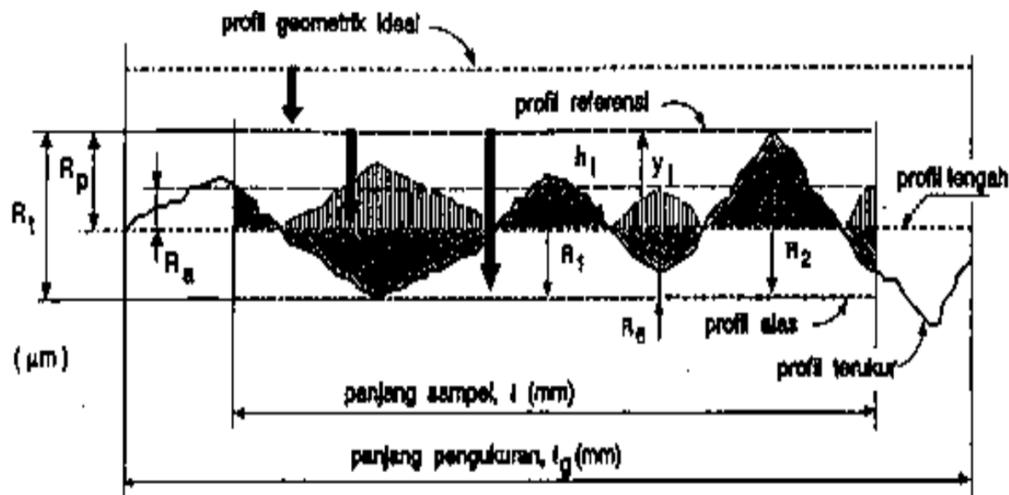
4. Profil Dasar (*Root Profile*)

Profil dasar adalah profil referensi yang digeserkan ke bawah hingga tepat pada titik paling rendah pada profil terukur.

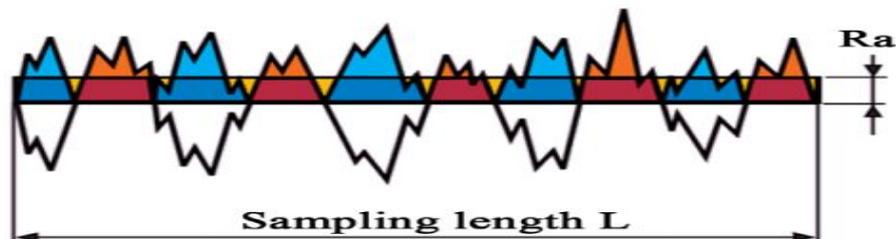
5. Profil Tengah (*Centre Profile*)

Profil tengah adalah profil yang berada di tengah-tengah dengan posisi sedemikian rupa sehingga jumlah luas bagian atas profil tengah sampai pada profil terukur sama dengan jumlah luas bagian bawah profil tengah sampai pada profil terukur.

Proses pemesinan kualitas kekasaran permukaan adalah nilai kekasaran rata-rata aritmatik (R_a) Gambar 24 yaitu, sebagai standar kualitas permukaan dari hasil objek yang dihasilkan. Profil permukaan ditunjukkan pada Gambar 23.



