



**ANALISIS SIFAT LENTUR PRODUK *METAL 3D PRINTING* DENGAN
FILAMEN PLA-*STAINLESS STEEL***

SKRIPSI

Oleh

WAHYU AGUNG SABARIMAN

171910101044

PROGRAM STUDI STRATA 1 TEKNIK MESIN

JURUSAN TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS JEMBER

2021



**ANALISIS SIFAT LENTUR PRODUK *METAL 3D PRINTING* DENGAN
FILAMEN PLA-*STAINLESS STEEL***

SKRIPSI

Diajukan guna melengkapi tugas akhir dan memenuhi salah satu syarat untuk menyelesaikan Program Studi Strata 1 Teknik Mesin dan mencapai gelar Sarjana Teknik

Oleh

WAHYU AGUNG SABARIMAN

171910101044

PROGRAM STUDI STRATA 1 TEKNIK MESIN

JURUSAN TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS JEMBER

2021

PERSEMBAHAN

Puji syukur atas kehadiran Allah SWT, yang telah melimpahkan rahmat, nikmat, dan karunianya, sehingga skripsi dengan judul “Analisis Sifat Lentur Produk *Metal 3D Printing* Dengan Filamen *PLA-Stainless Steel*” ini dapat terselesaikan sesuai dengan waktu yang direncanakan. Skripsi ini disusun guna memenuhi salah satu syarat menyelesaikan pendidikan strata satu (S1) pada Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember.

Terima kasih penulis ucapkan kepada semua pihak yang telah mendukung penulis untuk menyelesaikan skripsi ini, termasuk rekan-rekan sekalian yang telah memberikan banyak dukungan kepada penulis. Skripsi ini saya persembahkan kepada:

1. Keluarga saya, yaitu Ayah saya Imam Fauzan, A.Md., Mama saya Tin Kurniyati, S.Sos., Adik saya Ifra Azizah Istighfarin Al Fauzan serta keluarga besar saya yang telah memberikan banyak sekali dukungan dan do'a yang tidak pernah hentinya sehingga menjadi semangat saya dalam menyelesaikan perkuliahan ini.
2. Bapak Ir. Mahros Darsin, S.T., M.Sc., Ph.D. sebagai pembimbing utama saya yang dengan sabar membimbing saya selama penelitian ini dan juga saya berterima kasih untuk dukungannya, baik berupa alat, waktu, maupun ilmu yang selama ini diberikan kepada saya, serta Bapak Muhammad Trifiananto, S.T., M.T. sebagai pembimbing anggota saya yang juga membimbing saya hingga saya dapat menyelesaikan skripsi ini.
3. Bapak Ir. Hari Arbiantara Basuki, S.T., M.T. selaku penguji utama dan bapak Dr. Ir. Agus Triono, S.T., M.T. selaku penguji anggota yang telah memberikan banyak sekali saran dan masukan terhadap skripsi saya agar skripsi saya menjadi lebih baik lagi.
4. Bapak Ir. Mahros Darsin, S.T., M.Sc., Ph.D. selaku pembimbing tim riset *Metal 3D printing* yang tidak ada lelahnya membimbing saya dan teman-teman, baik memberikan motivasi serta arahan selama riset dan penulisan skripsi hingga selesai.

5. Seluruh dosen Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember yang telah memberikan ilmunya selama perkuliahan ini. Semoga ilmu ini menjadi amal jariyah sehingga pahala ibu dan bapak dapat berlipat ganda dan ilmu ini dapat dimanfaatkan dengan sebaik-baiknya kedepannya.



MOTTO

"Sesungguhnya sesudah kesulitan ada kemudahan".

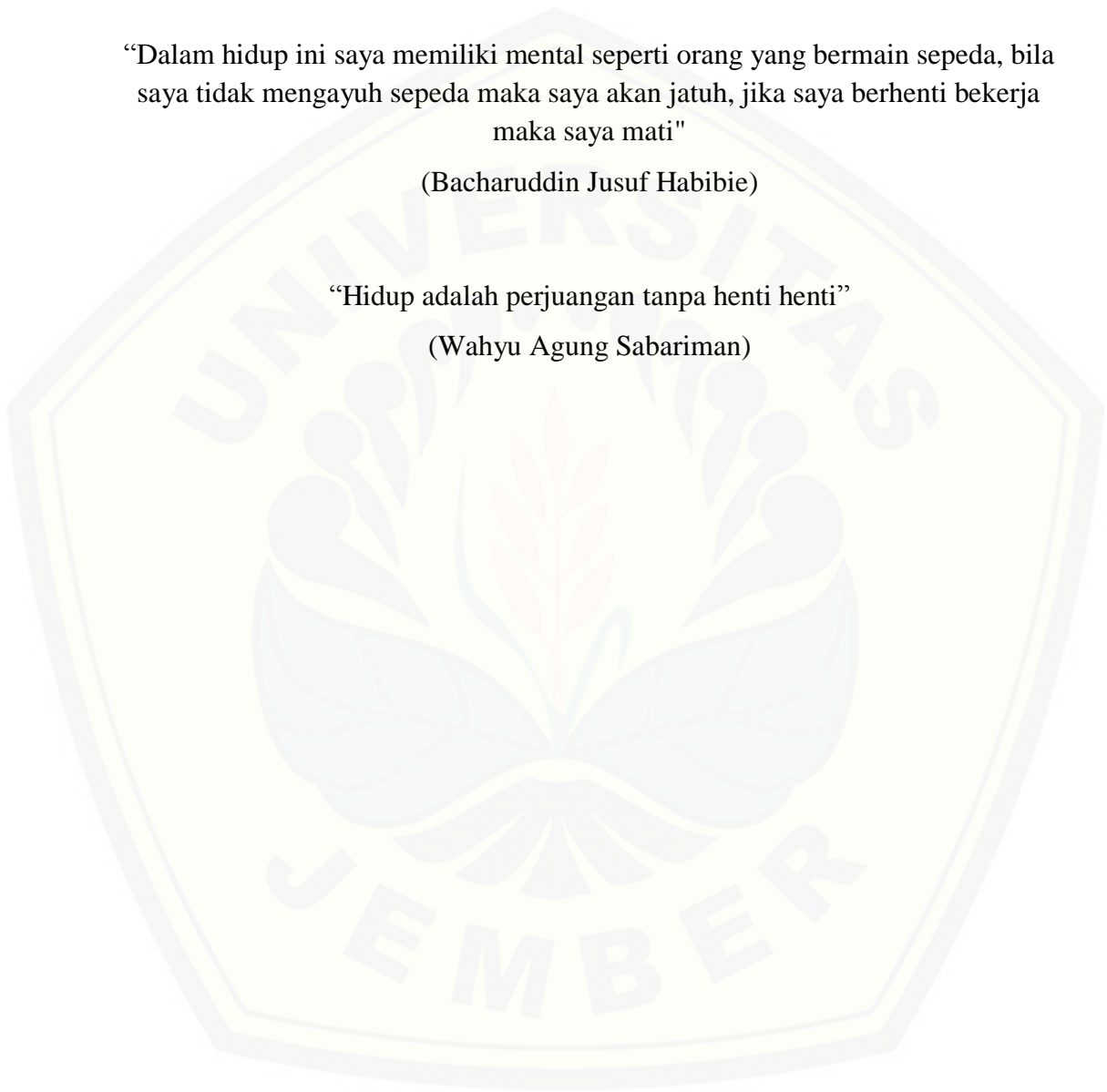
(Qur'an Surah Al-Insyirah ayat 5-6)

“Dalam hidup ini saya memiliki mental seperti orang yang bermain sepeda, bila saya tidak mengayuh sepeda maka saya akan jatuh, jika saya berhenti bekerja maka saya mati”

(Bacharuddin Jusuf Habibie)

“Hidup adalah perjuangan tanpa henti henti”

(Wahyu Agung Sabariman)



PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Wahyu Agung Sabariman

NIM : 171910101044

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi yang berjudul “Analisis Sifat Lentur Produk *Metal 3D Printing* Dengan Filamen *PLA-Stainless Steel*” adalah hasil karya saya sendiri, kecuali beberapa kutipan yang saya sudah sertakan sumbernya, bukan karya jiplakan dan belum pernah diajukan di institusi manapun. Saya bertanggung jawab terhadap isinya sesuai dengan prinsip menjunjung sikap ilmiah. Demikian pernyataan ini saya buat tanpa tekanan dari manapun dan siap diberikan sanksi dari akademik jika dikemudian hari ditemukan pernyataan ini tidak benar.

Jember, 28 Juli 2021

Yang menyatakan,

Wahyu Agung Sabariman

171910101044

SKRIPSI

**ANALISIS SIFAT LENTUR PRODUK *METAL 3D PRINTING*
DENGAN FILAMEN *PLA-STAINLESS STEEL***

Oleh

WAHYU AGUNG SABARIMAN

171910101044

Pembimbing

Pembimbing Utama : Ir. Mahros Darsin, S.T., M.Sc., Ph.D.

Pembimbing Anggota : Muhammad Trifiananto, S.T., M.T.

PENGESAHAN

Skripsi berjudul “Analisis Sifat Lentur Produk *Metal 3D Printing* Dengan Filamen *PLA-Stainless Steel*” telah diuji dan disahkan pada:

Hari, Tanggal : Rabu, 28 Juli 2021

Tempat : Fakultas Teknik Universitas Jember

Pembimbing,
Pembimbing I Pembimbing II

Ir. Mahros Darsin, S.T., M.Sc., Ph.D.
NIP 197003221995011001

Muhammad Trifiananto, S.T., M.T.
NIP. 199003242019031017

Penguji,
Penguji I Penguji II

Ir. Hari Arbiantara Basuki, S.T., M.T.
NIP. 196709241994121

Dr. Ir. Agus Triono, S.T., M.T.
NIP 197008072002121001

Mengesahkan,
Dekan Fakultas Teknik Universitas Jember

Dr. Triwahju Hardianto, S.T., M.T.
NIP 197008261997021001

RINGKASAN

Analisis Sifat Lentur Produk *Metal 3D Printing* Dengan Filamen PLA-*Stainless Steel*; Wahyu Agung Sabariman, 171910101044; 2021; 112 halaman; Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Jember.

3D printing merupakan salah satu bentuk dari kemajuan dan terobosan baru di dunia teknologi. Sejak diinisiasi oleh paten teknologi *stereolitografi* Charles W. Hull pada tahun 1986, teknologi *3D printing* ini selalu mengalami perkembangan hingga saat ini dan menjadi suatu metode yang potensial di dunia industri manufaktur. *3D printing* adalah sebuah metode atau teknologi yang dapat mencetak suatu objek dari *file* digital (CAD) menjadi suatu objek tiga dimensi (memiliki volume dan massa). Prinsip kerja dari *3D printing* adalah membuat benda dengan metode *layer by layer*, yaitu dengan membuat lapisan yang kemudian ditimpa oleh lapisan berikutnya dan begitu seterusnya, hingga akhirnya terbentuk suatu objek yang sempurna.

Terdapat beberapa teknik dalam *3D printing*, salah satunya adalah *fused deposition modelling* (FDM). Teknik FDM sangat populer digunakan karena rendah biaya dan mudah dalam pengoperasian. Bahan baku dari proses *3D printing* teknik FDM ini adalah filamen. Pada penelitian kali ini, filamen yang digunakan adalah filamen campuran antara PLA dengan partikel *metal*, yaitu eSteel. Filamen eSteel adalah filamen yang merupakan campuran antara bahan PLA dengan partikel bahan *stainless steel*, dengan persentase 55% PLA dan 45% partikel *stainless steel*.

Perkembangan penggunaan teknologi *3D printing* saat ini sangat pesat. Salah satu bentuk pengembangan *3D printing* yang sangat berpengaruh di dunia industri dan menjadi awal dimulainya industri 4.0 adalah teknologi *metal 3D printing*. Beberapa sektor industri yang telah memanfaatkan teknologi *metal 3D printing* salah satunya industri kesehatan, yaitu *biomedical implant*. PLA merupakan material yang *biodegradable* sehingga tepat untuk digunakan sebagai material *biomedical implant*. Di sisi lain, bahan *metal* yang biasa digunakan untuk *biomedical implant* adalah *stainless steel*, CoCr, dan Titanium. Oleh karena itu, filamen PLA-*stainless steel* bisa digunakan untuk material *biomedical implant*.

Karakteristik dari material *biomedical implant* sangat penting untuk diketahui, salah satunya adalah sifat lentunya. Hal ini dilakukan untuk mengetahui kemampuan material dalam pengaplikasiannya.

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Perancangan Mekanik, Jurusan Teknik mesin, Fakultas Teknik, Universitas Jember pada bulan Januari 2021 hingga Juli 2021. Pada penelitian ini akan dilakukan pengamatan tentang pengaruh *nozzle temperature*, *layer height*, dan *raster angle* terhadap sifat lentur dari PLA-*stainless steel*. *Design experiment* yang digunakan adalah Metode Taguchi $L_4 (2^3)$ dan ANOVA. Desain spesimen uji *bending* yang digunakan adalah spesimen ASTM D790 dengan lima replikasi di setiap kombinasinya

Hasil penelitian menunjukkan bahwa *raster angle* memiliki pengaruh yang paling penting dari kekuatan lentur produk dengan kontribusi 43,22%, diikuti oleh *layer height* dan *extruder temperature* dengan kontribusi 24,08% dan 12,6%. Kombinasi parameter kendali untuk menghasilkan kekuatan lentur yang optimal adalah *extruder temperature* 220°C, *layer height* 0,4 mm, dan *raster angle* 0°/90°, yaitu sebesar 39,54 MPa.

SUMMARY

Flexural Properties Analysis of Metal 3D Printing Product With PLA-Stainless Steel Filament; Wahyu Agung Sabariman, 171910101044; 2021; 112 pages; Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Jember.

3D printing is an example of progress and new breakthroughs in the world of technology. Since it was initiated by Charles W. Hull's patent for stereolithography in 1986, 3D printing technology has always been developing and has become a potential method in the manufacturing industry. 3D printing is a method or technology that can print an object from a digital file (CAD) into a three-dimensional object (having volume and mass). The principle of 3D printing work is to create objects using the layer by layer method, with each layer being overwritten by the next, until a flawless object is produced.

Fused deposition modeling (FDM) is one of the many methods used in 3D printing. The FDM method is widely used due to its low cost and ease of usage. The raw material for the 3D printing process using the FDM technique is filament. The filament utilized in this study is eSteel, which is a combination of PLA and metal particles. ESteel filament is a filament made up of stainless steel particles and PLA material, with a ratio of 55% PLA to 45% stainless steel powders.

The utilization of 3D printing technology is now advancing at a breakneck pace. 3D printing metal technology is one type of 3D printing advancement that is extremely important in the industrial sector and represents the start of industry 4.0. Metal 3D printing technology has been used in a variety of industries, one of which is the health industry, namely biomedical implants. PLA is a biodegradable material so it is appropriate to be used as a biomedical implant material. On the other hand, metal materials commonly used for biomedical implants are stainless steel, CoCr, and Titanium. As a result, PLA-stainless steel filaments can be utilized to create biomedical implants. Characteristics of biomedical implant materials are very important to know, one of which is flexibility. This is done to see how capable the material is in its application.

This research was conducted at the Mechatronics Laboratory, Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering, University of Jember from January 2021 to July 2021. The impact of nozzle temperature, layer height, and raster angle on the flexural characteristics of PLA-stainless steel will be investigated in this study. The Taguchi method $L_4 (2^3)$ and ANOVA is utilized as the experimental design. The design of the bending test specimen used is the ASTM D790 specimen with five replications in each combination

The results showed that the raster angle had the most important influence on the flexural strength of the product with a contribution of 43.22%, followed by layer height and extruder temperature with a contribution of 24.08% and 12.6%, respectively. The combination of control parameters to present optimal flexural strength is extruder temperature 220°C, layer height 0.4 mm, and raster angle 0°/90°, which is 39.54 MPa.

PRAKATA

Puji syukur dipanjatkan kepada Allah SWT. karena rahmat dan limpahan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan judul “Analisis Sifat Lentur Produk *Metal 3D Printing* Dengan Filamen *PLA-Stainless Steel*”. Skripsi ini disusun guna memenuhi salah satu syarat dalam menyelesaikan pendidikan strata satu (S1) Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember.

Tidak lupa penulis berterima kasih kepada semua pihak yang telah mendukung dan membantu dalam menyelesaikan skripsi ini, diantaranya kepada:

1. Bapak Hari Arbiantara, S.T., M.T. selaku ketua Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember.
2. Bapak Ir. Mahros Darsin, S.T., M.Sc., Ph.D. sebagai dosen pembimbing utama dan Bapak Muhammad Trifiananto, S.T., M.T., sebagai dosen pembimbing anggota skripsi saya yang telah membimbing dengan sabar sehingga dapat mengantarkan saya menyelesaikan skripsi ini.
3. Bapak Ir. Hari Arbiantara Basuki, S.T., M.T. selaku penguji utama dan bapak Dr. Ir. Agus Triono, S.T., M.T. selaku penguji anggota yang telah memberikan saran dan masukan terhadap skripsi saya agar skripsi saya menjadi lebih baik lagi.
4. Bapak Dr. Ir. Robertoes Koekoeh Koentjoro Wibowo, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing akademik saya yang selama 4 tahun perkuliahan membimbing saya sampai menyelesaikan proses perkuliahan ini.
5. Teman-teman kelompok *3D Printing*, Nurcholis Alfian M., Renald Mauludy R., M. Fiky Izzulhaq, Fikri Aziz S., Farhan Fahriansyah, Nauval Iqbal A., Ervanancy Suryawan, dan yang lainnya sebagai teman sehari-hari selama penelitian. Teman-teman yang saling mendukung satu sama lain dan bersama-sama dapat maju terus untuk ke depannya.
6. Teman-teman satu kos saya yaitu Nurcholis Alfian M., M. Lintang Anshori, dan Zainal Hasan yang selama ini sering membantu dan mendukung saya dalam menghadapi rintangan dan masalah.

7. Teman saya, Angga Wahyu Ilahi yang sering membantu segala hal dalam 4 tahun proses perkuliahan ini.
8. Teman-teman satu angkatan teknik mesin 2017.
9. Dosen dan seluruh karyawan Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan karya tulis ini dapat dikatakan belum sempurna. Semoga penelitian ini dapat bermanfaat memberikan wawasan kepada para pembaca dan ilmunya dapat diaplikasikan nantinya.

Jember, 28 Juli 2021

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN SAMPUL.....	ii
HALAMAN PERSEMBAHAN.....	iii
HALAMAN MOTTO	v
HALAMAN PERNYATAAN.....	vi
HALAMAN SKRIPSI.....	vii
HALAMAN PENGESAHAN	viii
RINGKASAN	ix
SUMMARY	xi
PRAKATA	xiii
DAFTAR ISI.....	xv
DAFTAR GAMBAR.....	xviii
DAFTAR TABEL.....	xx
DAFTAR LAMPIRAN	xxi
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	4
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Manfaat Penelitian	4
1.5 Batasan Masalah	5
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Logam (<i>Metal</i>)	6
2.2 <i>Stainless Steel</i>	7
2.3 <i>Additive Manufacturing</i>	8
2.4 <i>Metal 3D Printing</i>	13

2.5 Solidworks	15
2.6 Pengujian Tekuk (<i>Bending</i>)	16
2.7 Kriteria Kegagalan	19
2.8 Metode Taguchi	20
2.8.1 Desain Eksperimen	20
2.8.2 Rancangan Percobaan Taguchi	21
2.8.3 Interpretasi Hasil Eksperimen	27
2.8.4 Eksperimen Konfirmasi	29
2.9 Hipotesis	29
BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN	30
3.1 Jenis Penelitian dan Rancangan Penelitian	30
3.2 Waktu dan Tempat Penelitian	30
3.3 Alat dan Bahan	30
3.3.1 Alat	30
3.3.2 Bahan	36
3.4 Rancangan Penelitian	36
3.4.1 Variabel Kontrol	36
3.4.2 Variabel Terikat	37
3.4.3 Variabel Bebas	37
3.4.4 Perhitungan Derajat Kebebasan	37
3.4.5 Pemilihan Matriks Orthogonal	38
3.4.6 Matriks Orthogonal Penelitian	39
3.4.7 Analisis Variansi (ANOVA) dan Persen Kontribusi	39
3.5 Pelaksanaan Penelitian	41
3.5.1 Tahap Persiapan	41

3.5.2 Tahap Pencetakan Spesimen.....	42
3.5.3 Tahap Pengujian.....	44
3.6 Pengambilan Data.....	44
3.7 Karakteristik Respon Optimum	44
3.8 Diagram Alir Penelitian	45
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	48
4.1 Hasil	48
4.1.1 Hasil 3D <i>Printing</i> Spesimen Uji Bending ASTM D790.....	48
4.1.2 Hasil Pengujian <i>Bending</i>	51
4.1.3 Perhitungan Rasio S/N	54
4.1.4 Kombinasi Variasi Optimal	55
4.1.5 Perhitungan ANOVA.....	57
4.1.6 Persen Kontribusi.....	59
4.1.7 Prediksi Respon Optimal	60
4.1.8 Eksperimen Konfirmasi	61
4.2 Pembahasan	63
4.2.1 <i>Raster Angle</i>	63
4.2.2 <i>Layer Height</i>	64
4.2.3 <i>Extruder Temperature</i>	65
4.2.4 Struktur Mikro.....	67
BAB 5. PENUTUP.....	70
5.1 Kesimpulan	70
5.2 Saran	71
DAFTAR PUSTAKA.....	72
LAMPIRAN.....	75

