

## DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN TESIS	ii
DAFTAR ISI	iv
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN	xiii
INTISARI	xv
<i>ABSTRACT</i>	xvi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 <i>Staircase Effect</i>	5
2.2 Pengujian Performa Mesin Produksi	6
2.2.1 Kelurusan pada setiap sumbu	7
2.2.2 Kesejajaran antar sumbu linear.	7
2.2.3 <i>Squareness</i> antar sumbu	8
2.2.4 Kebundaran	8
2.3 <i>Post Processing</i> Hasil Cetak 3D Printing FDM	9
2.4 Perkembangan Modifikasi AM dengan CNC <i>Machining</i>	13
BAB III LANDASAN TEORI	22
3.1 <i>Additive Manufacturing</i>	22
3.2 <i>Fused Deposition Modelling</i>	24
3.3 <i>CNC Milling</i>	25

3.4	Pengujian Performa Mesin	26
3.4.1	Pengujian Akurasi Dimensi	26
3.4.2	Pengujian <i>Squareness</i>	27
3.4.3	Pengujian Kesejajaran	27
3.4.4	Pengujian Kebundaran	27
3.4.5	Pengujian Ketegaklurusan	27
3.5	Pengujian Kekasaran	27
3.6	Pengujian Akurasi Dimensi	29
BAB IV METODE PENELITIAN		31
4.1	Lokasi Penelitian	31
4.2	Alat Penelitian	31
4.3	Bahan Penelitian.	42
4.4	Diagram Alir Penelitian	44
4.5	Tahapan Penelitian	45
4.5.1	Pembuatan Desain Modifikasi <i>3D Printer Milling</i>	46
4.5.2	Pengaturan <i>Firmware</i>	48
4.5.3	Pembuatan Prototipe	48
4.5.4	Pengujian dan Finalisasi Prototipe	48
4.5.5	Pembuatan Komponen Final	48
4.5.6	Pengujian Performa Mesin	49
4.5.7	Pengujian Pembuatan Benda Kerja	51
4.5.8	Evaluasi Benda Kerja	52
4.5.9	Analisis Hasil	53
BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN		54
5.1	Desain Model dan Langkah Perakitan <i>3D Printing Milling</i>	54
5.1.1	Desain Model	54
5.1.2	Langkah Perakitan	58
5.2	Hasil <i>3D Printer Milling</i>	61
5.2.1	Prototipe	61

5.2.2	3D <i>Printing Milling</i>	62
5.2.3	Pengaturan <i>Firmware</i> dan Kalibrasi	63
5.2.4	Pengujian Akurasi Dimensi	66
5.2.5	Pengujian <i>Squareness</i> dan Kesejajaran.	67
5.2.6	Pengujian <i>Roundness</i> .	69
5.2.7	Pengujian Ketegaklurusan.	70
5.3	<i>Bill of Material</i>	71
5.4	Prosedur Pengoperasian	73
5.4.1	Autodesk Fusion 360	73
5.4.2	Persiapan <i>Printing</i> pada Fusion 360	77
5.4.3	Prosedur <i>Printing</i> pada Mesin	80
5.4.4	Pembuatan <i>Toolpath</i> pada Fusion 360	81
5.4.5	Prosedur <i>Milling</i> pada Mesin	86
5.5	Uji dan Evaluasi Manufaktur Benda Kerja	90
5.5.1	Pengujian Akurasi Dimensi	91
5.5.2	Pengujian Kekasaran dan Morfologi <i>Staircase Effect</i>	103
BAB VI PENUTUP		109
6.1	Kesimpulan	109
6.2	Saran	110
DAFTAR PUSTAKA		111