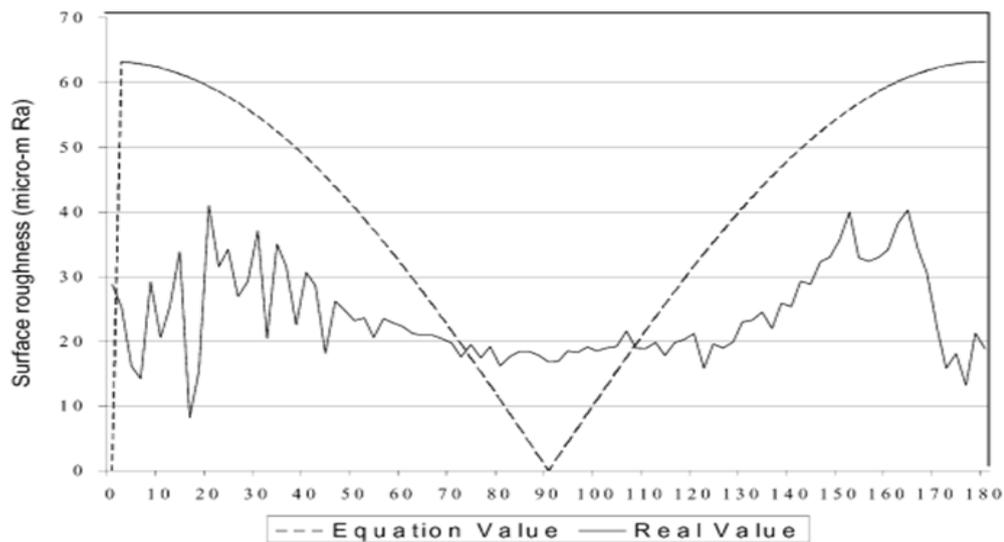
Gambar 29. Grafik Profil Permukaan (Riyanto Rio, 2016)



Gambar 30. Illustration Arithmetical mean height (Alsoufi and Elsayed, 2018)

Kekasaran permukaan (*surface roughness*) merupakan salah satu indikator penting dalam manufacturing, karena sebagian besar komponen memerlukan kekasaran permukaan yang rendah akibatnya permukaan yang diharapkan sedemikian mungkin menjadi halus. Semakin halus permukaan, maka semakin tinggi biayanya (Prayogi, 2019). Kualitas cetak dicapai jika objek cetak memenuhi persyaratan spesifikasi yang mencakup ukuran/dimensi (*dimensional*); pola (*form*) serta tingkat kekasaran permukaan (*surface roughness*). Karakteristik

bentuk yang sempurna dari suatu komponen adalah menghasilkan permukaan yang halus, namun kenyataannya tidak ada komponen dengan bidang permukaan yang halus. Karena setiap bidang permukaan tidak selalu diperlukan bidang yang licin, sebab besar kecilnya tingkat kekasaran permukaan tergantung dari pelaksanaan suku cadang. Laju proses pendinginan (*cooling*) pada material termoplastik memengaruhi permukaan, yang dimana pada tahap pendinginan lebih lambat menghasilkan material yang kuat dan relatif kaku (A. Abuzar et al., 2010).



Gambar 31. Surface roughness data for fused deposition modeling (Campbell et al., 2002)

Tabel 1. Nilai kekasaran *additive manufacturing process*

<i>Additive manufacturing process</i>	<i>Surface roughness data in Ra (μm)</i>
<i>Stereolithography (SLA)</i>	5-40 μm
<i>Jetting</i>	5-30 μm
<i>Fused Deposition Modeling (FDM)</i>	9-41 μm
<i>Lamination</i>	8-28 μm
<i>3DP Selective Bonding</i>	12-23 μm

Sumber: (Campbell et al., 2002; Taşcıoğlu et al., 2022)

II.10 Design of Experiment

Desain of Experiment (DoE) diperkenalkan sebagai bidang statistik yang berhubungan dengan perencanaan, analisis, dan pelaksanaan untuk mengevaluasi terkait faktor-faktor yang mengontrol nilai parameter atau kelompok parameter dengan beberapa faktor *input* divariasi untuk menentukan pengaruhnya terhadap

output (respons) yang diinginkan (Plaosan, 2021). Metode DOE dimanfaatkan sebagai alat pengumpulan dan analisis data yang kuat dalam kondisi eksperimental. Pengaplikasian metode *DoE* diidentifikasi suatu rancangan percobaan pada setiap langkah dan tindakan dengan benar-benar untuk mengumpulkan informasi yang berhubungan dengan persoalan yang sedang diteliti. Proses desain eksperimen bertujuan sebagai langkah awal yang perlu diambil sebelum eksperimen dilakukan supaya data yang semestinya dapat diperoleh. Pada desain percobaan informasi yang sebanyak-banyaknya diperoleh atau dikumpulkan kemudian digunakan selama proses penelitian. Ada beberapa jenis dari desain percobaan antara lain desain pra-eksperimental, desain eksperimental semu dan desain percobaan. Dalam penerapannya metode *Design of Experiment* dimana proses desain rancangan dengan memanfaatkan bantuan perangkat lunak Minitab.