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Unsur logam pada tabel periodik (Halka & Nordstrom, 2012).....	6
Gambar 2.2 <i>Stainless steel</i> (Outokumpu, 2013).....	7
Gambar 2.3 Langkah-langkah pengoperasian <i>3D printing</i> (Gibson et al., 2015) .	10
Gambar 2.4 <i>Layer height</i> (Akhoundi & Behraves, 2019).....	11
Gambar 2.5 Variasi <i>infill density</i> (Akhoundi & Behraves, 2019).....	12
Gambar 2.6 <i>Raster angle</i> (Wu et al., 2015)	12
Gambar 2.7 Jenis-jenis <i>infill pattern</i> (Akhoundi & Behraves, 2019)	13
Gambar 2.8 Aplikasi <i>metal 3D printing</i> (Milewski, 2017).....	15
Gambar 2.9 Fitur-fitur pada Solidworks	16
Gambar 2.10 Skema pengujian <i>bending</i> (Berthelot, 1999).....	17
Gambar 2.11 Grafik hubungan tegangan dan regangan (Sulaeman, 2018)	18
Gambar 3.1 Mesin <i>3D printing</i> HE3D K200 beserta bagian-bagiannya	31
Gambar 3.2 Bagian-bagian <i>extruder</i>	31
Gambar 3.3 Bagian-bagian <i>motion</i>	32
Gambar 3.4 Bagian-bagian <i>hot end</i>	32
Gambar 3.5 Bagian-bagian <i>bed</i>	33
Gambar 3.6 <i>Interface</i>	34
Gambar 3.7 Mesin uji universal	35
Gambar 3.8 Filamen eSteel	36
Gambar 3.9 Dimensi spesimen uji <i>bending</i> D790	41
Gambar 3.10 Tampilan spesimen pada Repetier Host	42
Gambar 3.11 Tampilan pengaturan parameter	43
Gambar 3.12 Tampilan <i>print preview</i> pada Repetier Host	43

Gambar 3.13 Diagram alir penelitian.....	47
Gambar 4.1 Hasil 3D <i>printing</i> spesimen uji <i>bending</i>	48
Gambar 4.2 Validasi <i>extruder temperature</i> yang digunakan (A) 220°C dan (B) 225°C	49
Gambar 4.3 (A) Spesimen kombinasi 1 dengan <i>layer height</i> 0,3 mm (B) Spesimen kombinasi 2 dengan <i>layer height</i> 0,4 mm.....	50
Gambar 4.4 (A) Spesimen kombinasi 4 dengan <i>raster angle</i> 0°/90° (B) Spesimen kombinasi 2 dengan <i>raster angle</i> 45°/45°	51
Gambar 4.5 Spesimen uji <i>bending</i> setelah pengujian	51
Gambar 4.6 Grafik tegangan-regangan kombinasi 1	53
Gambar 4.7 (A) Gambar patahan spesimen setelah pengujian (B) Foto mikro sisi patahan spesimen dengan kekuatan <i>bending</i> tertinggi dan (C) terendah	54
Gambar 4.8 Plot rata-rata rasio S/N tiap level dari faktor.....	56
Gambar 4.9 Ikatan antar <i>layer</i> pada <i>raster angle</i> 0°	64
Gambar 4.10 Cacat yang terjadi pada pengisian dengan <i>layer height</i> 0,3 mm.....	65
Gambar 4.11 Foto mikro patahan spesimen dengan <i>extruder temperature</i> 220°C	66
Gambar 4.12 Foto mikro patahan spesimen dengan <i>extruder temperature</i> 225°C	67
Gambar 4.13 Cacat pada proses pengisian di suhu 225°C	67
Gambar 4.14 Struktur mikro filamen eSteel sebelum ekstrusi dengan posisi filamen (A) horizontal dan (B) vertikal	68
Gambar 4.15 Struktur mikro filamen eSteel sebelum ekstrusi dengan posisi filamen (A) 220°C dan (B) 225°C.....	69

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Perkembangan 3D <i>printing</i> di dunia	9
Tabel 2.2 Contoh Tabel Matriks Orthogonal $L_4 (2^3)$	23
Tabel 3.1 Variabel kontrol	36
Tabel 3.2 Nilai dari variabel bebas	37
Tabel 3.3 Perhitungan Derajat Kebebasan	38
Tabel 3.4 Matriks Orthogonal Penelitian	39
Tabel 3.5 Tabel ANOVA	40
Tabel 3.6 Hasil ANOVA	41
Tabel 4.1 Data hasil pengujian	52
Tabel 4.2 Hasil perhitungan rasio S/N	55
Tabel 4.3 Hasil perhitungan rasio S/N tiap level dari faktor	56
Tabel 4.4 Kombinasi parameter respon optimal	57
Tabel 4.5 ANOVA faktor kendali	59
Tabel 4.6. Persen kontribusi setiap faktor kendali	59
Tabel 4.7 Data hasil pengujian <i>bending</i> eksperimen konfirmasi	62

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Data sheet filamen eSteel.....	75
Lampiran 2	Analisis Metode Taguchi menggunakan Minitab.....	82
Lampiran 3	Analisis ANOVA menggunakan Microsoft Excel.....	83
Lampiran 4	Hasil pengujian spesimen uji <i>bending</i> kombinasi 1, kombinasi 2, kombinasi 3, dan kombinasi 4	84
Lampiran 5	Dokumentasi proses pencetakan.....	86
Lampiran 6	Dokumentasi pengujian <i>bending</i>	88
Lampiran 7	Grafik hasil pengujian eksperimen konfirmasi.....	90
Lampiran 8	Tabel distribusi F ($\alpha = 0,05$)	91

BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

3D *printing* merupakan salah satu bentuk dari kemajuan dan terobosan baru di dunia teknologi. Sejak diinisiasi oleh paten teknologi *stereolitografi* Charles W. Hull pada tahun 1986, teknologi 3D *printing* ini selalu mengalami perkembangan hingga saat ini dan menjadi suatu metode yang potensial di dunia industri manufaktur. 3D *printing* adalah sebuah metode atau teknologi yang dapat mencetak suatu objek dari *file* digital (CAD) menjadi suatu objek tiga dimensi (memiliki volume dan massa). Prinsip kerja dari 3D *printing* adalah membuat benda dengan metode *layer by layer*, yaitu dengan membuat lapisan yang kemudian ditimpa oleh lapisan berikutnya dan begitu seterusnya, hingga akhirnya terbentuk suatu objek yang sempurna.

Perkembangan penggunaan teknologi 3D *printing* saat ini sangat pesat. Mesin 3D *printing* yang awalnya berukuran besar kini berevolusi menjadi ukuran yang lebih terjangkau. Selain itu, salah satu bentuk pengembangan 3D *printing* yang sangat berpengaruh di dunia industri dan menjadi awal dimulainya industri 4.0 adalah teknologi *metal 3D printing*. Penemuan dan pengembangan teknologi *metal 3D printing* yang semakin maju ini dianggap dapat menggeser teknologi produksi konvensional. Hal ini dikarenakan teknologi 3D *printing* lebih efektif dibandingkan dengan proses konvensional, diantaranya rantai proses yang lebih singkat, meminimalisir material terbuang, dan tingkat keakuratan yang tinggi. Selain itu, kelebihan lainnya adalah produsen dapat mengembangkan kreativitas dan inovasinya mengenai produk yang akan dihasilkan. Kemampuan *metal 3D printing* dalam mencetak objek yang memiliki tingkat kesulitan tinggi dalam waktu singkat semakin menggeser proses pemesinan konvensional dalam industri. Beberapa sektor industri yang telah memanfaatkan teknologi *metal 3D printing* adalah penerbangan, otomotif, militer, peralatan kesehatan, dan juga FMCG (*Fast Moving Consumer Goods*).

Terdapat beberapa teknik dalam 3D *printing*, salah satunya adalah teknik *fused deposition modelling* (FDM). Bahan baku dari proses 3D *printing* teknik FDM ini adalah filamen. Filamen yang digunakan dalam proses 3D *printing* dibagi menjadi dua macam, yaitu plastik dan *metal* (dengan campuran plastik). Filamen yang paling banyak digunakan pada 3D *printing* teknik FDM ini adalah filamen PLA dan ABS. Keduanya merupakan filamen berbahan plastik. Pada penelitian kali ini, filamen yang digunakan adalah filamen campuran antara PLA dengan bubuk *metal*, yaitu eSteel. Filamen eSteel adalah filamen yang merupakan campuran antara bahan PLA dengan bubuk *stainless steel*, dengan persentase 55% PLA dan 45% bubuk *stainless steel*. Industri kesehatan adalah salah satu industri yang memanfaatkan teknologi *metal* 3D *printing*, yaitu *biomedical implant*. PLA merupakan material yang *biodegradable* sehingga tepat untuk digunakan sebagai material *biomedical implant* (Lu & Chen, 2004). Di sisi lain, bahan *metal* yang biasa digunakan untuk *biomedical implant* adalah *stainless steel*, CoCr, dan Titanium (Hermawan dkk., 2011). Oleh karena itu, filamen PLA-*stainless steel* bisa digunakan untuk material *biomedical implant*.

Kualitas dari sebuah produk 3D *printing* ditentukan dari parameter proses yang digunakan. Beberapa parameter yang biasa digunakan pada proses 3D *printing* adalah *extruder temperature*, *layer height*, *bed temperature*, *printing speed*, *infill density*, *raster angle*, dan *infill pattern*. Terdapat beberapa penelitian yang membahas tentang pengaruh parameter terhadap sifat mekanik produk. Lužanin dkk. (2014) meneliti tentang pengaruh *layer height*, *deposition angle*, dan *infill density* terhadap kekuatan lentur PLA. Didapatkan bahwa *layer height* merupakan parameter yang paling berpengaruh terhadap kekuatan lentur. Nugroho dkk. (2018) juga meneliti tentang pengaruh *layer height* terhadap kekuatan lentur PLA dan didapatkan bahwa semakin tinggi *layer height* maka kekuatan lentur yang didapatkan semakin tinggi. Rajpurohit dkk. (2018) meneliti tentang pengaruh *raster angle*, *layer height*, dan *raster width* terhadap kekuatan lentur PLA. Hasilnya adalah kekuatan lentur tinggi didapatkan dari *raster angle* terkecil dan *layer height* terendah. Wu dkk. (2015) melakukan penelitian mengenai pengaruh *layer height* dan *raster angle* terhadap pengujian tarik, *bending*, dan tekan menggunakan

filamen PEEK (polyether-ether-ketone). Hasilnya adalah kombinasi parameter yang memiliki sifat mekanis terbaik baik adalah *layer height* 0.3 mm dan *raster angle* 0/90°. Riza dkk. (2010) melakukan penelitian tentang pengaruh *nozzle temperature*, *extrusion width*, dan *feed rate*. Hasilnya *nozzle temperature* memiliki kontribusi tertinggi terhadap kekuatan lentur berbahan PETG. Xu dkk. (2021) juga melakukan penelitian tentang pengaruh *nozzle temperature*, *layer thickness*, *infill density*, dan *build orientation* terhadap sifat lentur PEEK. Hasil yang didapatkan adalah semakin tinggi *nozzle temperature*, maka sifat lenturnya semakin baik. Namun *nozzle temperature* yang terlalu tinggi menurunkan sifat lentur dari produk. Hasil lainnya adalah semakin rendah *layer thickness* dan semakin tinggi *infill density* maka semakin baik sifat lenturnya. Selain itu *build orientation* yang dapat menghasilkan sifat lentur yang baik adalah *on edge*.

Kesavarma dkk. (2020) melakukan pengujian *bending* terhadap material 3D printing dengan filamen PLA-copper. Variasi yang digunakan adalah komposisi *copper* (25% dan 80%) dan *infill pattern*. Hasilnya adalah kekuatan *bending* maksimal diperoleh dari produk dengan 25% *copper* dan *infill pattern concentric*. Sedangkan modulus *bending* tertinggi diperoleh dari produk dengan 80% *copper* dan *infill pattern concentric*. Sakthivel dkk. (2020) melakukan variasi *extruder temperature*, *bed temperature*, dan *layer thickness* terhadap keakuratan dimensi dan kekasaran dari produk PLA-stainless steel yang disertai dengan pengujian tarik dan pengujian impak. Komposisi dari filamen tersebut adalah 60% partikel *stainless steel* dan 40% PLA. Hasil dari penelitian didapatkan bahwa parameter optimal untuk keakuratan dimensi produk adalah pada suhu *extruder* 215°C, suhu *bed* 70°C, dan *layer thickness* 0.1 mm. Sedangkan hasil pengujian tarik dan pengujian impak dari parameter tersebut adalah 69 MPa (*raster angle* 45°), 23 MPa (*raster angle* 90°C) dan 18 kJ/m².

Pada penelitian ini akan dilakukan pengamatan tentang pengaruh *nozzle temperature*, *layer height*, dan *raster angle* terhadap sifat lentur dari PLA-stainless steel. *Design experiment* yang digunakan adalah Metode Taguchi. Selain itu digunakan juga ANOVA untuk mengetahui kontribusi setiap faktor terhadap kekuatan lentur dari PLA-stainless steel.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dikemukakan di atas, maka rumusan masalah dari penelitian adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana pengaruh *extruder temperature*, *layer height*, dan *raster angle* terhadap sifat lentur dari hasil cetakan?
2. Bagaimana nilai parameter yang paling optimal untuk menghasilkan sifat lentur hasil cetakan yang maksimal?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah di atas, tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Mengetahui pengaruh *extruder temperature*, *layer height*, dan *raster angle* terhadap sifat lentur dari hasil cetakan.
2. Mengetahui nilai *extruder temperature*, *layer height*, dan *raster angle* yang paling optimal untuk menghasilkan sifat lentur hasil cetakan yang maksimal.

1.4 Manfaat Penelitian

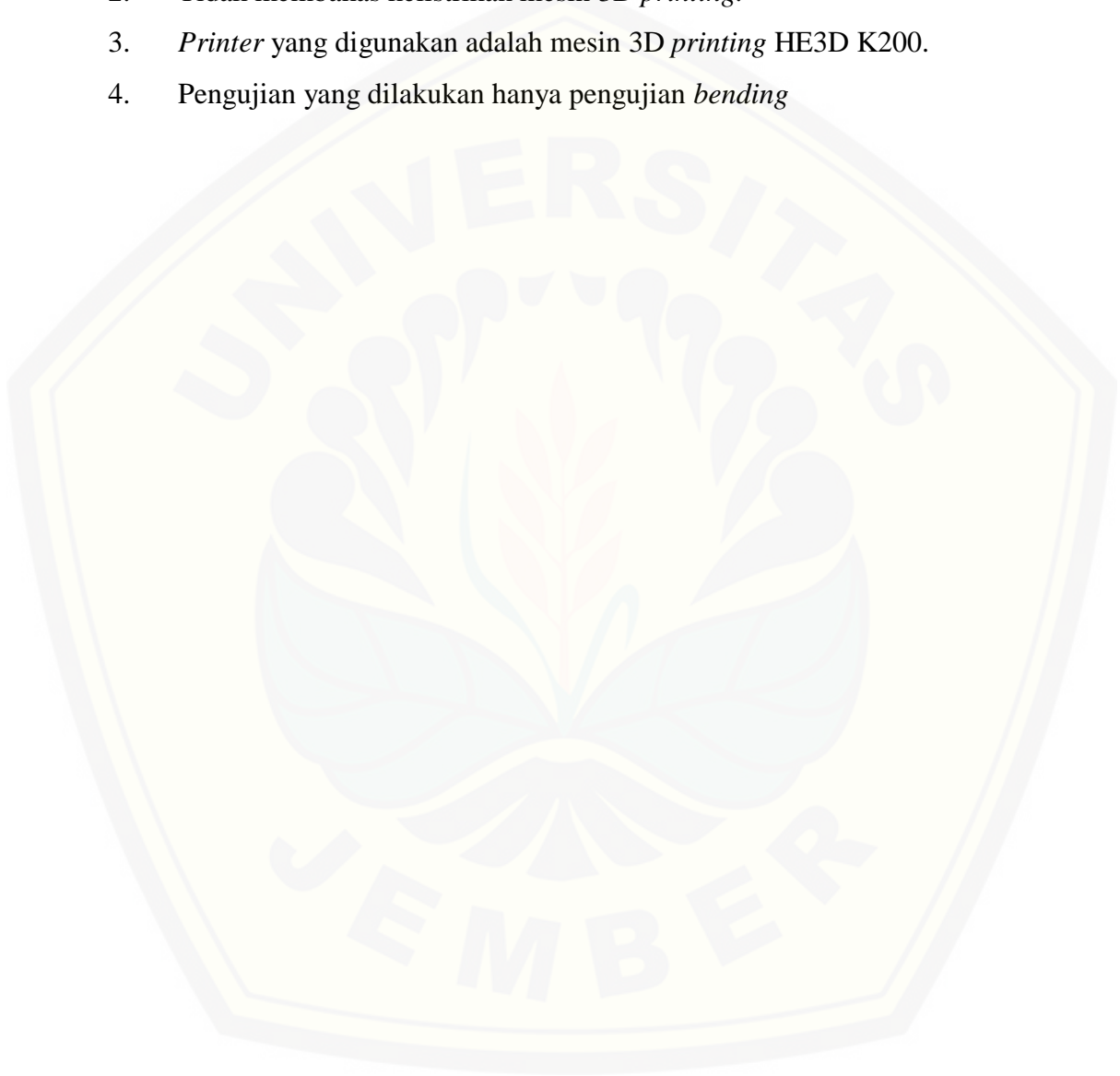
Manfaat yang didapatkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Dapat mengetahui pengaruh *extruder temperature*, *layer height*, dan *raster angle* terhadap sifat lentur dari hasil cetakan.
2. Dapat mengetahui nilai *extruder temperature*, *layer height*, dan *raster angle* yang paling optimal untuk menghasilkan sifat lentur hasil cetakan yang maksimal.
3. Dapat digunakan sebagai referensi untuk penelitian *metal 3D printing* selanjutnya.
4. Dapat digunakan sebagai referensi untuk perencanaan produksi *metal 3D printing*.

1.5 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Tidak membahas parameter lain selain *extruder temperature*, *layer height*, dan *raster angle*.
2. Tidak membahas kelistrikan mesin *3D printing*.
3. *Printer* yang digunakan adalah mesin *3D printing* HE3D K200.
4. Pengujian yang dilakukan hanya pengujian *bending*



BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Logam (Metal)

Logam merupakan unsur yang jumlahnya paling banyak di bumi. Logam adalah unsur kimia yang mempunyai sifat kuat, ulet, keras, konduktor yang baik, dan mempunyai titik leleh yang tinggi. Logam berasal dari bijih logam, yang diperoleh dengan cara penambangan ke dalam permukaan bumi. Logam yang diperoleh merupakan logam murni dan logam campuran. Contoh logam murni adalah emas, platina, dan perak. Sedangkan logam campuran adalah karbon, sulfur, fosfor, dan silikon. Unsur logam pada tabel periodik dapat dilihat pada Gambar 2.1.

Periodic Table of the Elements

Legend:

- Halogens
- Metals
- Nonmetals
- Metalloids
- Unknown

Atomic number, Symbol, Atomic weight

Numbers in parentheses are atomic mass numbers of most stable isotopes.

© Infobase Publishing

Gambar 2.1 Unsur logam pada tabel periodik (Halka & Nordstrom, 2012)

Logam merupakan bahan atau material teknik yang banyak digunakan di berbagai bidang. Dalam dunia keteknikan, logam merupakan material yang paling mendominasi dari material atau bahan-bahan lainnya. Contohnya adalah pada mobil, motor, pesawat, dan kapal, yang mana kerangka pada kendaraan-kendaraan tersebut terbuat dari unsur logam. Hal ini karena logam memiliki sifat yang banyak dibutuhkan di industri keteknikan. Contoh penerapan logam lainnya adalah pada konstruksi bangunan, pipa, alat-alat berat, dan lainnya. Logam yang biasa

digunakan adalah logam paduan yang disebut *alloy*. *Alloy* merupakan campuran dua atau lebih logam, atau campuran logam dan non logam untuk membentuk sebuah material baru. Tujuan dari *alloy* adalah untuk membentuk material baru yang memiliki sifat yang lebih baik dari material sebelumnya. Contohnya adalah *stainless steel*.

2.2 *Stainless Steel*

Stainless Steel atau baja tahan karat adalah jenis baja paduan yang tahan terhadap oksidasi. *Stainless steel* merupakan baja paduan dari beberapa unsur logam dengan komposisi tertentu sehingga membentuk sebuah logam baru yang memiliki sifat dan karakteristik yang lebih unggul dari baja sebelumnya. Unsur-unsur logam yang membentuk *stainless steel* adalah Besi, Krom, Nikel, Karbon, Mangan, Nitrogen, dan sejumlah kecil unsur logam lainnya. *Stainless Steel* mengandung unsur chromium minimal 10,5% yang membuat baja jenis ini memiliki ketahanan terhadap korosi (tahan karat). Unsur chromium yang ditambahkan ke *steel* menjadikan *steel* memiliki ketahanan korosi yang meningkat secara progresif karena membentuk lapisan pelindung Cr_2O_3 (Llewellyn & Hudd, 1998). Unsur chromium yang terkandung pada *stainless steel* membentuk suatu lapisan pelindung anti korosi (*protective layer*) yaitu lapisan film oksida kromium, yang menghalangi proses oksidasi besi (Ferum). Selain itu, kandungan Kromium membuat *stainless steel* memiliki tampilan yang menarik. Tampak fisik material *stainless steel* dapat dilihat pada gambar 2.2.