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	<i>Staircase effect</i> pada AM (Pérez dkk., 2021).	5
Gambar 2.2.	Nilai $R_a$ maksimum dan minimum terhadap <i>layer thickness</i> pada setiap metode AM (Pérez dkk., 2021).	6
Gambar 2.3.	Pengukuran kelurusan berdasarkan ASME B5.54-2005.	7
Gambar 2.4.	Pengukuran kesejajaran berdasarkan ASME B5.54-2005 dengan menggunakan laser.	7
Gambar 2.5.	Pengukuran <i>squareness</i> berdasarkan ASME B5.54-2005.	8
Gambar 2.6.	Pengukuran roundness berdasarkan ASME B5.54-2005, dengan <i>cross-grid encoder</i> .	9
Gambar 2.7.	Berbagai bentuk komponen ketika diberikan <i>exposure</i> pada <i>acetone</i> dalam durasi hingga 40 menit (Pestano dkk., 2022).	10
Gambar 2.8.	(a) Tahap <i>post processing</i> komponen dan (b) Perbandingan nilai $R_a$ dengan kedalaman pemakanan dengan orientasi pencetakan $9^\circ$ (Boschetto dkk., 2016).	11
Gambar 2.9.	(a) Area pengukuran kekasaran permukaan, (b) geometri spesimen kompleks, (c) nilai $R_a$ , dan (f) nilai $R_z$ pada spesimen dengan orientasi $0^\circ$ (Lalegani Dezaki dkk., 2020).	12
Gambar 2.10.	Nilai kekasaran pada permukaan (a) hasil <i>3D printing</i> dan (b) setelah dilakukan <i>post processing</i> dengan <i>milling</i> (Mehtedi dkk., 2023).	12
Gambar 2.11.	Siklus rancangan proses kombinasi AM dan CNC <i>machining</i> (Hur dkk., 2002).	13
Gambar 2.12.	(a) Diagram sirkuit sistem kontrol ArchLM, (b) <i>spindle</i> dan <i>welding depositio unit</i> , (c) hasil AM, dan (d) hasil dari	

	<i>post processing CNC machining</i> (Karunakaran dkk., 2010).	14
Gambar 2.13.	(a) Desain <i>rotary toolhead extruder</i> dan milling, (b) nilai pengukuran CMM pada profil desain dan yang terukut, (c) hasil pencetakan FDM tanpa milling, dan (d) hasil FDM setelah <i>milling</i> (Lee dkk., 2014).	15
Gambar 2.14.	Desain penggabungan AM dan <i>CNC machining</i> untuk mengatasi <i>misalignment</i> (Amanullah dkk., 2017).	16
Gambar 2.15.	Garis besar langkah <i>hybrid</i> AMSM (Chen & Frank, 2019).	17
Gambar 2.16.	Ilustrasi skema pemilihan AM, SM, dan ASHM pada suatu komponen yang akan dimanufaktur (He dkk., 2023) .	18
Gambar 3.1.	AM berdasarkan basis material cairan, padat, dan serbuk dan prosesnya (Nirish & Rajendra, 2020).	22
Gambar 3.2.	Alur proses <i>additive manufacturing</i> dari desain 3D hingga menjadi <i>3D object</i> (Awad dkk., 2018).	23
Gambar 3.3.	Diagram mekanisme <i>3D printer</i> FDM (Panjwani dkk., 2020).	24
Gambar 3.4.	(a) <i>Facemilling</i> , (b) <i>shoulder milling</i> , (c) <i>peripheral milling</i> , dan (d) <i>ball end milling</i> (Norberto López de Lacalle dkk., 2011).	26
Gambar 3.5.	Langkah pemrograman <i>CNC milling</i> (Altintas & Tulsyan, 2015).	26
Gambar 3.6.	Penunjukkan profil puncak, lembah, dan garis rata-rata (ASME, 2019).	28
Gambar 3.7.	Ilustrasi dari perhitungan <i>roughness average</i> (Ra) (ASME, 2019).	29
Gambar 4.1.	Creality CR10S Pro V2	31
Gambar 4.2.	Bigtreotech E3 RRF (kiri) dengan Ekspansi IDEX (kanan) (Bigtreotech Data Sheet).	33
Gambar 4.3.	Bigtreotech TFT 35 E3 V3 (Bigtreotech Data Sheet).	33
Gambar 4.4.	DC 775 <i>electric motor</i> (Hanpose).	34

Gambar 4.5.	Nema 17 <i>stepper motor</i> .	35
Gambar 4.6.	Contoh <i>extruder set</i> pada CR10S Pro V2.	36
Gambar 4.7.	Contoh <i>heating bed</i> pada CR10S Pro V2.	36
Gambar 4.8.	ER 11 Chuck Collet.	37
Gambar 4.9.	<i>End mill</i> .	37
Gambar 4.10.	Gerinda tangan.	38
Gambar 4.11.	Mesin <i>milling</i> .	38
Gambar 4.12.	<i>Scraper</i> .	39
Gambar 4.13.	<i>Leveling paper</i> .	39
Gambar 4.14.	Dino-lite AF4915.	40
Gambar 4.15.	Mitutoyo SJ210 <i>Surface roughness tester</i> .	40
Gambar 4.16.	Jangka sorong <i>digital</i> Mitutoyo.	41
Gambar 4.17.	<i>Radius gauge</i> .	41
Gambar 4.18.	<i>Tachometer</i> .	42
Gambar 4.19.	<i>Protractor</i> .	42
Gambar 4.20.	Rangka aluminium 2020 (kanan) dan 4020 (kiri).	43
Gambar 4.21.	eSun PLA+ <i>filament</i> .	43
Gambar 4.22.	Pelat aluminium.	44
Gambar 4.23.	Diagram alir penelitian.	45
Gambar 4.24.	Contoh desain IDEX pada 3D printer Climber 7 dengan dua <i>extruder</i> (Climber 7 Product Detail).	46
Gambar 4.25.	Konsep desain modifikasi 3D printer <i>miling</i> (a) tampak depan, (b) tampak isometric, (c) tampak depan detail, dan (d) tampak belakang detail.	47
Gambar 4.26.	Benda Kerja Pengujian Performa Mesin (A) pengujian akurasi dimensi, dan squareness (B) kesejajaran, (C) roundness, dan (D) ketegaklurusan.	51
Gambar 4.27.	Desain pengujian akurasi dimensi dan kekasaran permukaan.	52
Gambar 5.1.	Desain final dari 3D printing <i>milling</i> .	54
Gambar 5.2.	Komponen pada <i>carriage</i> X1.	55