II.11 Taguchi's Method

Metode *Taguchi* diperkenalkan luas di bidang teknik industri sebagai metode ide baru yang bertujuan untuk memperbaiki kualitas produk dan desain proses parameter yang kuat dalam waktu yang bersamaan dimana menekankan biaya dan sumber daya yang digunakan seminimal mungkin (Yuangyai and Nembhard, 2010). Metode *taguchi* berupaya mencapai sasaran dengan menjadikan produk atau proses dengan meningkatkan *market share* industri terhadap berbagai faktor seperti misalnya material, perlengkapan manufaktur, sumber daya manusia, dan kondisi operasional. Metode *taguchi* menjadikan produk atau proses bersifat kokoh terhadap faktor gangguan, karenanya metode ini disebut juga sebagai perancangan kokoh (*robust design*).

Keunggulan dari metode *taguchi* dalam desain eksperimen yaitu metodenya lebih efisien karena memungkinkan untuk melaksanakan penelitian yang melibatkan banyak faktor dan jumlah, memungkinkan diperolehnya suatu proses yang menghasilkan produk yang konsisten dan kokoh terhadap faktor yang tidak dapat dikontrol, dan metode *taguchi* menghasilkan kesimpulan mengenai respon faktor – faktor dan level dari faktor – faktor kontrol yang menghasilkan respon optimum (Soejanto, 2009). Namun kekurangan metode ini dibandingkan metode adalah pada rancangannya mempunyai struktur yang sangat kompleks, dimana

terdapat rancangan yang mengumpangkan pengaruh interaksi dan pengaruh utama yang cukup signifikan. Sehingga untuk mengatasinya perlu dilakukan pemilihan rancangan percobaan sesuai dengan tujuan penelitian.

Metode *taguchi* menggunakan matriks khusus yang disebut *matriks orthogonal*, yang menjadi bagian terpenting dalam metode ini adalah pemilihan kombinasi level variabel-variabel input pada setiap eksperimen (Soejanto, 2009). Dalam metode *taguchi* tingkat tahapan analisis dilakukan untuk mengumpulkan, mengolah, menghitung serta menyajikan data dalam suatu *layout* tertentu sesuai dengan desain yang dipilih pada eksperimen. Beberapa tahapan analisis yang akan digunakan pada desain eksperimen *taguchi* adalah sebagai berikut :

- a) SNR Metode *taguchi* telah mengembangkan konsep SNR (*Signal to Noise ratio*) untuk eksperimen yang melibatkan banyak faktor. SNR diformulasikan untuk memilih nilai level faktor untuk mengoptimalkan karakteristik kualitas dari eksperimen. Oleh karenanya metode perhitungan SNR tergantung pada karakteristik kualitas, apakah respon semakin kecil, semakin baik, semakin besar semakin baik, atau tertuju pada nilai tertentu. Berikut ini adalah Rasio S/N yang dituju pada penelitian, sebagai berikut;

- 1. Semakin kecil, semakin baik merupakan karakteristik kualitas dengan batas nilai 0 dan non negatif. Nilai semakin kecil (mendekati nol adalah yang diinginkan).

$$S/N = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{y_i^2}{n} \right] \dots\dots\dots(1)$$

- 2. Tertuju pada nilai tertentu, merupakan karakteristik kualitas dengan nilai atau target tidak nol dan terbatas. Dengan kata lain nilai yang mendekati suatu nilai yang ditentukan adalah yang terbaik.

$$S/N = 10 \log_{10} \left[\frac{\mu^2}{\sigma^2} \right] \dots\dots\dots(2)$$

- 3. Semakin besar, semakin baik merupakan karakteristik kualitas dengan rentang nilai tak terbatas dan non negatif.

$$S/N = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{y_i^2} \right) \right] \dots\dots\dots(3)$$

y_i = data pengamatan ke-i
 μ = mean
 σ = deviasi