Gambar 2.2 *Stainless steel* (Outokumpu, 2013)

Penggunaan *stainless steel* di industri semakin meningkat. Hal ini ditengarai karena *stainless steel* banyak memiliki sifat dan karakteristik yang lebih unggul dibandingkan dengan logam lainnya. *Stainless steel* banyak digunakan pada industri kimia dan petrokimia, industri minyak dan gas, industri kertas, industri kelautan, industri dirgantara, dan pembangkit listrik (Farrar, 2004). Karakteristik dari *stainless steel* adalah sebagai berikut.

- a. Tahan terhadap korosi
- b. Memiliki kekerasan dan kekuatan yang tinggi
- c. Memiliki keuletan yang tinggi
- d. *Low maintenance* dan *durable* (minim perawatan dan tahan lama)
- e. Memiliki tampilan yang menarik
- f. Memiliki persentase krom tinggi

2.3 Additive Manufacturing

Additive Manufacturing, atau yang kita kenal *3D printing*, merupakan salah satu bentuk dari kemajuan dan terobosan baru di dunia teknologi. *3D printing* adalah sebuah metode atau teknologi yang dapat mencetak suatu objek dari *file* digital (CAD) menjadi suatu objek tiga dimensi (memiliki volume dan massa). Prinsip kerja dari *3D printing* adalah membuat benda dengan metode *layer by layer*, yaitu dengan membuat lapisan – lapisan yang kemudian ditimpa oleh lapisan berikutnya dan begitu seterusnya, hingga akhirnya terbentuk suatu objek yang sempurna. *Software* yang dibutuhkan dalam penggunaan *3D printing* ada tiga, yaitu CAD, sebagai *software* untuk mendesain objek, kemudian CAM (*Computer-aided Manufacturing*) sebagai penerjemah objek 3D ke dalam bentuk G-code, dan *software* pengontrol *printer* yang memberi petunjuk kepada *printer* mengenai proses pencetakan (Saxena & Kamran, 2016).

Sejarah perkembangan *3D printing* dimulai pada tahun 1981 ketika Dr. Hideo Kodama asal Jepang yang mematenkan penemuan alat pencetak prototipe cepat dengan sistem penyemburan resin dan teknologi laser. Namun, Dr. Hideo Kodama gagal mendapatkan paten tersebut dikarenakan tidak dapat menyelesaikan prosesnya karena masalah pendanaan. Kemudian pada tahun 1984, Charles W. Hull

menemukan teknologi yang diberi nama stereolitografi dan patennya diterbitkan pada tahun 1986. Di tahun yang sama, Charles W. Hull mendirikan perusahaannya sendiri di Valencia, California yaitu 3D Systems, yang merupakan perusahaan 3D *printing* pertama dan salah satu yang terbesar saat ini.

Sejak saat itu, teknologi 3D *printing* terus mengalami perkembangan. Pada tahun 1988, teknologi *Selective Laser Sintering* (SLS) ditemukan oleh Carl Deckard, seorang sarjana di University of Texas. Teknologi *additive manufacturing* lainnya kembali ditemukan. Teknologi ini diberi nama *Fused Deposition Modelling* (FDM), yang merupakan teknologi yang paling sederhana dibandingkan SLA dan SLS. Paten untuk teknologi FDM terbit pada tahun 1992, dengan Scott Crump, salah satu pendiri perusahaan Stratasys, sebagai pengajunya. Berikut adalah *timeline* perkembangan 3D *Printing* di dunia.

Tabel 2.1 Perkembangan 3D *printing* di dunia

Tahun	Perkembangan
1980	Paten pertama Rapid Prototyping oleh Dr. Kodama
1986	Paten SLA (<i>stereolithography</i>) oleh Charles W. Hull
1987	Kemunculan mesin SLA-1
1988	Paten teknologi SLS oleh University of Texas, Carl Deckard
1990	Kemunculan EOS Stereos <i>system</i> (Teknologi SLS untuk plastik dan metal)
1992	Paten FDM (<i>Fused Deposition Modelling</i>)
1993	Penemuan <i>solidscape</i>
1999	Penggunaan 3D <i>printing</i> dalam bidang kesehatan
2000	Pembuatan 3D <i>print</i> ginjal
2000	Pengenalan teknologi SLM (<i>Selective Laser Melting</i>)
2005	Peluncuran Spectrum Z510, 3D <i>printing</i> pertama di pasaran dengan <i>high definition color</i> .
2008	Kaki palsu hasil 3D <i>printing</i> pertama
2009	Paten FDM dalam domain public
2010	Pameran mobil <i>prototype</i> 3D pertama (Urbee)
2011	Cornell University mulai membuat 3D <i>food printer</i>
2012	Rahang prostetik pertama dicetak dan ditanamkan
2013	Peneliti China mulai mencetak telinga, hati, ginjal, dengan <i>living cells</i> dan sedang mengembangkan agar bisa mencetak organ yang berfungsi sekitar 10-20 tahun ke depan
2016	Lab Daniel Kelly bisa mencetak tulang 3D

sumber: (Ismianti, 2018)

Terdapat beberapa teknik dalam 3D *printing*, salah satunya adalah teknik *Fused Deposition Modelling* (FDM). FDM adalah salah satu teknik AM yang paling banyak digunakan untuk membuat komponen polimer (Rajpurohit & Dave, 2018). Bahan baku dari proses 3D *printing* teknik FDM ini adalah filamen. Filamen yang digunakan dalam proses 3D *printing* dibagi menjadi dua macam, yaitu plastik dan *metal*. Filamen yang paling banyak digunakan pada 3D *printing* teknik FDM ini adalah filamen PLA dan ABS. Keduanya merupakan filamen berbahan plastik.

Langkah-langkah penggunaan 3D *printing* sangat sederhana. Langkah-langkah pengoperasian 3D *printing* dapat dilihat pada gambar 2.3.



Gambar 2.3 Langkah-langkah pengoperasian 3D *printing* (Gibson dkk., 2015)

1. Membuat desain sebuah objek yang akan dicetak menggunakan 3D *printing* menggunakan *software* CAD.
2. Desain CAD yang sudah dibuat dikonversi ke dalam format stl.
3. Mengirim file objek dalam format stl ke mesin 3D *printing*
4. Atur parameter sesuai dengan kebutuhan terhadap objek cetak.
5. Setelah mengatur parameter, jalankan mesin dan mesin akan otomatis membuat objek cetak sesuai desain CAD.
6. Jika objek sudah tercetak, bersihkan objek dari bagian-bagian yang tidak dibutuhkan, seperti *support* dan *brim*.

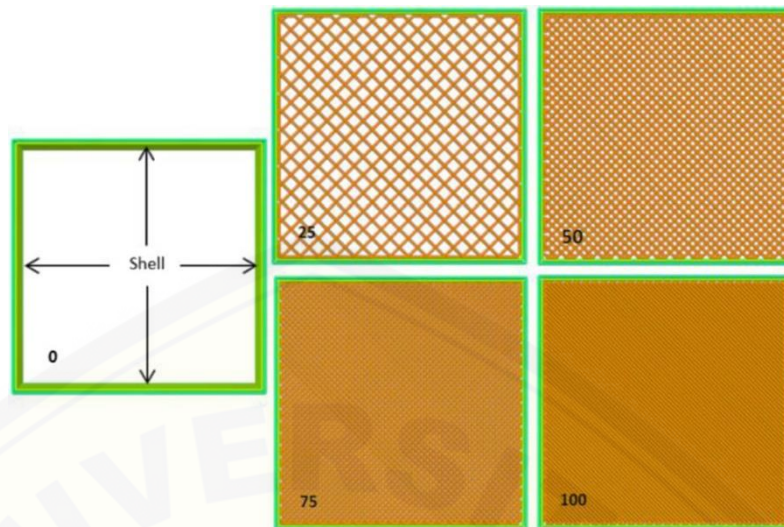
Beberapa parameter yang digunakan untuk menentukan hasil produk 3D *Printing* adalah sebagai berikut.

- a. *Extruder Temperature*, yaitu temperatur yang digunakan untuk melelehkan atau mengekstrusi filamen. *Extruder temperature* juga sering disebut *nozzle temperature*.
- b. *Layer Height*, yaitu ketinggian atau ketebalan lapisan penyusun produk. Penentuan *layer height* yang digunakan untuk proses pencetakan harus disesuaikan dengan diameter *nozzle* yang digunakan. Semakin kecil *layer height* yang digunakan, maka produk yang dihasilkan semakin detail. *Layer height* ditunjukkan pada gambar 2.4



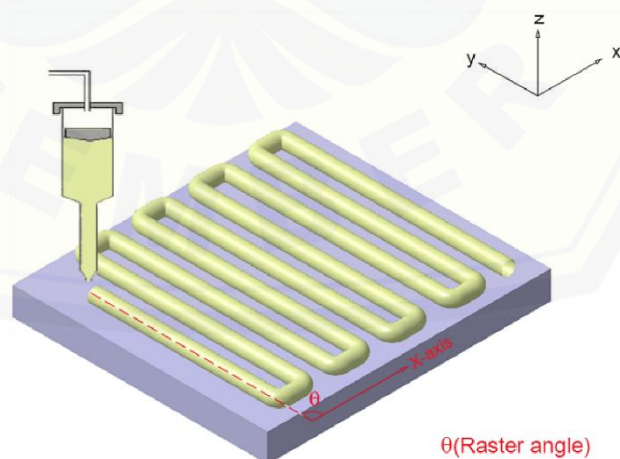
Gambar 2.4 *Layer height* (Akhoundi & Behraves, 2019)

- c. *Bed Temperature*, yaitu temperatur dari *bed* yang merupakan tempat produk 3D *printing* dicetak.
- d. *Printing Speed*, yaitu kecepatan pergerakan motor *printer* yang digunakan dalam proses pencetakan.
- e. *Infill Density*, yaitu kepadatan dari bahan (filamen) yang digunakan pada produk cetak. *Infill Density* menggambarkan seberapa banyak filamen yang digunakan. *Infill density* yang digunakan adalah 10% - 100%. Semakin tinggi *infill density* maka semakin banyak filamen yang mengisi produk cetak. Variasi *infill density* ditunjukkan pada gambar 2.5.



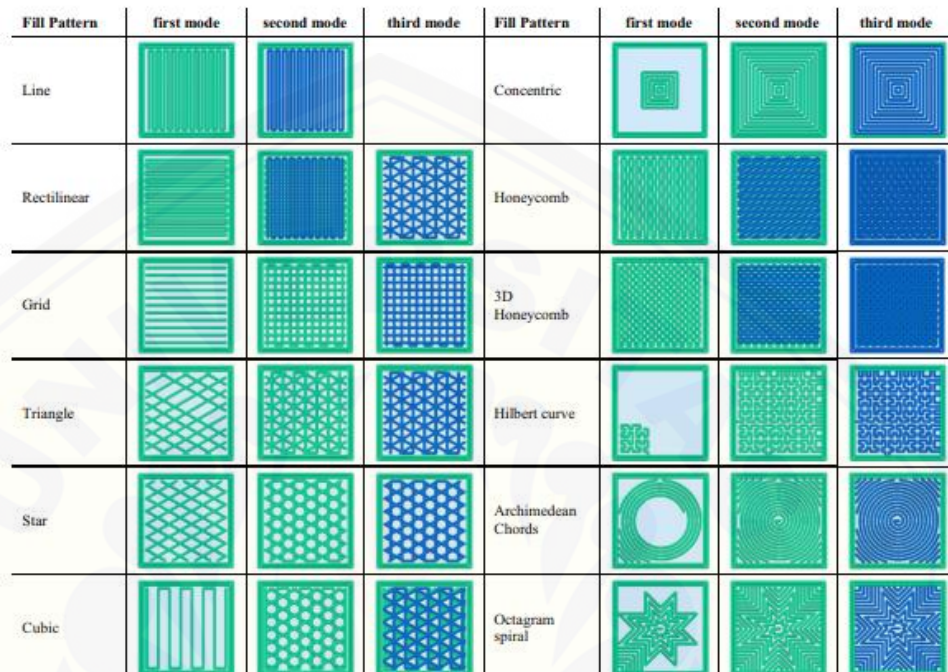
Gambar 2.5 Variasi *infill density* (Akhoundi & Behraves, 2019)

- f. *Raster Angle*, yaitu sudut yang digunakan dalam proses pengisian (filamen) suatu produk cetak. *Raster angle* dibedakan menjadi dua jenis, yaitu *unidirectional angle* dan *bidirectional angle*. *Unidirectional angle* adalah proses pengisian yang hanya menggunakan satu sudut, seperti 0° , 30° , 45° , 60° dan 90° . Sedangkan *bidirectional angle* adalah proses pengisian yang menggunakan dua sudut kombinasi, seperti $0^\circ/90^\circ$, $30^\circ/60^\circ$, dan $45^\circ/45^\circ$. *Raster angle* ditunjukkan pada gambar 2.6.



Gambar 2.6 *Raster angle* (Wu dkk., 2015)

- g. *Infill Pattern*, yaitu pola yang digunakan dalam proses pencetakan. Jenis-jenis *infill pattern* ditunjukkan pada gambar 2.7.



Gambar 2.7 Jenis-jenis *infill pattern* (Akhoundi & Behraves, 2019)

Kelebihan penggunaan *3D printing* adalah proses produksi yang lebih cepat, bisa mencetak objek dengan tingkat kerumitan yang tinggi, proses yang ramah lingkungan, dan penggunaan bahan dan material yang efektif. Sedangkan kekurangannya adalah kecepatan *build* yang lambat dan ukuran komponen yang terbatas (berdasarkan ukuran *build chamber*-nya) (Duda & Raghavan, 2016). Teknologi *3D printing* sudah banyak diaplikasikan di berbagai bidang, yaitu bidang industri, manufaktur, kesehatan, *social cultural* (Ismianti, 2018), hingga bidang *fashion*.

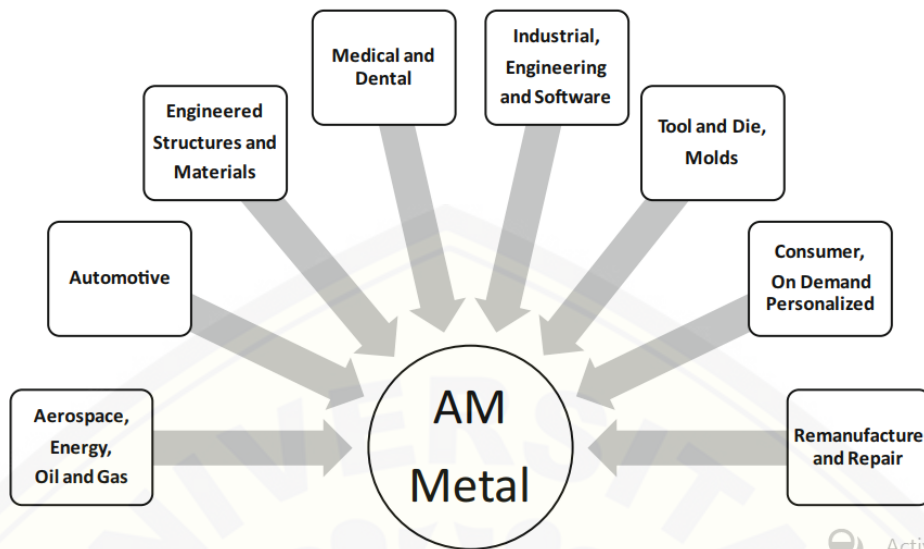
2.4 Metal 3D Printing

Salah satu bentuk pengembangan *3D printing* yang sangat berpengaruh di dunia industri dan menjadi awal dimulainya industri 4.0 adalah teknologi *Metal 3D Printing*. *Metal 3D printing* merupakan teknologi *additive manufacturing* yang

dapat membuat suatu objek dengan bahan logam di level yang lebih *advance*. Penemuan dan pengembangan teknologi *Metal 3D Printing* yang maju ini dianggap dapat menggeser teknologi produksi konvensional. *3D printing* menghadirkan keunggulan baru dalam membuat objek logam yang kompleks dan bentuk yang tidak terbatas dengan menggunakan komputer (Milewski, 2017). Dengan *3D printing*, objek bisa dicetak hanya dengan dibuat dalam bentuk 3D CAD tanpa memerlukan perencanaan proses produksi yang panjang (Gibson dkk., 2015). Proses *logam additive manufacturing* dibagi menjadi dua kelompok besar, yaitu *Powder Bed Fusion (PBF)* dan *Directed Energy Deposition (DED)*. PBF terdiri dari *Selective Laser Sintering/Melting (SLS/SLM)*, *Direct Metal Laser Sintering (DMLS)*, *Laser Cutting*, dan *Electron Beam Melting (EBM)*. Sedangkan DED terdiri dari *Laser Engineered Net Shaping (LENS)*, *Direct Metal Deposition (DMD)*, *Electron Beam Free Form Fabrication (EBFFF)* (Bhavar dkk., 2017). Dengan teknologi canggih yang dimiliki oleh *metal 3D printing*, manfaat dari teknologi ini adalah sebagai berikut.

- a. Bisa mencetak objek dengan geometri yang kompleks.
- b. Sifat material yang lebih baik.
- c. Rantai proses manufaktur yang lebih sederhana.
- d. Menyatukan bagian-bagian *part* menjadi satu *part*.

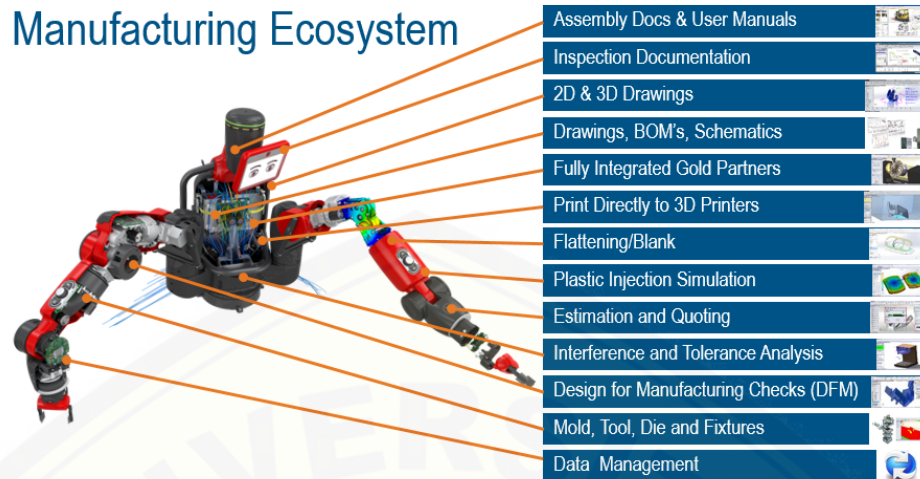
Material logam yang biasa digunakan pada *metal 3D printing* adalah aluminium, *stainless steel*, *maraging steel*, *titanium*, *cobalt chrome*, *precious metals (gold, silver, platinum, etc)*, *nickel super alloys* (Milewski, 2017), *copper*, dan *exotic metals (palladium, tantalum, etc)*. Teknologi *metal 3D printing* sudah banyak diaplikasikan di berbagai sektor, diantaranya dirgantara, pertahanan, *medical*, hingga *automotive* (Gupta, 2017). Aplikasi teknologi *metal 3D printing* lebih lengkapnya dapat dilihat pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Aplikasi *metal 3D printing* (Milewski, 2017)

2.5 Solidworks

Solidworks adalah program *computer aided design* (CAD) yang modern. Program ini membuat *desainer* bisa menciptakan suatu *solid model* yang tepat secara matematis dan dapat disimpan di *database* (Castro-Cedeno, 2014). Solidworks merupakan *software* program mekanikal 3D CAD yang berjalan pada Windows dan didirikan oleh Dassault Systemes. Software ini memiliki "parametrik" *modelling* yang solid yang diperuntukan untuk pemodelan desain 3D. Parametrik berarti bahwa dimensi dapat memiliki hubungan antara satu dengan yang lainnya dan dapat diubah pada saat proses desain dan secara otomatis mengubah *part* solid dan dokumentasi terkait (*blueprint*). Fitur-fitur solidworks dapat dilihat pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Fitur-fitur pada Solidworks

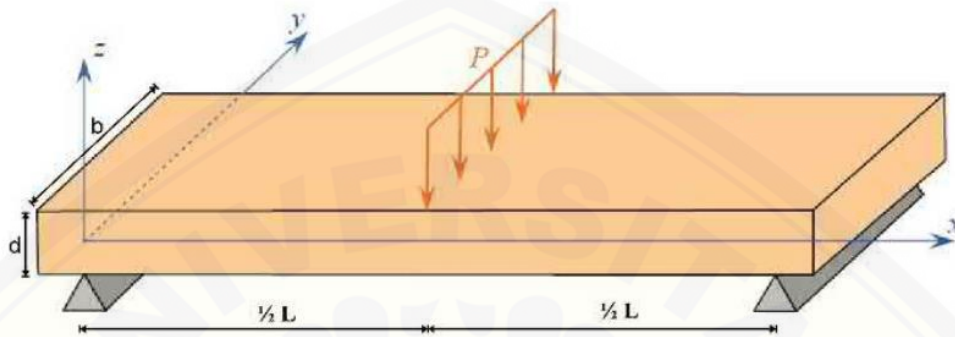
sumber: blogs.solidworks.com

Di Indonesia sudah banyak perusahaan yang menggunakan Solidworks sebagai aplikasi CADnya. Hal ini dikarenakan Solidworks memiliki banyak fitur yang dapat digunakan dan juga lebih *easy to use* dibandingkan dengan aplikasi CAD lainnya. Fitur-fitur yang dimiliki oleh Solidworks diantaranya Solidworks Composer, Solidworks Electrical, Solidworks Simulation, Solidworks Flow Simulation, Solidworks Motion, Solidworks Plastics, Solidworks Visualize, Photoview 360, Solidworks Routing, Solidworks Toolbox, dan Solidworks Utilities.