Gambar 5.3.	Komponen pada <i>carriage</i> X2.	55
Gambar 5.4.	Komponen pada <i>gantry</i> .	56
Gambar 5.5.	Volume kerja dan komponen pegas pengatur kerataan pada bidang kerja.	57
Gambar 5.6.	Desain <i>control box</i> .	57
Gambar 5.7.	<i>Frame 3D Printing Milling</i>	58
Gambar 5.8.	<i>Gantry</i> yang telah dirakit.	59
Gambar 5.9.	Langkah perakitan <i>carriage</i> X1.	59
Gambar 5.10.	Langkah perakitan <i>carriage</i> X2.	60
Gambar 5.11.	<i>3D printing milling</i> yang telah dipasang <i>bed</i> .	60
Gambar 5.12.	Langkah pemasangan <i>gantry</i> , <i>carriage</i> X1, dan <i>carriage</i> X2.	61
Gambar 5.13.	Komponen prototipe (A) <i>gantry</i> , (B) <i>Carriage</i> X1, dan (C) braket <i>gantry</i>	62
Gambar 5.14.	(A) hasil akhir <i>3D printing milling</i> dan (B) bagian <i>control box</i> (C) <i>carriage</i> X1, dan (D) <i>carriage</i> X2.	63
Gambar 5.15.	(A) Tampilan source code Marlin dan (B) startup printer ketika instalasi selesai.	64
Gambar 5.16.	Kalibrasi pada (A) sumbu X1, (B) sumbu X2, (C) sumbu Y, (D), sumbu Z, dan (E) kerataan <i>gantry</i> dengan <i>waterpass</i>	66
Gambar 5.17.	Langkah pengaturan <i>milling</i> .	75
Gambar 5.18.	Langkah pengaturan <i>printing</i> .	77
Gambar 5.19.	Model benda uji.	78
Gambar 5.20.	Model yang telah diduplikasi.	78
Gambar 5.21.	Pengaturan pencetakan.	80
Gambar 5.22.	Langkah pencetakan pada mesin.	81
Gambar 5.23.	Langkah duplikasi proses FDM untuk manufacturing model 2.	82
Gambar 5.24.	Pengaturan <i>milling</i> .	83
Gambar 5.25.	Pengaturan mata potong.	83

Gambar 5.26.	Langkah pembuatan <i>toolpath</i> Contour.	85
Gambar 5.27.	(A) hasil akhir kombinasi <i>toolpath</i> dan (B) pengaturan <i>post processor</i> .	86
Gambar 5.28.	Langkah pemasangan mata motong.	87
Gambar 5.29.	<i>Tool</i> Measure dan koordinat yang telah diketahui.	88
Gambar 5.30.	Langkah untuk menyamakan koordinat X2 terhadap X1.	89
Gambar 5.31.	Penentuan RPM <i>spindle</i> .	90
Gambar 5.32.	Dua buah benda uji (A) <i>printing</i> dan (B) <i>printing</i> dan <i>milling</i> .	91
Gambar 5.33.	Orientasi model yang dicetak.	92
Gambar 5.34.	Visualisasi perbandingan akurasi pada setiap spesimen.	95
Gambar 5.35.	Observasi radius pada spesimen NM 0.2 (A) d9, (B) d10, dan (C) d11.	99
Gambar 5.36.	Observasi radius pada spesimen NM 0.1 (A) d9, (B) d10, dan (C) d11.	100
Gambar 5.37.	Observasi radius pada spesimen N 0.2 (A) d9, (B) d10, dan (C) d11.	101
Gambar 5.38.	Observasi radius pada spesimen N 0.1 (A) d9, (B) d10, dan (C) d11.	102
Gambar 5.39.	Visualisasi dengan grafik jaring mengenai skor radius.	103
Gambar 5.40.	Cacat akibat <i>overextrusion</i> dapat hilang (A) sebelum proses dan (B) sesudah <i>milling</i> .	103
Gambar 5.41.	Permukaan Ra3 sebelum dan sesudah proses <i>milling</i> (A) NM 0.2, (B) NM 0.1, (C) M 0.2, dan (D) M 0.1	105
Gambar 5.42.	Staircase effect yang telah berkurang setelah proses <i>milling</i> .	106
Gambar 5.43.	Cacat berupa void pada spesimen (A) M 0.2 dan (B) M 0.1 yang mengakibatkan perbedaan nilai kekasaran.	107
Gambar 5.44.	Visualisasi perbandingan kontur permukaan pada setiap spesimen.	108



## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1.	<i>Research Gap</i> pada perkembangan <i>post processing</i> dan penggabungan AM dan SM.	19
Tabel 4.1.	Spesifikasi mesin <i>3D printer</i> Creality CR10S Pro V2 (Creality Product Detail, 2023)	32
Tabel 4.2.	Spesifikasi Bigtreetech TFT 35 E3 V3 (Bigtreetech Data Sheet).	33
Tabel 4.3.	Spesifikasi DC 775 <i>electric motor</i> (Hanpose).	34
Tabel 4.4.	Spesifikasi Nema 17 stepper motor.	35
Tabel 4.5.	Spesifikasi <i>Extruder set</i> .	36
Tabel 4.6.	Spesifikasi <i>heating bed</i> .	37
Tabel 4.7.	Spesifikasi eSun PLA+ <i>filament</i> (eSUN PLA+ Filament PLA Plus 3D Printer Filament PLA Pro).	44
Tabel 4.8.	Parameter <i>printing</i> dan <i>milling</i> .	51
Tabel 4.9.	Variasi parameter <i>printing</i> dan <i>milling</i> .	51
Tabel 5.1.	Pengujian Akurasi.	67
Tabel 5.2.	Pengujian <i>Squareness</i>	68
Tabel 5.3.	Pengujian Kesejajaran	68
Tabel 5.4.	Pengujian <i>Roundness</i> .	69
Tabel 5.5.	Pengujian Ketegaklurusan	70
Tabel 5.6.	<i>Bill of Material</i> .	71
Tabel 5.7.	Hasil pengukuran dimensi	91
Tabel 5.8.	Nilai akurasi pada setiap sumbu X, Y, dan Z	93
Tabel 5.9.	Hasil perhitungan celah antara radius spesimen dan radius gage	96
Tabel 5.10.	Hasil konversi celah ke nilai skor	97
Tabel 5.11.	Hasil pengukuran kekasaran	104

## DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN

ABS	=	Acrylonitrile Butadiene Styrene	
AM	=	Additive Manufacturing	
ASHM	=	Additive Subtractive Hybrid Manufacturing	
ASME	=	American Society of Mechanical Engineers	
ASTM	=	American Society for Testing and Materials	
CAD	=	Computer Aided Design	
CAM	=	Computer Aided Machining	
CHCI	=	Comprehensive Hybrid Manufacturing Complexity Index	
CMM	=	Coordinate Measuring Machine	
CNC	=	Computer Numerical Control	
DC	=	Direct Current	
DLP	=	Digital Light Processing	
DPDT	=	Double Pole Double Throw	
EBF3	=	Electron Beam Freeform Fabrication	
EBM	=	Electron Beam Melting	
FDM	=	Fused Deposition Modelling	
IDEX	=	Independent Dual Extruder	
L	=	Panjang Evaluasi	(mm)
LCD	=	Liquid Crystal Display	
LMD	=	Laser Metal Deposition	
LT	=	Layer Thickness	
N	=	Jumlah Data	
PC	=	Personal Computer	
PLA	=	Polylactic Acid	
Ra	=	Roughness Average	( $\mu\text{m}$ )
RRF	=	RepRap Firmware	



SLA	=	Stereolithography	
SLM	=	Selective Laser Melting	
SLS	=	Selective Laser Sintering	
SM	=	Subtractive Manufacturing	
STL	=	Stereolithography	
TPU	=	Thermoplastic Polyurethane	
WAAM	=	Wire Arc Additive Manufacturing	
Z	=	Deviasi Profil	( $\mu\text{m}$ )