2.6 Pengujian Tekuk (*Bending*)

Uji *bending* atau uji tekuk merupakan salah satu pengujian yang sering digunakan untuk mengetahui sifat mekanis suatu benda uji. Uji *bending* adalah suatu pengujian dengan cara memberikan beban tekan secara perlahan kepada benda uji untuk mengetahui kekuatan lengkungnya dan keuletannya. Proses pemberian beban menggunakan *mandrel* atau pendorong yang akan memberikan beban pada bagian tengah material dan memaksa benda uji untuk menekuk di antara dua penyangga yang dipisahkan oleh jarak yang telah ditentukan. Benda uji akan mengalami deformasi akibat pemberian dua buah gaya yang berlawanan yang

bekerja secara bersamaan. Benda uji akan mengalami dua tegangan, yaitu tegangan tekuk pada bagian atas dan tegangan tarik pada bagian bawah. Gambar 2.10 berikut adalah skema pengujian *bending*.



Gambar 2.10 Skema pengujian *bending* (Berthelot, 1999)

Perhitungan yang digunakan untuk mencari kekuatan *bending* ASTM D790 adalah sebagai berikut.

$$\sigma = \frac{3 P L}{2 b d^2} \dots\dots\dots(2.1)$$

Keterangan:

σ = Tegangan bending (MPa)

P = Beban (N)

L = Jarak span (mm)

b = Lebar sampel (mm)

d = Tebal sampel (mm)

Dan untuk menghitung modulus elastisitas *bending* menggunakan persamaan berikut.

$$E_b = \frac{\sigma_b}{\epsilon_b} \dots\dots\dots(2.2)$$

Dimana regangan dapat dicari dengan persamaan berikut.

$$\epsilon_b = \frac{6 \cdot D \cdot d}{L^2} \dots\dots\dots(2.3)$$

Kemudian persamaan 2.1 dan 2.3 disubstitusikan ke dalam persamaan 2.2, maka diperoleh persamaan berikut.

$$E_b = \frac{L^3 \cdot m}{4 \cdot b \cdot d^3} \dots\dots\dots(2.4)$$

Keterangan:

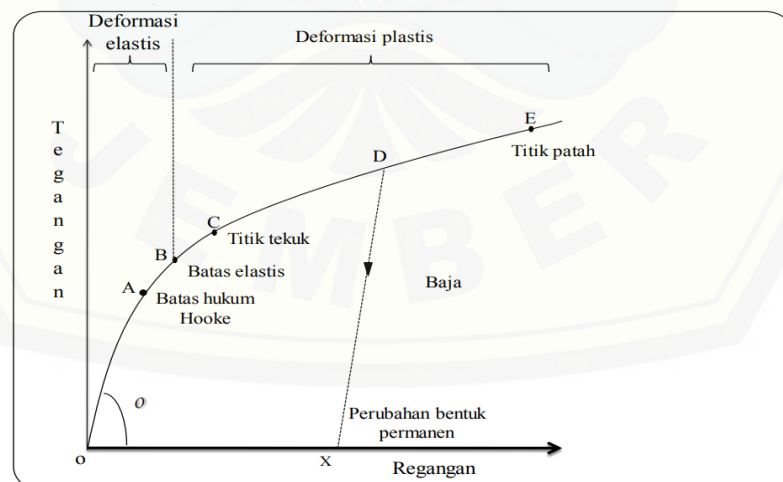
σ_b = Tegangan *bending* (N/mm²)

E_b = Modulus elastisitas (N/mm²)

m = Kemiringan garis singgung ke bagian garis lurus awal kurva defleksi beban (N/mm)

D = Defleksi (mm)

Berikut adalah grafik hubungan antara tegangan dan regangan yang ditunjukkan pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11 Grafik hubungan tegangan dan regangan (Sulaeman, 2018)

Sumbu x merupakan nilai regangan dari material dan sumbu y merupakan nilai tegangan yang terjadi pada material. Daerah deformasi dibedakan menjadi 2, yaitu daerah deformasi elastis pada titik O hingga B, dan deformasi plastis pada titik setelah titik B hingga E. Deformasi elastis adalah keadaan dimana material diberikan beban sehingga mengalami deformasi dan akan kembali ke bentuk semula saat beban dihilangkan. Sedangkan deformasi plastis adalah keadaan dimana material diberi beban yang melebihi kemampuan elastisnya sehingga beban mengalami deformasi yang tidak dapat kembali ke bentuk semula.

Berdasarkan grafik tegangan-regangan, titik O hingga A membuat garis linear (garis lurus). Keadaan ini adalah keadaan dimana perbandingan antara tegangan dan regangan adalah konstan. Konstanta ini disebut juga modulus elastisitas atau modulus young. Titik B merupakan batas elastis. Titik C merupakan *yield point* atau titik tekuk. Sedangkan titik E merupakan titik patah material. Tegangan maksimum terjadi pada titik sesaat sebelum material patah yang disebut *ultimate stress*.

2.7 Kriteria Kegagalan

Kegagalan material adalah keadaan dimana material tidak bisa digunakan kembali atau rusak. Ciri-ciri suatu material mengalami kegagalan adalah adanya retakan dan patahan yang menjalar ke beberapa bagian material sehingga menyebabkan kecacatan. Kriteria kegagalan umumnya diklasifikasikan menjadi dua, yaitu kegagalan ulet (*ductile failure*) dan kegagalan getas (*brittle failure*).

Ciri-ciri suatu material mengalami kegagalan ulet (*ductile failure*) adalah sebagai berikut.

- a. Terjadi deformasi plastis yang tinggi.
- b. Rambatan retakan yang lambat.
- c. Terdapat banyak serat pada permukaan patahan.
- d. Proses terjadinya patahan adalah diawali dengan necking, kemudian *microvoid*, dan patah.

Sedangkan ciri-ciri suatu material mengalami kegagalan getas (*brittle failure*) adalah sebagai berikut.

- a. Deformasi plastis tidak tinggi, bahkan cenderung tidak ada.
- b. Rambatan retakan yang cepat.
- c. Bentuk permukaan patahan rata (tanpa serat).
- d. Patahan terjadi secara tiba-tiba.

2.8 Metode Taguchi

Di bidang teknik, terdapat metode baru yang berbasis pada peningkatan kualitas dan proses yang disebut Metode Taguchi. Metode ini bertujuan untuk mengurangi biaya dan sumber daya untuk meminimalkan dampak perubahan tanpa menghilangkan sebab dan akibatnya, serta berusaha untuk membuat produk dan proses yang tidak sensitif terhadap berbagai faktor gangguan sehingga tujuan yang sesuai dapat dicapai. Bentuk dari faktor-faktor yang mengganggu tersebut antara lain material, sumber daya manusia (SDM), perlengkapan manufaktur, dan kondisi operasi lainnya (Soejanto, 2009). Metode Taguchi menjadikan proses dan produk memiliki karakteristik beberapa kemungkinan faktor perusak, sehingga metode ini disebut juga dengan *robust design*. Kelebihan metode Taguchi dibandingkan dengan metode yang lain adalah:

- a. Dapat melaksanakan penelitian yang melibatkan banyak level dan proses, sehingga lebih efisien.
- b. Memperoleh proses penghasilan produk secara robust dan konsisten terhadap variabel tidak terkontrol.
- c. Memberikan hasil bahwa kesimpulan mengenai level dari variabel proses yang menghasilkan respon optimum.

2.8.1 Desain Eksperimen

Desain eksperimen merupakan suatu proses evaluasi dari dua faktor ataupun lebih secara serentak terhadap kemampuan dalam mempengaruhi rata-rata atau variabilitas hasil gabungan dari karakteristik produk atau proses tertentu (Soejanto, 2009). Untuk mendapatkan hasil kombinasi pengujian yang efektif, variabel proses dan level variabel harus divariasikan. Beberapa kombinasi pengujian tertentu dapat diamati sehingga kumpulan hasil pengujian dapat sepenuhnya dianalisis.

Selanjutnya gunakan hasil analisis tersebut untuk menemukan variabel yang paling berpengaruh sehingga dapat memutuskan tindakan apa yang harus dilakukan untuk melakukan perbaikan lebih lanjut.

2.8.2 Rancangan Percobaan Taguchi

Rancangan percobaan pada metode taguchi secara umum terbagi menjadi dua tahap yang mencakup pendekatan penelitian, yakni sebagai berikut (Soejanto, 2009):

a. Tahap Perencanaan

Tahap ini merupakan tahap yang terpenting, dimana seorang peneliti diharuskan untuk mempelajari penelitian-penelitian sebelumnya. Kecermatan dalam tahap ini diperlukan untuk mendapatkan hasil penelitian mengenai informasi positif dan negatif. Informasi positif yang dimaksud adalah penelitian yang memberikan indikasi tentang variabel dan level yang mengarah pada performa produk yang meningkat, sementara informasi negatif adalah sebaliknya. Adapun langkah-langkah dalam tahap perencanaan ini adalah:

1) Perumusan Masalah

Dalam penelitian, perumusan masalah yang akan diteliti harus dirumuskan dengan jelas dan spesifik agar dapat diterapkan.

2) Penentuan Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian harus dapat menjelaskan tujuan dari adanya penelitian dengan rumusan masalah yang telah ditetapkan sebelumnya.

3) Penentuan Variabel Respon

Variabel respon atau yang biasa disebut sebagai variabel tak bebas memiliki nilai yang tergantung pada setiap variabel lain.

4) Pengidentifikasian Faktor-Faktor (Variabel Bebas)

Variabel bebas adalah variabel yang tidak tergantung pada variabel lainnya, sehingga pada tahap ini akan ditentukan mengenai variabel yang diselidiki pengaruhnya terhadap variabel respon. Karena dalam penelitian tidak semua variabel yang diperkirakan mempengaruhi

variabel respon itu harus diteliti, maka penelitian dapat dilakukan secara efektif dan efisien.

5) Pemisahan Faktor Kontrol dan Faktor Gangguan

Faktor Kontrol dan Faktor gangguan dalam metode taguchi perlu untuk diidentifikasi secara jelas karena pengaruhnya berbeda. Faktor kontrol sendiri adalah faktor yang nilainya dapat dikendalikan, sementara faktor gangguan adalah faktor yang nilainya tidak dapat dikendalikan (*factor noise*).

6) Penentuan Jumlah dan Nilai Level Faktor

Semakin banyak level yang akan dilakukan dalam penelitian, hasilnya akan semakin akurat meski biaya yang dikeluarkan juga semakin banyak. Oleh karenanya pemilihan jumlah level dalam penelitian merupakan hal yang penting karena akan mempengaruhi hasil dari penelitian tersebut.

7) Perhitungan Derajat Kebebasan

Derajat kebebasan merupakan konsep dalam mendeskripsikan seberapa besar suatu penelitian harus dilakukan dan seberapa banyak informasi yang dapat diberikan dengan adanya penelitian tersebut. Perhitungan derajat kebebasan dilakukan dalam menentukan jumlah penelitian guna menyelidiki variabel proses yang akan diamati. Derajat matriks ortogonal dapat ditentukan melalui persamaan:

$$V_{oA} = (\text{Banyak eksperimen} - 1) \dots\dots\dots (2.5)$$

Derajat kebebasan faktor dan level, (V_{fl}) untuk menghitung jumlah level yang diuji pada sebuah faktor dengan persamaannya adalah sebagai berikut:

$$V_{fl} = (\text{Banyak level} - 1) \dots\dots\dots (2.6)$$

Untuk mengetahui derajat kebebasan dari sebuah matrik eksperimen atau total derajat kebebasan dengan bentuk persamaannya sebagai berikut:

$$\text{Total } V_{fi} = (\text{Banyak faktor}) \times (V_{fi}) \dots\dots\dots (2.7)$$

8) Pemilihan Matriks Orthogonal

Matriks orthogonal memiliki kemampuan dalam mengevaluasi sejumlah variabel proses dengan jumlah percobaan yang minimum. Dalam melakukan pemilihan matriks ortogonal yang sesuai harus ditentukan oleh jumlah derajat kebebasan dari jumlah variabel proses dan jumlah levelnya.

$$L_a (b^c) \dots\dots\dots (2.8)$$

Keterangan:

L = Rancangan bujursangkar latin

a = Banyak baris atau eksperimen

b = Banyak level

c = Banyak kolom/faktor

Tabel 2.2 Contoh Tabel Matriks Orthogonal $L_4 (2^3)$

Matriks Orthogonal $L_4 (2^3)$			
Eksperimen	Faktor		
	A	B	C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1

sumber: (Soejanto, 2009)

b. Tahap Pelaksanaan

Tahapan berikutnya setelah tahapan perencanaan yaitu tahapan pelaksanaan yang mana tahapan ini juga merupakan salah satu tahapan terpenting. Berikut merupakan beberapa tahapan yang ada untuk mengonsep eksperimen taguchi diantaranya adalah sebagai berikut:

1) Jumlah Replikasi

Yang dimaksud dengan replikasi adalah suatu proses pengulangan kembali pada suatu eksperimen dengan menggunakan perlakuan yang

sama, sehingga ketelitian yang didapatkan akan semakin tinggi dan mengurangi tingkat kesalahan yang bisa terjadi (Soejanto, 2009).

2) Randomisasi

Randomisasi merupakan percobaan yang dimaksudkan untuk meratakan pengaruh yang terjadi antar faktor-faktor yang tidak dapat dikendalikan pada unit dari eksperimen, sebagai contoh daya mesin yang menurun dan permasalahan pada operator. Hal ini dapat mempengaruhi hasil yang didapat dari suatu percobaan. Pengaruh faktor-faktor tersebut dapat diminimalisir dengan melakukan penyebaran pengaruh selama percobaan melalui pengacakan urutan pada percobaan.

c. Tahap Analisis

Proses pengumpulan data, perhitungan, pengaturan data, dan penyajian data menjadi suatu tampilan tertentu dengan desain eksperimen yang dipilih merupakan bagian dari tahapan analisis yang tujuan utamanya adalah digunakan sebagai pengumpulan data dan pengolahan data. Pada metode taguchi dilakukannya tahap analisis bertujuan untuk mengetahui faktor signifikan yang berpengaruh pada penelitian. Perhitungan serta pengujian data yang ada pada tahap analisis dilakukan dengan pengujian statistik sebagai berikut:

1) Analisis Varians (ANOVA)

Anova merupakan sebuah metode analisis yang dapat memperkirakan nilai kuantitatif pengaruh dari faktor-faktor yang ada pada pengukuran respon. Model analisis dari anova ini adalah dengan memakai analisis varians dua arah yang berisi perhitungan derajat kebebasan, rata-rata jumlah kuadrat, jumlah kuadrat (Sum of Square), dan F-rasio (Soejanto, 2009). Berikut merupakan rumus dari persamaan ANOVA:

Menentukan jumlah kuadrat:

$$SS_A = \left[\sum_{i=1}^{KA} \left(\frac{Ai^2}{nAi} \right) \right] - \frac{T^2}{N} \dots\dots\dots(2.9)$$

Keterangan:

SS_A = Jumlah Kuadrat

KA = Jumlah level faktor

A_i = Level ke i faktor A

nA_i = Jumlah percobaan level ke i faktor A

T = Jumlah seluruh nilai data

N = Banyak data keseluruhan

Menentukan rata-rata kuadrat (mean square):

$$MSa = \frac{SSa}{va} \dots\dots\dots(2.10)$$

Jumlah kuadrat total:

$$SS_T = \sum_{i=1}^N y^2 \dots\dots\dots(2.11)$$

Dimana:

N = Jumlah percobaan

y = data yang diperoleh dari percobaan

Jumlah kuadrat karena rata-rata:

$$SS_m = n x \bar{y}^2 \dots\dots\dots(2.12)$$

Menentukan jumlah kuadrat error:

$$SS_{faktor} = SS_A + SS_b + SS_c \dots\dots\dots(2.13)$$

$$SS_e = SS_T + SS_m + SS_A \dots\dots\dots(2.14)$$

Menghitung F-ratio:

$$F\text{-ratio} = \frac{MSa}{MSe} \dots\dots\dots(2.15)$$

2) Uji F

Uji F merupakan pengujian dengan membandingkan variasi yang disebabkan oleh masing-masing variasi eror dan faktor. Variasi yang muncul dari individu masing-masing faktor karena tidak terkendali, itulah yang disebut dengan variasi error.

$$F_{\text{sumber}} = \frac{\text{variansi perlakuan} + \text{variansi error}}{\text{variansi error}} \dots\dots\dots (2.16)$$

Yang mana nilai dari F sumber akan dibandingkan dengan standar nilai F yang ada pada tabel harga α tertentu (Soejanto, 2009). Berikut adalah hipotesis pengujian dari suatu percobaan:

H_0 : Tidak ada pengaruh variasi perlakuan ($\mu_1 = \mu_2 = \mu_3$)

H_1 : Ada pengaruh variasi perlakuan ($\mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3$)

Apabila pada perhitungan nilai F hitung lebih kecil dari nilai F tabel maka H_0 diterima. Namun apabila yang terjadi adalah sebaliknya maka H_0 ditolak.

3) Strategi Pooling Up

Strategi pooling up merupakan suatu metode yang dirancang taguchi untuk memperkirakan variasi error yang terjadi pada anova. Hal ini dilakukan untuk menyebabkan estimasi dihasilkan lebih baik, dikarenakan strategi ini akan didapatkan beberapa variasi error dari faktor yang kurang berarti. Pada strategi ini aka memaksimalkan kolom yang dipertimbangkan signifikan, dan membuat keputusan signifikan faktor yang dapat berguna untuk percobaan selanjutnya (Soejanto, 2009).

4) Rasio S/N

Rasio S/N merupakan metode yang digunakan untuk mengetahui karakteristik kualitas produk dengan rancangan transformasi pengulangan, Sehingga penggunaannya ditujukan agar mengetahui level faktor mana saja yang berpengaruh pada eksperimen (Soejanto, 2009).

Pada metode Rasio S/N ada 3 karakteristik kualitas yaitu:

a) Semakin Kecil, Semakin Baik

Pada karakteristik ini batasan kualitas produk berada pada angka 0 yang mana semakin mendekati angka 0 maka hasil dari eksperimen tersebut dapat dinyatakan semakin baik. Perhitungan dari metode ini sebagai berikut (Soejanto, 2009).

$$S/N = - 10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^r Y_i^2 \right) \dots\dots\dots (2.17)$$

Dimana:

n = total pengulangan suatu trial

b) Semakin Besar, Semakin Baik

Pada karakteristik ini nilai dari suatu kualitas memiliki angka yang tidak terbatas. Yang mana nilainya bila semakin besar maka nilai tersebut merupakan nilai yang paling bagus. Perhitungan dari karakteristik ini bisa menggunakan persamaan (Soejanto, 2009).

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^r \frac{1}{Y_i^2} \right) \dots\dots\dots (2.18)$$

c) Tertuju Pada Nilai Tertentu

Pada karakteristik ini nilai yang dianggap paling optimal adalah nilai yang mendekati target nilai yang sudah dibuat. Adapun perhitungannya dapat menggunakan persamaan berikut (Soejanto, 2009):

$$S/N = -10 \log V_e \dots\dots\dots (2.19)$$

$$S/N = -10 \log \left(\frac{V_m - V_e}{nV_e} \right) \dots\dots\dots (2.20)$$

2.8.3 Interpretasi Hasil Eksperimen

Adapun tahapan yang dilakukan dalam interpretasi adalah sebagai berikut:

a. Persen Kontribusi

Persen kontribusi merupakan suatu fungsi dari jumlah kuadrat (SS) dari masing-masing faktor yang signifikan. Menghitung nilai dari persen kontribusi dapat dilakukan dengan rumus dibawah ini (Krishnaiah & Shahabudeen, 2012).

$$\rho = \frac{SS_A}{SS_T} \times 100\% \dots\dots\dots (2.21)$$

b. Interval Kepercayaan

Interval kepercayaan adalah harga taksiran yang kemungkinan bisa didapat dengan kondisi yang ditentukan. Harga taksiran yang dipergunakan untuk menafsirkan harga optimum yang didapat dari faktor dan taraf. Berikut merupakan beberapa perhitungan yang dipergunakan untuk menentukan nilai interval kepercayaan dibawah ini (Soejanto, 2009)

c. Interval kepercayaan untuk level faktor (CI₁)

$$CI_1 = \sqrt{\frac{F_{\alpha;1;ve} MS_e}{n}} \dots\dots\dots (2.22)$$

$$\mu_{Ak} = \bar{A}_k \pm CI_1 \dots\dots\dots (2.23)$$

$$\bar{A}_k - CI_1 \leq \mu_{Ak} \leq \bar{A}_k + CI_1 \dots\dots\dots (2.24)$$

Dimana:

$F_{\alpha;1;ve}$ = Rasio F

A = resiko

V_1 = 1

V_e = derajat kebebasan error

MS_e = rata-rata kuadrat error (Variansi kesalahan)

n = jumlah yang diteliti pada suatu kondisi

μ_{Ak} = dugaan rata-rata faktor A pada perlakuan (level) ke K

\bar{A}_k = rata-rata faktor A pada perlakuan ke k

K = 1,2,...

d. Interval kepercayaan pada kondisi perlakuan yang diprediksi (CI₂)

$$CI_2 = \sqrt{\frac{F_{\alpha;1;ve} MS_e}{n_{eff}}} \dots\dots\dots (2.25)$$

Dimana:

$$N_{eff} = \frac{N}{1 + (\text{jumlah dof yang berhubungan dengan estimasi A})}$$

N = total data seluruh percobaan

e. Interval kepercayaan untuk memprediksi eksperimen konfirmasi (CI₃)

$$CI_3 = \sqrt{F_{\alpha;1;ve} MS_e \left[\left(\frac{1}{n_{eff}} \right) + \left(\frac{1}{r} \right) \right]} \dots\dots\dots (2.26)$$

Dimana:

R = total sampel pada percobaan konfirmasi dan $r \neq 0$

V_2 = derajat bebas kesalahan pooling

n_{eff} = jumlah pengulangan efektif

2.8.4 Eksperimen Konfirmasi

Eksperimen konfirmasi adalah percobaan yang dilakukan untuk memeriksa kesimpulan yang didapat (Soejanto, 2009). Tujuan eksperimen konfirmasi adalah untuk memverifikasi:

1. Dugaan yang dibuat pada saat model performasi penentuan factor dan interaksinya.
2. Merancang parameter (factor) yang optimum hasil analisis dari hasil percobaan pada performasi yang diharapkan.

Langkah – langkah dari eksperimen konfirmasi adalah sebagai berikut.

1. Merancang kondisi optimum untuk faktor dan level yang signifikan.
2. Membandingkan rata – rata dan variasi hasil percobaan konfirmasi dengan rata – rata dan variansi yang diharapkan.

Eksperimen konfirmasi dinyatakan berhasil jika:

1. Terjadi perbaikan dari hasil proses yang ada (setelah eksperimen Taguchi dilakukan).
2. Hasil dari eksperimen konfirmasi dekat dengan nilai yang diprediksikan.

2.9 Hipotesis

Penelitian ini membahas mengenai analisis sifat lentur produk 3D *printing* dengan filamen PLA-*stainless steel*. Variasi parameter yang digunakan pada penelitian ini adalah *extruder temperature*, *layer height*, dan *raster angle*. Berdasarkan pengkajian literatur dan penelitian sebelumnya, hipotesis yang dapat diambil adalah sebagai berikut.

1. Semakin tinggi *extruder temperature*, maka produk memiliki kekuatan lentur yang semakin tinggi.
2. Semakin rendah *layer height*, maka produk memiliki kekuatan lentur yang semakin tinggi.
3. Semakin tinggi selisih nilai *raster angle*, maka produk memiliki kekuatan lentur yang semakin tinggi.

BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Jenis Penelitian dan Rancangan Penelitian

Jenis penelitian yang diterapkan adalah jenis eksperimental dan analisis untuk mengetahui pengaruh variasi parameter pada proses *metal 3D printing* terhadap sifat lentur spesimen uji *bending* ASTM D790 dengan filamen eSteel.

3.2 Waktu dan Tempat Penelitian

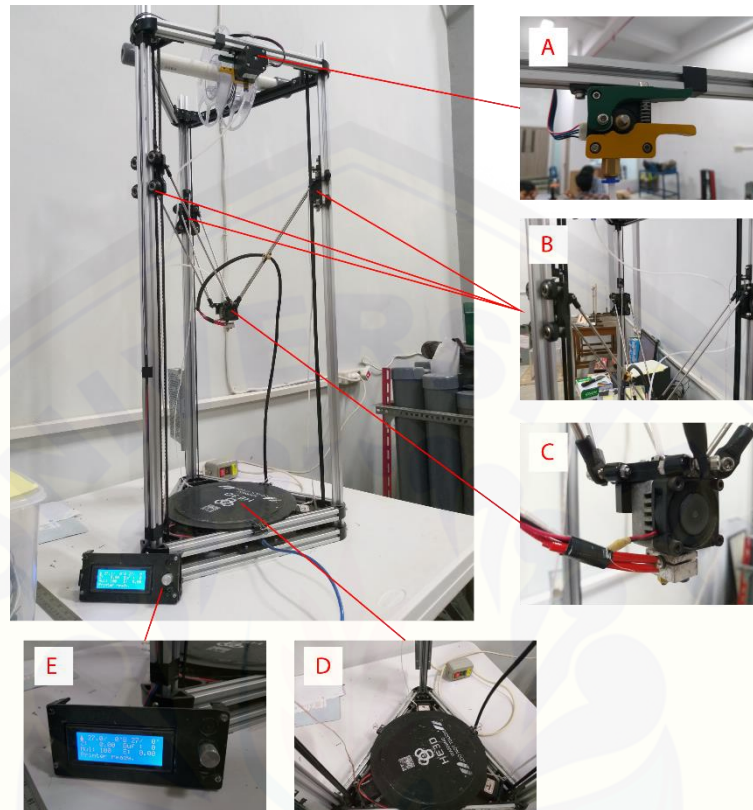
Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Perancangan Mekanik Jurusan Teknik Mesin Universitas Jember yang berada di Kampus Tegalboto, Jl. Kalimantan No. 37, Sumbersari, Krajan Timur, Kabupaten Jember, Jawa Timur. Penelitian dilaksanakan pada Januari 2021 – Juli 2021. Proses ini meliputi persiapan alat, uji coba, pengambilan data, analisis data, dan pengambilan kesimpulan.

3.3 Alat dan Bahan

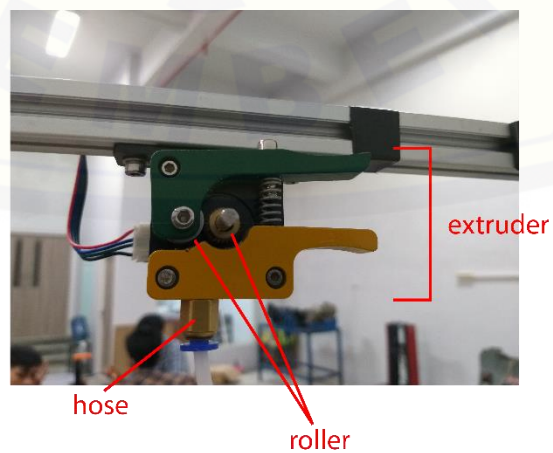
3.3.1 Alat

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

- a. *Software Solidworks 2016 (student version)*
Software Solidworks 2016 digunakan untuk membuat desain objek yang akan diuji. Desain objek yang telah dibuat kemudian disimpan dalam bentuk *file stl*.
- b. *Software Repetier Host 2.1.6*
Software Repetier Host 2.1.6 adalah *software* yang digunakan untuk mengatur setelan parameter objek yang akan dicetak di mesin *3D printing*.

c. Mesin 3D *printing* HE3D K200Gambar 3.1 Mesin 3D *printing* HE3D K200 beserta bagian-bagiannya

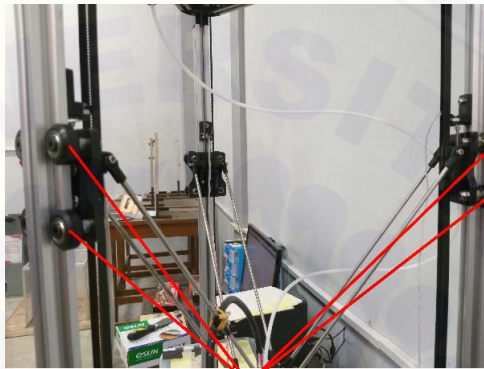
Berikut adalah bagian-bagian mesin 3D *printing* HE3D K200 berdasarkan alfabet pada gambar 3.1.

A. *Extruder (Cold End)*Gambar 3.2 Bagian-bagian *extruder*

Bagian-bagian dari *extruder* berdasarkan gambar 3.2 adalah sebagai berikut.

- *Roller*, berfungsi sebagai pendorong filamen ke *nozzle*
- *Hose*, adalah selang jalur filamen yang menghubungkan filamen dari *extruder* hingga ke *heat sink*

B. *Motion*

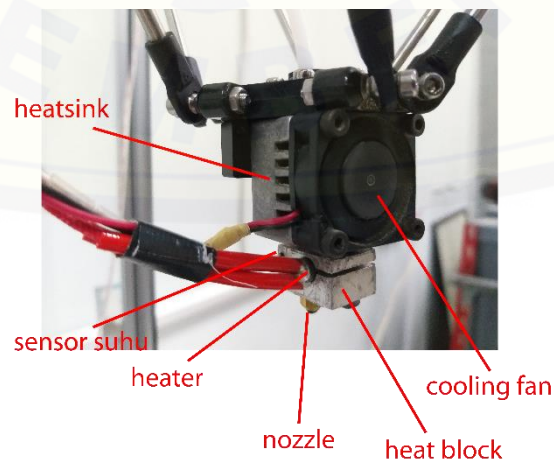


pulley

Gambar 3.3 Bagian-bagian *motion*

Pada *motion* terdapat tiga penggerak yang berfungsi sebagai penggerak *hot end* ke arah sumbu x, y, z. Setiap penggerak terdiri dari 4 buah *pulley* yang akan bergerak ke atas dan ke bawah sesuai lintasannya (*frame*).

C. *Extruder (Hot End)*

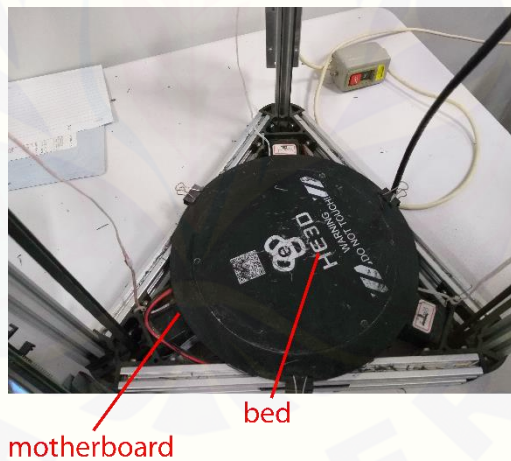


Gambar 3.4 Bagian-bagian *hot end*

Bagian-bagian dari *hot end* berdasarkan gambar 3.4 adalah sebagai berikut.

- *Heat sink*, berfungsi memastikan filamen masih dalam keadaan padat sampai ke *nozzle*.
- *Sensor suhu*, berfungsi sebagai pendeteksi suhu yang diletakkan pada *heat block*.
- *Heater*, adalah komponen yang berfungsi sebagai pemanas filamen.
- *Nozzle*, adalah tempat keluarnya filamen yang telah dilelehkan.
- *Heat block*, adalah tempat sensor suhu, *heater*, dan *nozzle*.
- *Cooling fan*, berfungsi mendinginkan filamen yang telah leleh pada *bed*.

D. *Bed*

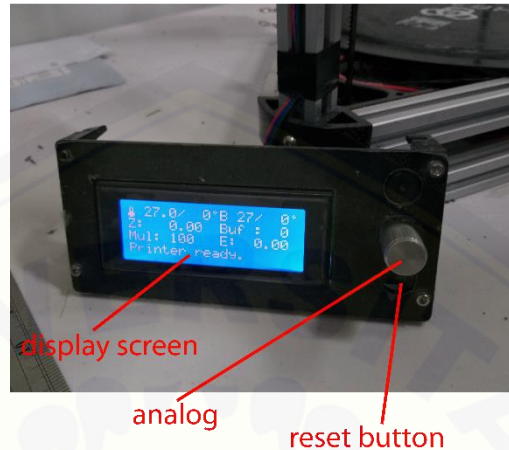


Gambar 3.5 Bagian-bagian *bed*

Bagian-bagian dari *bed* berdasarkan gambar 3.5 adalah sebagai berikut.

- *Bed*, yaitu tempat produk atau objek dicetak.
- *Motherboard*, adalah otak dari mesin 3D *printer*. Komponen ini bertanggung jawab atas kelancaran dari kinerja mesin. *Motherboard* terletak di bawah *bed*.

E. Interface



Gambar 3.6 Interface

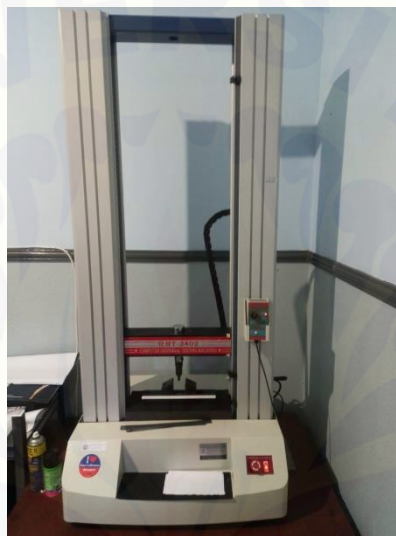
Bagian-bagian dari *interface* berdasarkan gambar 3.6 adalah sebagai berikut.

- *Display screen*, yaitu layar yang menampilkan pengaturan pada mesin 3D *printing*, seperti *extruder temperature*, *bed temperature*, *auto levelling*, dan lain-lain.
- *Analog*, berfungsi sebagai *controller* saat mengatur mesin 3D *printing* melalui layar LCD.
- *Reset button*, adalah tombol untuk memulai kembali mesin 3D *printing*.

Mesin 3D *printer* yang digunakan dalam penelitian ini adalah mesin HE3D K200 dengan spesifikasi sebagai berikut.

- *Brand name*: HE3D
- *Model number*: K200
- *Printing size*: 200 mm in diameter, 300 mm in height
- *Nozzle number*: 1
- *Extruder number*: 1
- *Filament size*: 1.75 mm (diameter)
- *Support material*: PLA, ABS, HIPS, PETG, *Metal*, etc.

- d. Kapi
Kapi digunakan untuk mengambil benda hasil 3D *printing* dan membersihkan *bed* 3D *printing* dari sisa dan kotoran yang ditimbulkan dari filamen.
- e. *Feeler Gauge*
Feeler gauge digunakan untuk mengukur jarak antara *nozzle* dan *bed* pada mesin 3D *printing*.
- f. Mesin Uji Universal



Gambar 3.7 Mesin uji universal

Alat uji *bending* merupakan alat yang digunakan untuk menguji kekuatan dan kemampuan suatu spesimen dengan cara memberikan beban linier kepada spesimen uji sehingga diketahui nilai kekuatannya. Alat uji *bending* yang digunakan merupakan mesin uji universal yang berada di Laboratorium Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember.

- g. *Software* Minitab
Software Minitab digunakan untuk mengolah data hasil eksperimen menggunakan Metode Taguchi.
- h. *Software* Microsoft Excel
Software Microsoft Excel digunakan untuk mengolah data hasil eksperimen menggunakan perhitungan ANOVA.

3.3.2 Bahan

Bahan – bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

a. Filamen eSteel

Filamen eSteel merupakan filamen paduan antara material PLA dan *Stainless Steel*. Komposisi dari filamen eSteel adalah 45% *stainless steel* dan 55% PLA. Data dari filamen eSteel dapat dilihat pada lampiran 1. Spesifikasi dari filamen eSteel adalah sebagai berikut.

- Diameter : 1,75 mm (tolerance ± 0.05 mm)
- *Print Temperature* : 200-220°C
- *Bed Temperature* : 25-70°C
- *Density* : 2,46 g/cm³



Gambar 3.8 Filamen eSteel

3.4 Rancangan Penelitian

3.4.1 Variabel Kontrol

Variabel kontrol adalah variabel yang bernilai konstan atau tidak berubah di dalam suatu penelitian. Variabel kontrol pada penelitian ini adalah pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Variabel kontrol

No.	Parameter	Nilai
1	<i>Bed temperature</i>	60 °C (± 2 °C)
2	<i>Print speed</i>	50 m/s
3	<i>Horizontal shell: solid layer</i>	<i>Top: 1 layer, Bottom: 1 layer</i>

No.	Parameter	Nilai
4	<i>Filament diameter</i>	1,75 mm ($\pm 0,05$ mm)
5	<i>Nozzle diameter</i>	0,6 mm
6	<i>Outer perimeter</i>	2
7	<i>Pattern</i>	<i>Rectilinear</i>
8	<i>Infill density</i>	100%

3.4.2 Variabel Terikat

Variabel Terikat adalah variabel yang dipengaruhi oleh variabel bebas. Jika variabel bebas adalah variabel sebab, maka variabel terikat merupakan variabel akibat. Variabel terikat pada penelitian ini adalah nilai kekuatan lentur maksimum dari spesimen uji.

3.4.3 Variabel Bebas

Variabel bebas adalah variabel yang mempengaruhi variabel terikat. Variabel bebas ditentukan oleh peneliti untuk dijadikan sebagai objek penelitian. Variabel bebas dari penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 3.2 di bawah ini.

Tabel 3.2 Nilai dari variabel bebas

Faktor Kendali	Parameter	Level 1	Level 2
A	<i>Extruder temperature</i>	220°C	225°C
B	<i>Layer height</i>	0,3 mm	0,4 mm
C	<i>Raster angle</i>	0/90	45/45

3.4.4 Perhitungan Derajat Kebebasan

Perhitungan derajat kebebasan digunakan untuk menentukan seberapa banyak eksperimen yang harus diamati. Terdapat 3 faktor dan 2 level pada penelitian ini, diantaranya:

- a) Faktor A adalah *extruder temperature* = 2 level
- b) Faktor B adalah *layer height* = 2 level

- c) Faktor C adalah *raster angle* = 2 level

Dengan adanya faktor (a,b,c,d) maka didapat perhitungan derajat kebebasan adalah sebagai berikut:

Tabel 3.3 Perhitungan Derajat Kebebasan

Faktor	Derajat Kebebasan	Total
A	(2-1)	1
B	(2-1)	1
C	(2-1)	1
Total derajat kebebasan		3

3.4.5 Pemilihan Matriks Orthogonal

Dari derajat kebebasan di atas, maka dapat ditentukan matriks orthogonal yang akan digunakan. Syarat dari digunakannya matriks orthogonal adalah matriks memiliki nilai derajat kebebasan sama atau lebih tinggi dari nilai derajat kebebasan eksperimen. Ada beberapa tipe matriks khusus tiga level yang mendekati perhitungan derajat kebebasan dari penelitian ini, yaitu:

- a. $L_4(2^3) = 3(2-1) = 3$
 b. $L_8(2^7) = 7(2-1) = 7$

Dari perhitungan diatas maka dapat ditunjuk bahwa matriks $L_4(2^3)$ memiliki nilai derajat kebebasan yang sama dengan faktor dan level pada penelitian. Oleh karena itu matriks $L_4(2^3)$ telah mencukupi untuk digunakan pada penelitian ini karena dasar pemilihan dari matriks adalah sama atau lebih tinggi. Adapun keterangan dari matriks $L_4(2^3)$ adalah

- L = Rancangan bujur sangkar latin
 4 = Banyaknya baris atau kombinasi
 2 = Banyaknya level
 3 = Banyaknya kolom atau faktor

3.4.6 Matriks Orthogonal Penelitian

Pada penelitian ini, matriks orthogonal $L_4(2^3)$ didesain memiliki lima replikasi spesimen uji. Hal ini dilakukan untuk membuat desain eksperimen dari penelitian ini lebih kuat dan sesuai dengan standar ASTM D790. Nilai yang didapatkan dari pengujian *bending* menggunakan mesin uji universal pada penelitian ini adalah nilai kekuatan lentur maksimum. Pada matriks orthogonal ditambahkan pula rata-rata dari kekuatan lentur untuk menemukan rata-rata kekuatan lentur dari lima replikasi spesimen. Total spesimen yang akan diuji pada penelitian ini adalah 20 spesimen. Matriks orthogonal pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 3.4.

Tabel 3.4 Matriks Orthogonal Penelitian

Kombinasi	Parameter Kendali			Nilai kuat lentur (MPa)					Rata-rata (MPa)
	<i>Extruder Temperature</i> (°C)	<i>Layer height</i> (mm)	<i>Raster angle</i> (°)	Replikasi					
				I	II	III	IV	V	
1	220	0,3	0/90						
2	220	0,4	45/45						
3	225	0,3	45/45						
4	225	0,4	0/90						

3.4.7 Analisis Variansi (ANOVA) dan Persen Kontribusi

ANOVA bertujuan untuk mengetahui beberapa faktor yang berpengaruh secara signifikan terhadap kinerja produk dengan menggunakan data nilai kekuatan lentur maksimum yang merupakan respon dari penelitian ini. Perhitungan ANOVA dari tiap-tiap variabel proses dengan menggunakan rumus adalah sebagai berikut.

Tabel 3.5 Tabel ANOVA

Sumber Variansi	Degree of freedom (df)	Sum of square (SS)	Mean of Square (MS)	F Hitung (F _o)
Faktor A	df _A = k _A - 1	$SS_A = \left[\sum_{i=1}^{k_A} \left(\frac{A_i^2}{n_{Ai}} \right) \right] - \frac{T^2}{N}$	$MS_A = \frac{SS_A}{df_A}$	$\frac{MS_A}{MS_E}$
Faktor B	df _B = k _B - 1	$SS_B = \left[\sum_{i=1}^{k_B} \left(\frac{B_i^2}{n_{Bi}} \right) \right] - \frac{T^2}{N}$	$MS_B = \frac{SS_B}{df_B}$	$\frac{MS_B}{MS_E}$
Faktor C	df _C = k _C - 1	$SS_C = \left[\sum_{i=1}^{k_C} \left(\frac{C_i^2}{n_{Ci}} \right) \right] - \frac{T^2}{N}$	$MS_C = \frac{SS_C}{df_C}$	$\frac{MS_C}{MS_E}$
Error	df _E = df _T - df _A - df _B - df _C	SS _E = SS _T - SS _A - SS _B - SS _C	$MS_E = \frac{SS_E}{df_E}$	
Total	df _T = N - 1	$SS_T = \sum_{i=1}^n (y - \bar{y})^2$		

Perhitungan analisis variasi dilakukan menggunakan rumus pada Tabel 3.5 adalah sebagai berikut:

- a. Menghitung jumlah kuadrat total (*sum of square*)

$$SST = \sum_{i=1}^n (y - \bar{y})^2 \dots\dots\dots(3.1)$$

- b. Menghitung jumlah kuadrat setiap variabel proses (*sum of square*)

$$SS_A = \left[\sum_{i=1}^{k_A} \left(\frac{A_i^2}{n_{Ai}} \right) \right] - \frac{T^2}{N} \dots\dots\dots(3.2)$$

- c. Menghitung kuadrat tengah (*mean of square*)

$$MS_A = \frac{SS_A}{df_A} \dots\dots\dots(3.3)$$

- d. Menghitung persen kontribusi setiap parameter

$$\rho_A = SS_A/SS_T \dots\dots\dots(3.4)$$

Perhitungan analisis varian pada penelitian ini menggunakan *software* Minitab yang akan diperoleh data seperti pada Tabel 3.6.

Tabel 3.6 Hasil ANOVA

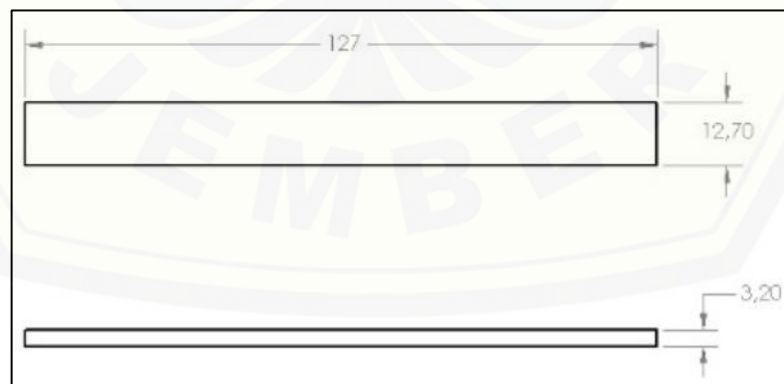
Variabel	DF	SS	MS	F	P	ρ
<i>Extruder Temperature</i>						
<i>Layer height</i>						
<i>Raster angle</i>						
<i>Error</i>						
Total						

3.5 Pelaksanaan Penelitian

Pelaksanaan penelitian meliputi beberapa hal, yaitu mulai dari proses desain spesimen uji *bending* hingga analisis data. Adapun tahapan pelaksanaan adalah sebagai berikut.

3.5.1 Tahap Persiapan

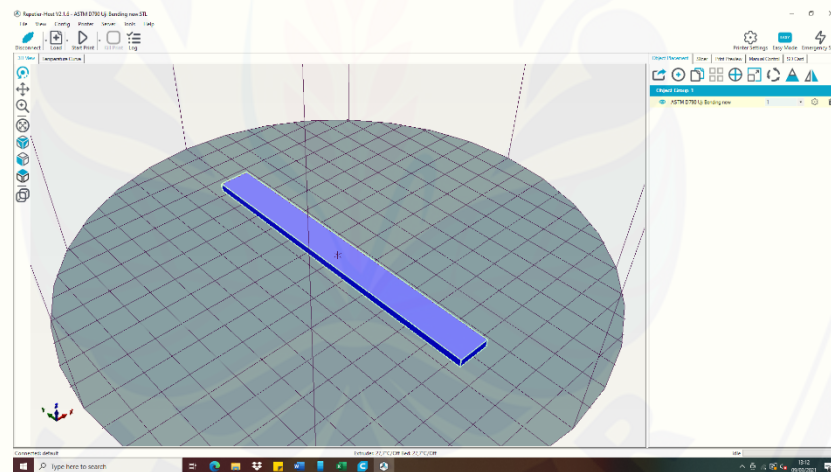
Tahap persiapan diawali dengan menggambar dan mendesain spesimen uji *bending* D790 menggunakan *software* Solidworks 2016. Selanjutnya desain spesimen disimpan dalam format stl. agar bisa dilakukan *slice* pada *software* Repetier Host. Berikut adalah dimensi dari spesimen uji *bending*. Dimensi dari spesimen uji *bending* D790 dapat dilihat pada gambar 3.9.

Gambar 3.9 Dimensi spesimen uji *bending* D790

3.5.2 Tahap Pencetakan Spesimen

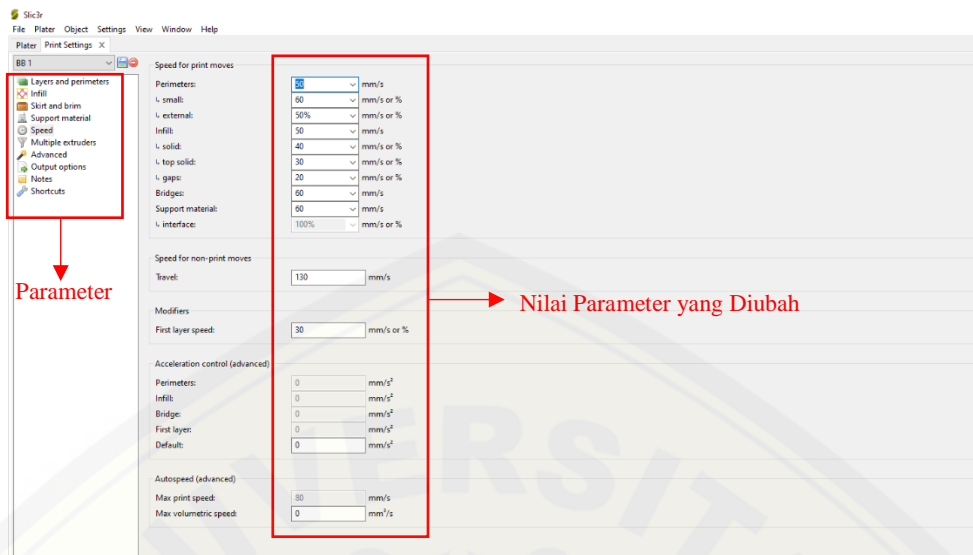
Berikut adalah beberapa tahapan pencetakan spesimen uji *bending* menggunakan mesin 3D *printing*.

- Menyambungkan mesin 3D *printing* ke listrik, kemudian menghidupkan mesin 3D *printing* dengan cara menekan tombol *on*.
- Menghubungkan mesin 3D *printing* dengan komputer menggunakan kabel usb sehingga mesin 3D *printing* terhubung dengan *software* Repetier Host.
- Mengatur jarak *nozzle* dengan *bed* menggunakan *feeler gauge* dan mengatur *Z offset* pada *software* Repetier Host.
- Pilih menu *add* pada Repetier Host untuk menambahkan spesimen yang akan dicetak. Selanjutnya mencari file *stl* dari desain spesimen uji *bending* ASTM D790, kemudian tambahkan, maka akan terlihat seperti gambar 3.10.



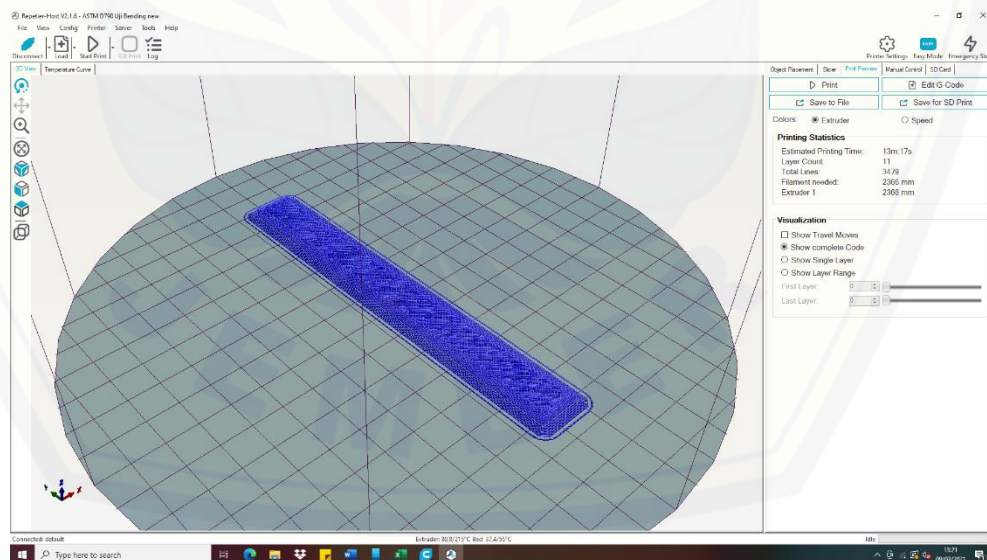
Gambar 3.10 Tampilan spesimen pada Repetier Host

- Melakukan *preheat* dan *load filament* melalui *software* Repetier Host untuk memastikan filamen dalam kondisi siap cetak (tidak tersumbat).
- Mengatur nilai *extruder temperature*, *layer height*, dan *raster angle* serta parameter lainnya pada *software* Repetier Host. Tampilan pengaturan parameter dapat dilihat pada gambar 3.11.



Gambar 3.11 Tampilan pengaturan parameter

- g. Kemudian klik *slice*, maka akan tampil *print preview* seperti pada gambar 3.12

Gambar 3.12 Tampilan *print preview* pada Repetier Host

- h. Klik tombol *home* terlebih dahulu untuk memposisikan mesin 3D *printing* pada posisi *home*.

- i. Klik *print*, maka mesin akan secara otomatis melakukan pencetakan spesimen uji *bending* ASTM D790
- j. Melakukan pencetakan sebanyak 20 spesimen dengan parameter yang telah ditetapkan.
- k. Memberikan penamaan pada spesimen uji *bending* berdasarkan parameternya.

3.5.3 Tahap Pengujian

Berikut adalah beberapa tahapan pengujian *bending* menggunakan mesin universal.

- a. Menyiapkan spesimen uji *bending* yang akan diuji.
- b. Menyiapkan alat uji *bending*.
- c. Melakukan pengujian *bending* menggunakan mesin uji universal.
- d. Melakukan pencatatan hasil pengujian berdasarkan variasi parameter yang telah ditetapkan.

3.6 Pengambilan Data

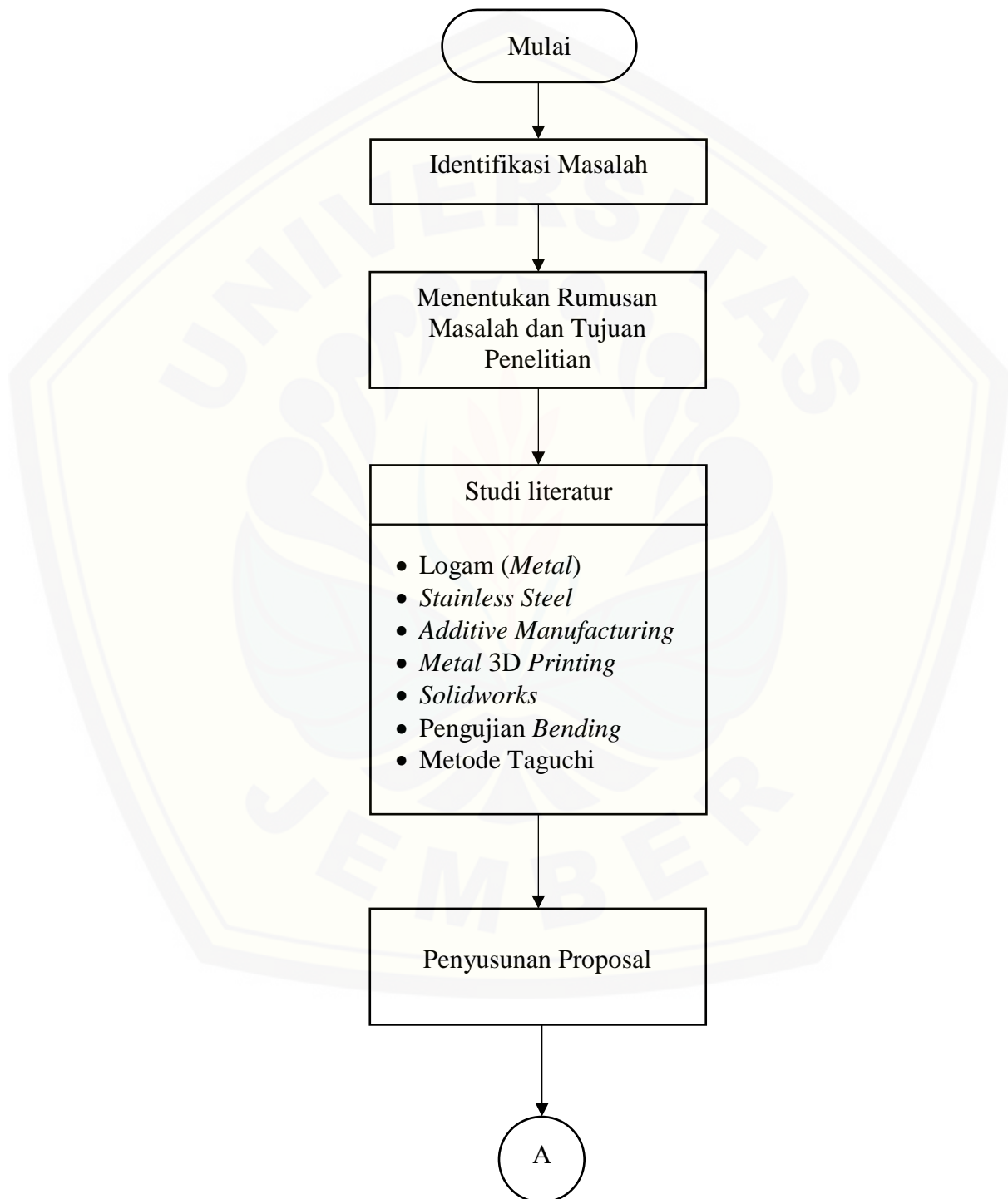
Nilai kekuatan *bending* dapat ditentukan dengan cara menguji spesimen uji menggunakan mesin uji universal. Pengujian ini bersifat merusak, sehingga nilai kekuatan *bending* dicatat dengan menampilkan nilai tertinggi dari kekuatan spesimen sebelum spesimen mengalami rusak. Metode yang digunakan dalam mengolah data – data penelitian adalah menggunakan metode taguchi. Perhitungan analisis varian pada penelitian ini menggunakan *software* Microsoft Excel.

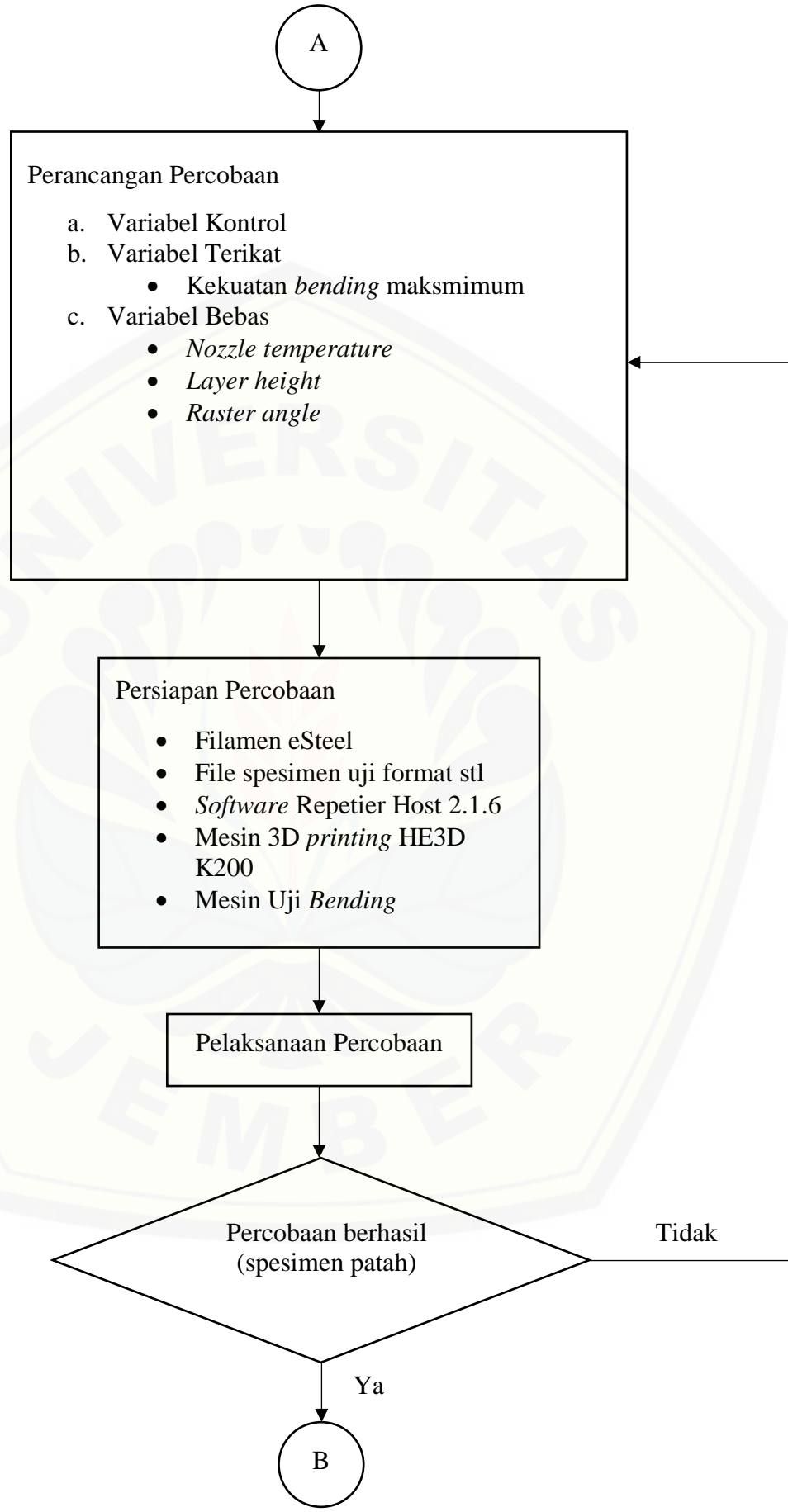
3.7 Karakteristik Respon Optimum

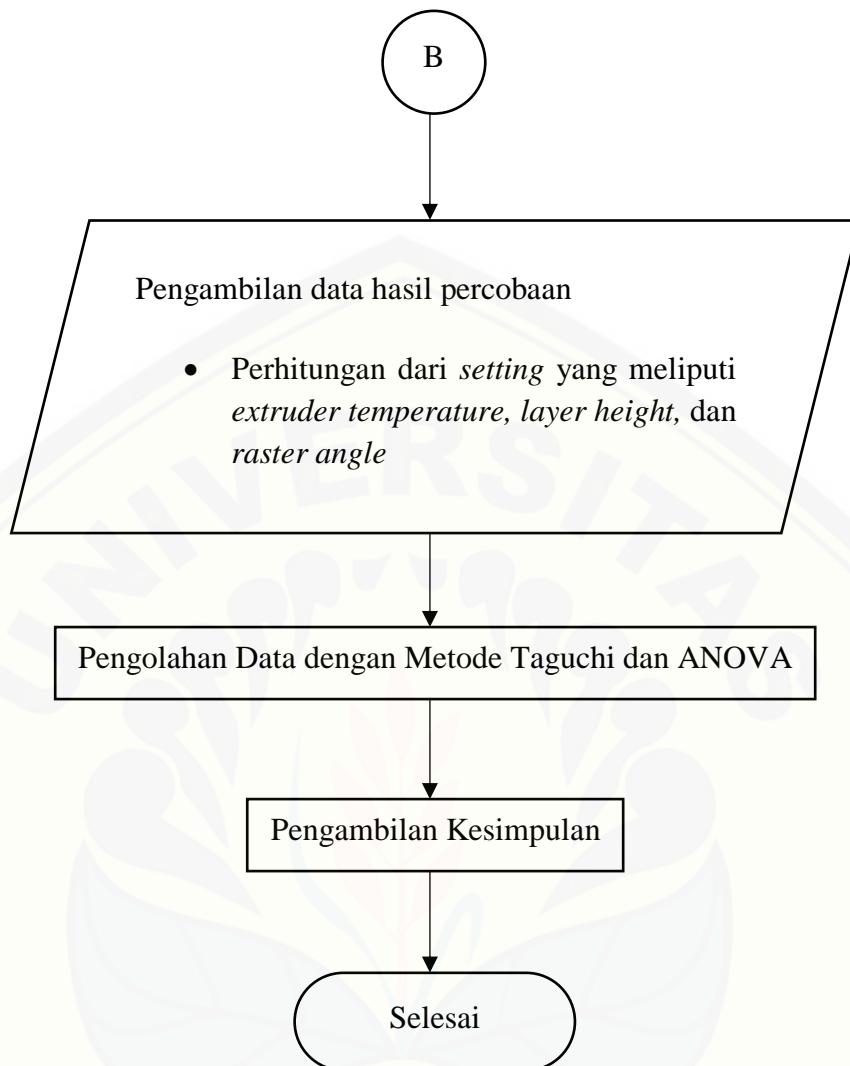
Karakteristik respon optimum yang digunakan pada penelitian ini adalah *larger is better*. Karakteristik ini berlaku untuk nilai kekuatan *bending* optimum dari masing-masing pengujian.

3.8 Diagram Alir Penelitian

Adapun diagram alir pada penelitian ini ditunjukkan pada gambar 3.13 di bawah ini.







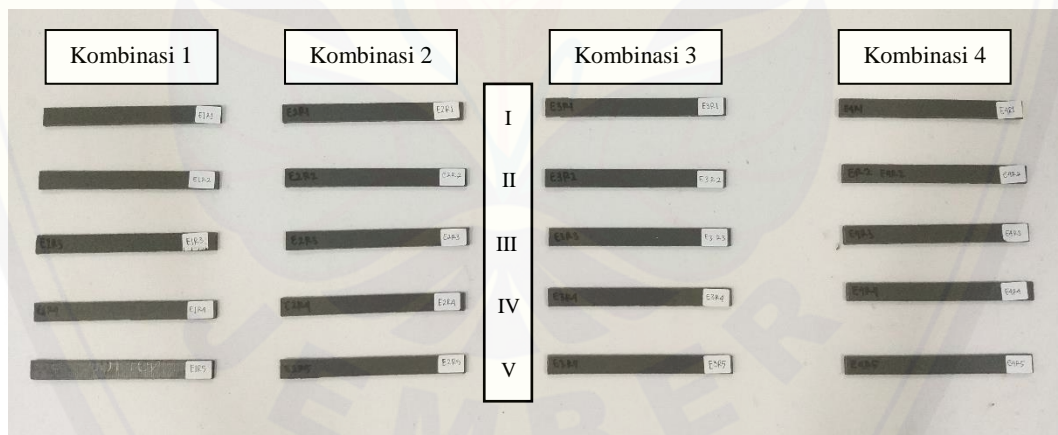
Gambar 3.13 Diagram alir penelitian

BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil

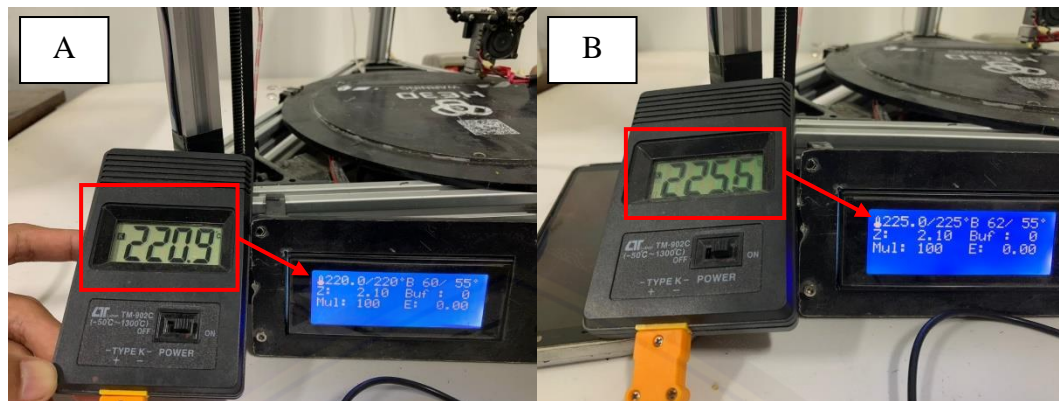
4.1.1 Hasil 3D *Printing* Spesimen Uji Bending ASTM D790

Pencetakan 3D dilakukan di Laboratorium Rekayasa Mekanik, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Jember. Mesin yang digunakan untuk mencetak spesimen adalah mesin 3D *printing* jenis HE3D K200. Pencetakan spesimen uji *bending* ASTM D790 disesuaikan dengan matriks orthogonal L_4 (2^3) pada Tabel 3.4. Proses pencetakan diurut mulai dari kombinasi 1 hingga kombinasi 4. Setiap selesai dicetak, spesimen diberi label sebagai tanda atau identitas untuk membedakan spesimen satu dengan yang lainnya. Proses pencetakan dapat dilihat pada Lampiran 5. Berikut adalah hasil 3D *printing* spesimen uji *bending* ASTM D790 berdasarkan kombinasi dan replikasi (angka romawi) yang ditunjukkan pada Gambar 4.1.



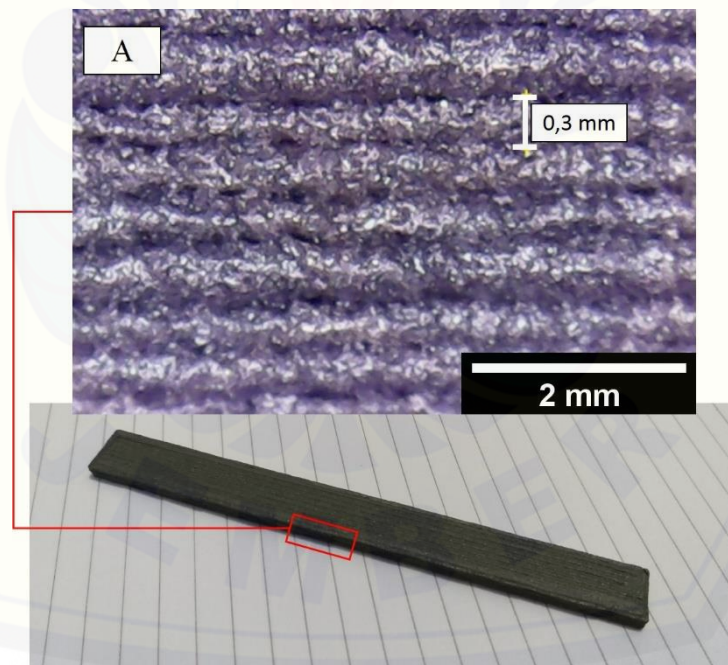
Gambar 4.1 Hasil 3D *printing* spesimen uji *bending*

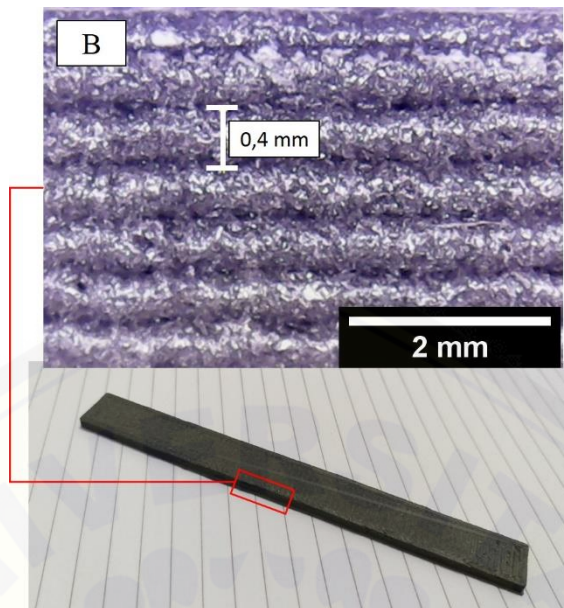
Parameter yang divariasikan dalam proses 3D *printing* ini adalah *extruder temperature*, *layer height*, dan *raster angle*. *Extruder temperature* yang digunakan pada penelitian ini adalah 220°C dan 225°C. Gambar 4.2 adalah foto validasi suhu yang digunakan dalam pencetakan menggunakan termokopel.



Gambar 4.2 Validasi *extruder temperature* yang digunakan (A) 220°C dan (B) 225°C

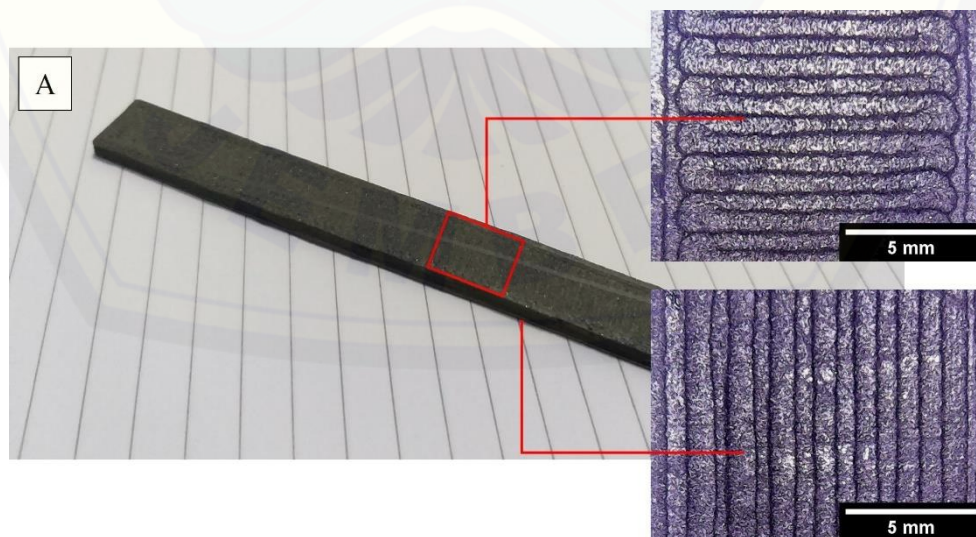
Layer height yang digunakan pada proses 3D *printing* pada penelitian ini adalah 0,3 mm dan 0,4 mm. Berikut adalah foto mikro *layer height* sebagai validasi ukuran *layer height* sebenarnya yang ditunjukkan pada Gambar 4.3.

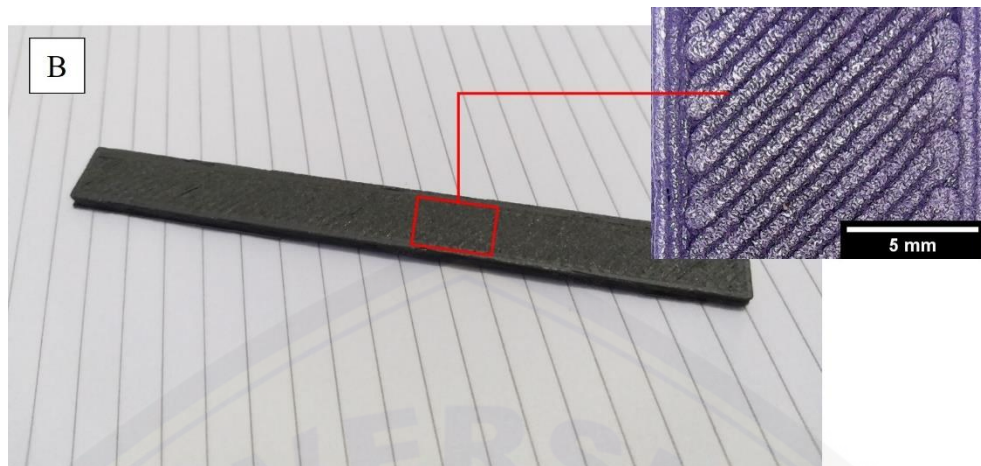




Gambar 4.3 (A) Spesimen kombinasi 1 dengan *layer height* 0,3 mm (B) Spesimen kombinasi 2 dengan *layer height* 0,4 mm

Raster angle merupakan sudut pengisian filamen dalam proses 3D printing. *Raster angle* yang digunakan pada penelitian ini adalah *bidirectional angle*, dengan variasi $0^{\circ}/90^{\circ}$ dan $45^{\circ}/45^{\circ}$. Berikut adalah foto mikro *raster angle* yang ditunjukkan pada Gambar 4.4.

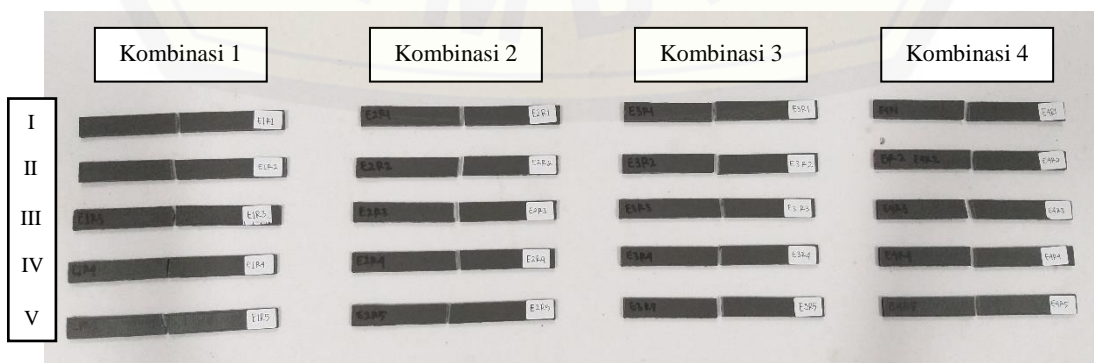




Gambar 4.4 (A) Spesimen kombinasi 4 dengan raster angle $0^{\circ}/90^{\circ}$ (B) Spesimen kombinasi 2 dengan raster angle $45^{\circ}/45^{\circ}$

4.1.2 Hasil Pengujian *Bending*

Proses pengambilan data adalah dengan cara melakukan pengujian *bending* (uji tekan) untuk mengetahui kekuatan lentur maksimum dari produk 3D *printing* dengan material PLA-*stainless steel*. Pengujian *bending* ini dilakukan di Laboratorium Instrumentasi di Fakultas Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Jember. Mesin yang digunakan adalah mesin uji universal HT-2402. Spesimen uji mengalami kegagalan atau patah pada bagian tengah. Hal ini karena pembebanan diberikan pada titik tengah spesimen. Gambar spesimen uji *bending* ASTM D790 berdasarkan kombinasi dan replikasi (angka romawi) setelah pengujian *bending* ditunjukkan pada Gambar 4.5 dan Lampiran 6 serta hasil pengujian *bending* ditunjukkan pada Tabel 4.4.

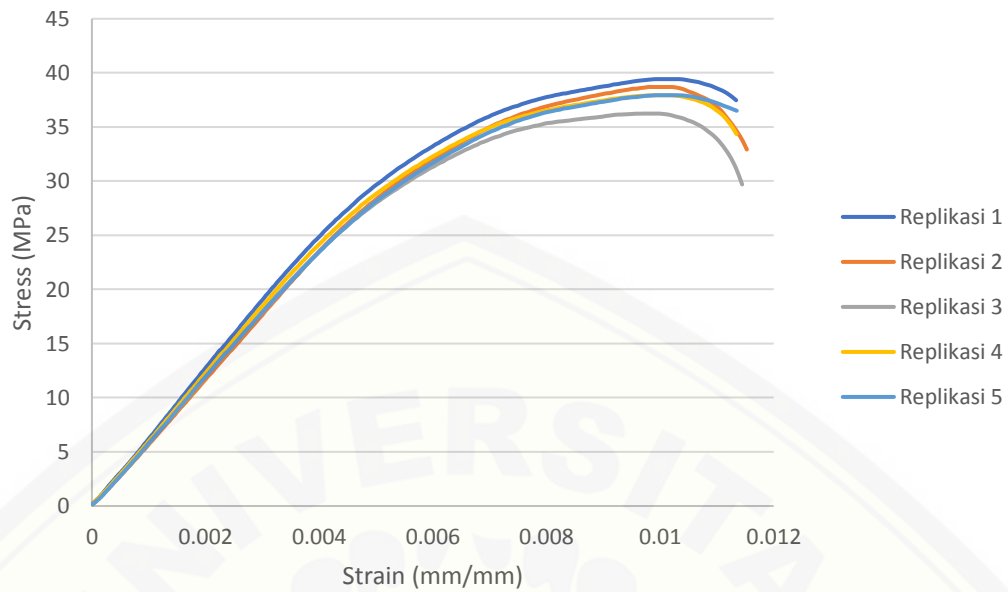


Gambar 4.5 Spesimen uji *bending* setelah pengujian

Tabel 4.1 Data hasil pengujian

Kombinasi	Faktor Kendali			Replikasi	Kekuatan lentur (MPa)	Rata-rata (MPa)
	<i>Extruder Temperature</i> (°C)	<i>Layer Height</i> (mm)	<i>Raster Angle</i> (°)			
1	220	0,3	0/90	I	39,42	38,05
				II	38,70	
				III	36,24	
				IV	37,94	
				V	37,94	
2	220	0,4	45/45	I	37,19	37,54
				II	37,89	
				III	38,07	
				IV	37,33	
				V	37,20	
3	225	0,3	45/45	I	34,27	34,95
				II	34,71	
				III	35,18	
				IV	34,81	
				V	35,77	
4	225	0,4	0/90	I	39,04	38,46
				II	37,65	
				III	38,89	
				IV	38,95	
				V	37,79	

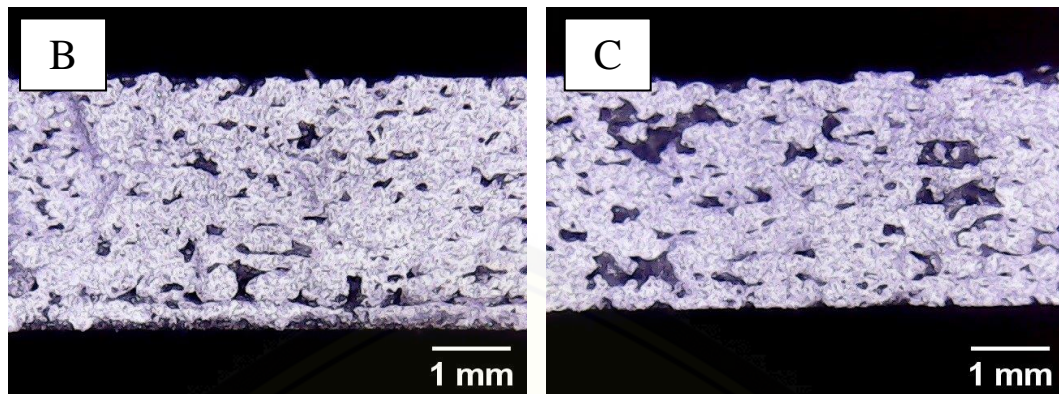
Berdasarkan data pengujian *bending* yang disajikan pada Tabel 4.1, didapatkan bahwa rata-rata kekuatan lentur tertinggi adalah 38,46 MPa oleh kombinasi 4 dan kekuatan lentur terendah adalah 34,95 MPa oleh kombinasi 3. Hasil data pengujian dapat dilihat pada Lampiran 2. Grafik tegangan-regangan ditunjukkan pada Lampiran 4 dan berikut adalah contoh grafik tegangan-regangan pengujian *bending* dari kombinasi 1 yang ditunjukkan pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6 Grafik tegangan-regangan kombinasi 1

Berdasarkan grafik di atas, dapat disimpulkan bahwa sifat material dari produk *metal 3D printing* adalah getas. Hal ini karena regangan yang dihasilkan sangat kecil dan memiliki elastisitas yang rendah. Gambar 4.7 adalah foto mikro patahan dari spesimen uji *bending* yang diamati menggunakan mikroskop digital.





Gambar 4.7 (A) Gambar patahan spesimen setelah pengujian (B) Foto mikro sisi patahan spesimen dengan kekuatan bending tertinggi dan (C) terendah

4.1.3 Perhitungan Rasio S/N

Rasio S/N (rasio *Signal-to-Noise*) merupakan rasio antara *signal* (faktor yang dapat dikendalikan) dengan *noise* (faktor yang tidak dapat dikendalikan). Rasio ini mengukur level kinerja terhadap level faktor gangguan pada kinerja. Rasio ini mengevaluasi stabilitas kinerja dari karakteristik *output*. Kinerja yang baik dapat diukur dari tingginya rasio S/N. Terdapat beberapa karakteristik kualitas dalam metode perhitungan rasio S/N, yaitu *smaller is better* (semakin kecil, semakin baik), *larger is better* (semakin besar, semakin baik), dan *nominal is better* (tertuju pada nilai tertentu). Pada penelitian ini digunakan karakteristik kualitas *larger is better*, karena semakin tinggi kekuatan lentur yang dihasilkan, maka semakin baik kualitas produknya. Perhitungan rasio S/N *larger is better* dapat dihitung menggunakan rumus pada Persamaan 2.18 dan menggunakan aplikasi Minitab yang dapat dilihat pada Lampiran 2. Berikut adalah contoh perhitungan rasio S/N pada kombinasi pertama.

$$S/N \text{ Ratio} = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y^2} \right]$$

$$S/N = -10 \log \left[\frac{1}{5} \left(\frac{1}{(39,42)^2} + \frac{1}{(38,70)^2} + \frac{1}{(36,24)^2} + \frac{1}{(37,94)^2} + \frac{1}{(37,94)^2} \right) \right]$$

$$S/N = 31.596$$

Hasil perhitungan rasio S/N terhadap kekuatan lentur selengkapnya ditunjukkan pada Tabel 4.2 sebagai berikut.

Tabel 4.2 Hasil perhitungan rasio S/N

Kombinasi	Nilai kekuatan lentur (MPa)					Rasio S/N (dB)
	Replikasi I	Replikasi II	Replikasi III	Replikasi IV	Replikasi V	
1	39,42	38,70	36,24	37,94	37,94	31,60
2	37,19	37,89	38,07	37,33	37,20	31,49
3	34,27	34,71	35,18	34,81	35,77	30,87
4	39,04	37,65	38,89	38,95	37,79	31,70
		Min.				30,87
		Max.				31,70

4.1.4 Kombinasi Variasi Optimal

Tujuan dari penerapan Metode Taguchi dalam sebuah penelitian adalah untuk mendapatkan faktor atau kombinasi faktor yang optimal. Faktor dan level yang optimal didapatkan dari nilai rasio S/N tertinggi dari beberapa faktor dan level yang digunakan dalam penelitian. Contoh perhitungan rasio S/N dari parameter *extruder temperature* level 1 adalah sebagai berikut.

$$\bar{A}_1 = \frac{31,5962 + 31,4879}{2}$$

$$\bar{A}_1 = \frac{63,0841}{2}$$

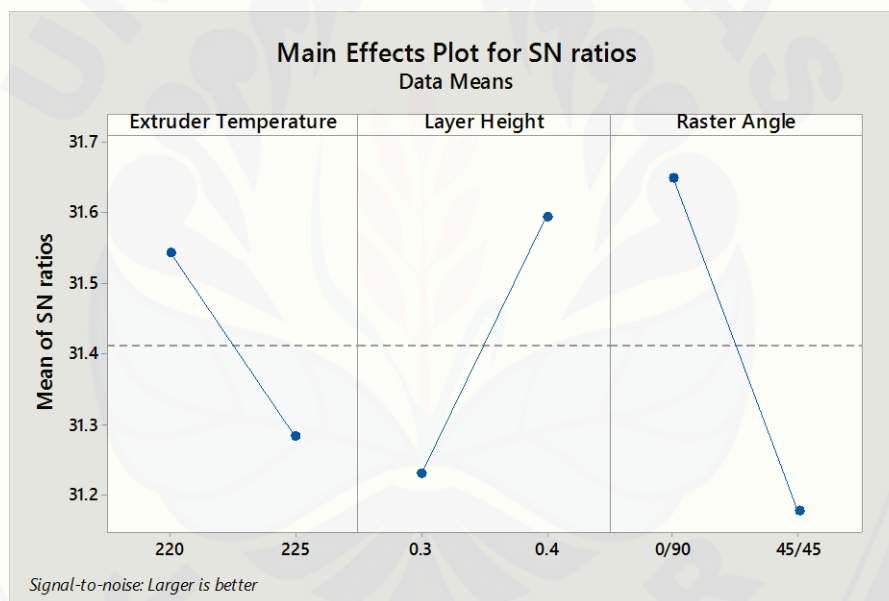
$$\bar{A}_1 = 31,54 \text{ dB}$$

Hasil perhitungan rasio S/N tiap level dari faktor selengkapnya ditunjukkan pada Tabel 4.3 sebagai berikut.

Tabel 4.3 Hasil perhitungan rasio S/N tiap level dari faktor

Faktor Kendali	Rata-rata rasio S/N		Selisih
	Level 1	Level 2	
<i>Extruder Temperature</i>	31,54	31,28	0,26
<i>Layer Height</i>	31,23	31,59	0,36
<i>Raster Angle</i>	31,65	31,18	0,47

Plot rata-rata rasio S/N pada tiap level dari faktor yang digunakan dalam penelitian ini, yaitu *extruder temperature*, *layer height*, dan *raster angle* ditunjukkan pada Gambar 4.8.



Gambar 4.8 Plot rata-rata rasio S/N tiap level dari faktor

Berdasarkan Gambar 4.8, titik tertinggi menunjukkan bahwa level dari setiap faktor merupakan level yang optimal. Oleh karena itu, kombinasi level dari setiap faktor yang optimal untuk menghasilkan kekuatan lentur yang optimal ditunjukkan pada Tabel 4.4 sebagai berikut.

Tabel 4.4 Kombinasi parameter respon optimal

Faktor Kendali	Level	Nilai
<i>Extruder Temperature</i>	1	220°C
<i>Layer Height</i>	2	0,4 mm
<i>Raster Angle</i>	1	0°/90°

4.1.5 Perhitungan ANOVA

Analysis of variance (ANOVA) adalah suatu metode perhitungan yang memungkinkan secara kuantitatif memperkirakan kontribusi dari setiap faktor pada semua pengukuran respon. Model analisis yang digunakan adalah analisis varian dua arah. Tabel analisis varian dua arah terdiri dari perhitungan derajat kebebasan, jumlah kuadrat, rata-rata jumlah kuadrat, dan *F-ratio*. Berikut adalah perhitungan ANOVA dua arah terhadap nilai kekuatan lentur.

- a. Jumlah kuadrat total (*sum of square*)

$$SS_T = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$$

$$SS_T = (39,423 - 37,249)^2 + (38,698 - 37,249)^2 + (36,241 - 37,249)^2 \\ + \dots + (37,788 - 37,249)^2$$

$$SS_T = 46,864$$

- b. Jumlah kuadrat tiap faktor (faktor A: *extruder temperature*)

$$SS_A = \left[\sum_{i=1}^{KA} \left(\frac{A_i^2}{n_{Ai}} \right) \right] - \frac{T^2}{N}$$

$$SS_A = \left[\frac{377,92^2}{10} + \frac{367,054^2}{10} \right] - \frac{744,974^2}{20}$$

$$SS_A = 27755,2165316 - 27749,3130338$$

$$SS_A = 5,9034978$$

- c. Jumlah kuadrat karena *error*

$$Se = SS_T - SS_A - SS_B - SS_C$$

$$Se = 46,8639 - 5,9035 - 11,2860 - 20,2568$$

$$Se = 9,4176$$

- d. Rata-rata kuadrat tiap faktor (faktor A: *extruder temperature*)

$$MS_A = \frac{SS_A}{df_A}$$

$$MS_A = \frac{5,9034978}{1}$$

$$MS_A = 5,9034978$$

- e. Rata-rata kuadrat *error*

$$MS_E = \frac{Se}{df_E}$$

$$MS_E = \frac{9,4176}{16}$$

$$MS_E = 0,5886$$

- f. F-ratio (faktor A: *extruder temperature*)

$$F_A = \frac{MS_A}{MS_E}$$

$$F_A = \frac{5,9035}{0,5886}$$

$$F_A = 10,0297$$

Perhitungan ANOVA menggunakan aplikasi Microsoft Excel dapat dilihat pada Lampiran 3. Nilai F-Tabel didapatkan dari tabel distribusi F dengan tingkat kepercayaan 95% yang disajikan pada Lampiran 8. Hasil perhitungan ANOVA faktor kendali terhadap kekuatan lentur selengkapnya ditunjukkan pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5 ANOVA faktor kendali

Faktor Kendali	DoF	SS	MS	F	P
<i>Extruder Temperature</i>	1	5,9035	5,9035	10,0297	<i>Significant</i>
<i>Layer Height</i>	1	11,2860	11,2860	19,1744	<i>Significant</i>
<i>Raster Angle</i>	1	20,2568	20,2568	34,4153	<i>Significant</i>
<i>Error</i>	16	9,4176	0,5886		
<i>Total</i>	19	46,8639			

4.1.6 Persen Kontribusi

Persen kontribusi mengindikasikan kontribusi masing-masing faktor atau interaksi terhadap variasi total. Dengan mengendalikan faktor-faktor dengan kontribusi tinggi, variasi total dapat dikurangi yang mengarah pada peningkatan kinerja proses/produk (Krishnaiah & Shahabudeen, 2012). Berikut adalah contoh perhitungan persen kontribusi pada parameter *extruder temperature*.

$$\rho_A = \frac{SS_A}{SS_T} \times 100\%$$

$$\rho_A = \frac{5,9035}{46,8639} \times 100\%$$

$$\rho_A = 12,60 \%$$

Hasil perhitungan persen kontribusi selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 4.6 sebagai berikut.

Tabel 4.6. Persen kontribusi setiap faktor kendali

Faktor Kendali	Persen Kontribusi (ρ)
<i>Extruder Temperature</i>	12,60%
<i>Layer Height</i>	24,08%
<i>Raster Angle</i>	43,22%
<i>Error</i>	20,10%
<i>Total</i>	100%

4.1.7 Prediksi Respon Optimal

Sebelumnya pada Tabel 4.3 telah diketahui kombinasi faktor yang dapat menghasilkan kekuatan lentur yang optimum. Faktor-faktor yang berpengaruh signifikan terhadap kekuatan lentur optimal adalah sebagai berikut.

- Extruder temperature* (°C) pada level 1
- Layer height* (mm) pada level 2
- Raster angle* (°) pada level 1

Perhitungan nilai prediksi rata-rata kekuatan lentur menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$\bar{\mu} = \gamma_m \sum_{i=1}^n (\bar{\gamma}_i - \gamma_m)$$

$$\bar{\mu} = 37,25 + (37,79 - 37,25) + (38,00 - 37,25) + (38,26 - 37,25)$$

$$\bar{\mu} = 37,25 + (0,54) + (0,75) + (1,01)$$

$$\bar{\mu} = 39,55 \text{ MPa}$$

Dari perhitungan di atas diperoleh nilai prediksi kekuatan lentur dari kombinasi faktor yang optimal sebesar 39,55 MPa. Penentuan interval kepercayaan rata-rata kekuatan lentur prediksi dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut.

$$N_{eff} = \frac{\text{jumlah total eksperimen}}{1 + \text{jumlah derajat kebebasan}}$$

$$N_{eff} = \frac{4 \times 5}{1 + (1 + 1 + 1)}$$

$$N_{eff} = \frac{20}{1 + 3}$$

$$N_{eff} = \frac{20}{4}$$

$$N_{eff} = 5$$

Maka hasil perhitungan interval kepercayaan prediksi hasil optimal adalah sebagai berikut.

Diketahui: $F_{(0,05;1:16)} = 4,494$ dan $MS_e = 0,5886$

$$CI = \pm \sqrt{\frac{F_{(\alpha,1,ve)}MS_e}{N_{eff}}}$$

$$CI = \pm \sqrt{\frac{4,494 \times 0,5886}{5}}$$

$$CI = \pm \sqrt{\frac{2,6452}{5}}$$

$$CI = \pm \sqrt{0,5290}$$

$$CI = \pm 0,73$$

Maka interval kepercayaan untuk rata-rata kekuatan lentur pada tingkat kepercayaan 95% adalah sebagai berikut.

$$\mu_{prediksi} - CI \leq \mu_{prediksi} \leq \mu_{prediksi} + CI$$

$$39,55 - 0,73 \leq 39,55 \leq 39,55 + 0,73$$

$$38,82 \leq 39,55 \leq 40,28$$

4.1.8 Eksperimen Konfirmasi

Eksperimen konfirmasi dilakukan untuk melakukan validasi terhadap kesimpulan yang diperoleh dari penelitian. Kesimpulan yang diperoleh merupakan kesimpulan awal hingga dilakukannya eksperimen konfirmasi sebagai validasi terhadap kesimpulan awal. Pada penelitian ini, eksperimen konfirmasi digunakan untuk menguji kombinasi dari faktor-faktor optimal pada Tabel 4.3 dan memvalidasi apakah kekuatan lentur yang dihasilkan optimal atau tidak.

Pengujian eksperimen konfirmasi akan dilakukan sebanyak 5 kali replikasi sesuai dengan jurnal ASTM D790. Grafik tegangan terhadap regangan dari hasil

pengujian eksperimen konfirmasi disajikan pada Lampiran 7. Berikut adalah data hasil pengujian *bending* eksperimen konfirmasi yang disajikan pada Tabel 4.7 sebagai berikut.

Tabel 4.7 Data hasil pengujian *bending* eksperimen konfirmasi

Percobaan	Nilai kekuatan lentur (MPa)					Rata-rata (MPa)
	Replikasi I	Replikasi II	Replikasi III	Replikasi IV	Replikasi V	
Eksperimen Konfirmasi	39,48	38,97	39,64	39,96	39,69	39,54

$$N_{eff} = \frac{\text{jumlah total eksperimen}}{1 + \text{jumlah derajat kebebasan}}$$

$$N_{eff} = \frac{4 \times 5}{1 + (1 + 1 + 1)}$$

$$N_{eff} = \frac{20}{1 + 3}$$

$$N_{eff} = \frac{20}{4}$$

$$N_{eff} = 5$$

$$CI = \pm \sqrt{F_{(\alpha,1,ve)} MS_e \left[\frac{1}{N_{eff}} + \frac{1}{r} \right]}$$

$$CI = \pm \sqrt{F_{(0,05;1,16)} MS_e \left[\frac{1}{N_{eff}} + \frac{1}{r} \right]}$$

$$CI = \pm \sqrt{4,494 \times 0,5886 \left[\frac{1}{5} + \frac{1}{5} \right]}$$

$$CI = \pm \sqrt{4,494 \times 0,5886 \left[\frac{1}{10} \right]}$$

$$CI = \pm\sqrt{0,26451684}$$

$$CI = \pm 0,51$$

Maka interval kepercayaan untuk rata-rata adalah:

$$\mu_{konfirmasi} - CI \leq \mu_{konfirmasi} \leq \mu_{konfirmasi} + CI$$

$$39,54 - 0,51 \leq 39,54 \leq 39,54 + 0,51$$

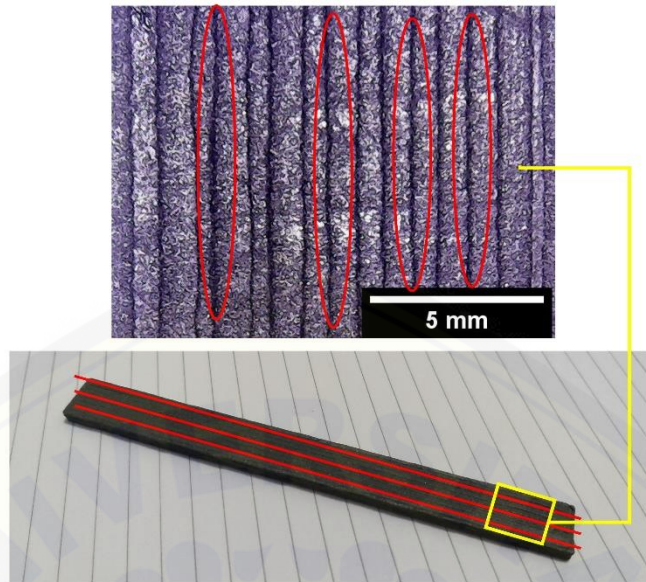
$$39,03 \leq 39,54 \leq 40,05$$

4.2 Pembahasan

4.2.1 Raster Angle

Raster angle merupakan faktor yang sangat berpengaruh terhadap sifat lentur produk *metal 3D printing*. Pada penelitian ini, kontribusi *raster angle* terhadap kekuatan lentur produk *metal 3D printing* merupakan kontribusi tertinggi dari faktor lainnya, yaitu sebesar 43,22%. *Raster angle* yang paling optimal untuk menghasilkan kekuatan lentur yang baik pada penelitian ini adalah *raster angle* level 1, yaitu 0°/90°. Fenomena yang sama terjadi pada penelitian yang dilakukan oleh Wu, dkk., (2015) dengan menggunakan filamen polyether-ether-ketone (PEEK), bahwa semakin tinggi nilai *raster angle* maka semakin rendah kekuatan lenturnya. Variasi *raster angle* yang digunakan adalah 0°/90°, 30°/-60°, dan 45°/-45°. Hasil yang didapatkan bahwa *raster angle* 0°/90° menghasilkan kekuatan lentur yang tertinggi.

Raster angle 0°/90° menghasilkan kekuatan lentur yang tinggi dikarenakan ikatan antar *layer* yang terbentuk lebih baik. Dengan sudut pengisian 0°, maka ikatan antar *layer* yang tercipta adalah sepanjang dari total panjang spesimen. Dengan begitu, sudut 0°/90° menghasilkan kekuatan lentur yang paling optimal. Berikut adalah gambar ikatan antar *layer* pada *raster angle* 0° pada spesimen yang ditunjukkan pada Gambar 4.9. Garis dan lingkaran berwarna merah menunjukkan ikatan antar *layer* yang terjadi pada spesimen.

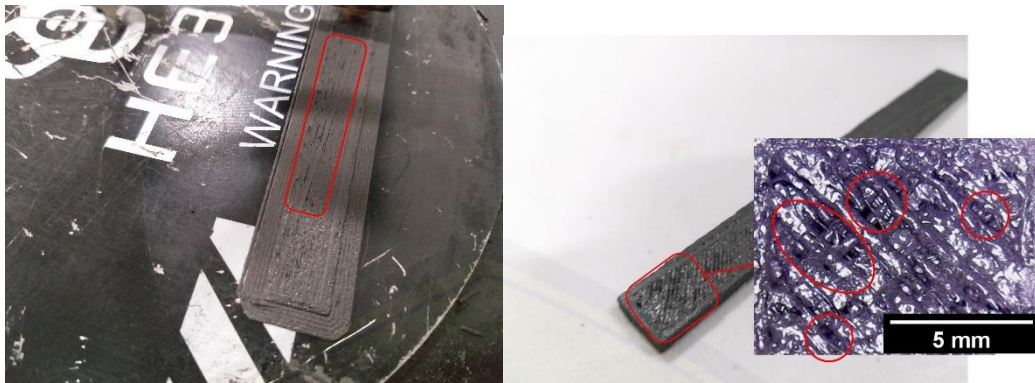


Gambar 4.9 Ikatan antar *layer* pada *raster angle* 0°

4.2.2 *Layer Height*

Layer height merupakan faktor yang berpengaruh terhadap sifat lentur produk *metal 3D printing*. Pada penelitian ini, kontribusi *layer height* terhadap kekuatan lentur produk *metal 3D printing* sebesar 24,08%. *Layer height* yang paling optimal untuk menghasilkan kekuatan lentur pada penelitian ini adalah *layer height* level 2, yaitu 0,4 mm. Hal ini sama dengan penelitian yang dilakukan oleh Nugroho. dkk., (2018) menggunakan filamen PolyLactid Acid (PLA), bahwa kekuatan lentur dan kekuatan tarik akan meningkat seiring dengan meningkatnya *layer height*.

Peran *layer height* terhadap kekuatan lentur spesimen adalah semakin kuat ikatan antar *layer* yang dihasilkan, maka semakin tinggi pula kekuatan lenturnya. Pada kasus ini, *layer height* 0,3 mm memiliki ikatan antar *layer* yang lemah dibandingkan 0,4 mm. Hal ini juga disebabkan ketika melakukan pencetakan dengan *layer height* 0,3 mm terjadi fenomena cacat pada pengisian. Sementara ketika melakukan pencetakan menggunakan *layer height* 0,4 mm, cacat pada pengisian tidak terjadi. Berikut adalah cacat yang terjadi pada saat pengisian menggunakan *layer height* 0,3 mm yang ditunjukkan oleh tanda merah pada Gambar 4.10.

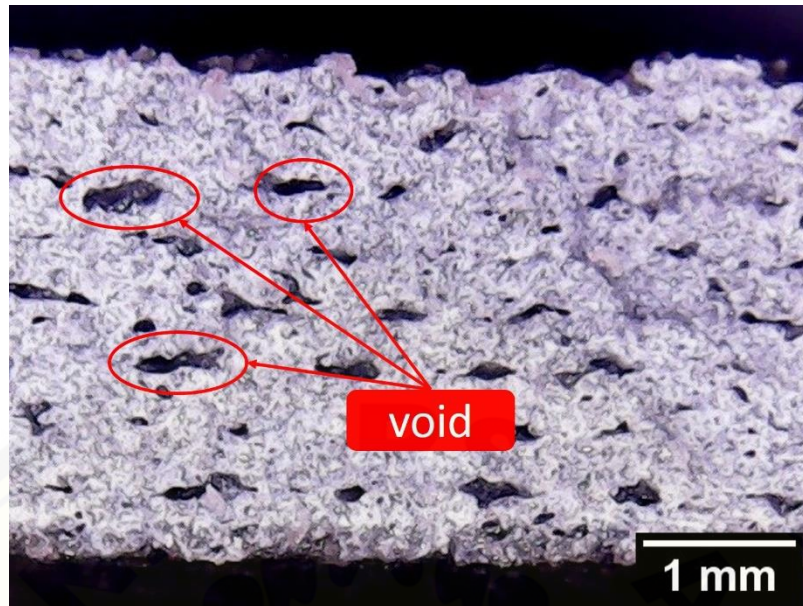


Gambar 4.10 Cacat yang terjadi pada pengisian dengan *layer height* 0,3 mm

4.2.3 *Extruder Temperature*

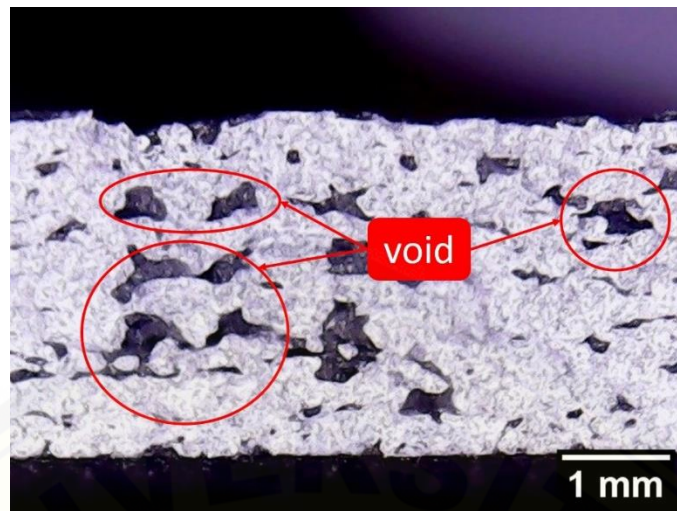
Extruder temperature merupakan faktor yang berpengaruh terhadap sifat lentur produk *metal 3D printing*. *Extruder temperature* pada proses *3D printing* mempengaruhi viskositas ekstrusi dari filamen dan *microvoid* selama pencetakan FDM. *Extruder temperature* juga mempengaruhi melekatnya antar *layer* pada produk *3D printing*. Pada penelitian ini, kontribusi dari *extruder temperature* terhadap kekuatan lentur produk *metal 3D printing* adalah 12,60%. *Extruder temperature* yang optimal untuk menghasilkan kekuatan lentur adalah level 1, yaitu 220°C. Hal ini dapat diperkuat dengan gambar mikro dari patahan spesimen setelah dilakukan pengujian *bending*. Foto mikro patahan spesimen diambil menggunakan mikroskop digital.

Gambar 4.11 merupakan bentuk patahan dari spesimen dengan *extruder temperature* 220°C. Dapat dilihat bahwa ikatan antar *layer* yang tercipta sangat baik. Susunan *layer by layer* tidak terlihat yang artinya *layer* melekat atau melebur dengan sempurna. Hal ini menyebabkan spesimen menghasilkan kekuatan lentur yang baik karena ikatan antara *layer* satu dan *layer* lainnya sangat baik. Terdapat beberapa *void* pada bagian patahan (lingkaran merah), namun *void* yang tercipta tidak besar dan tidak terlalu banyak. Adanya *void* berpengaruh pada kekuatan lentur spesimen, karena awal terjadinya kegagalan pada spesimen dimulai dari *void* atau *airgap*.

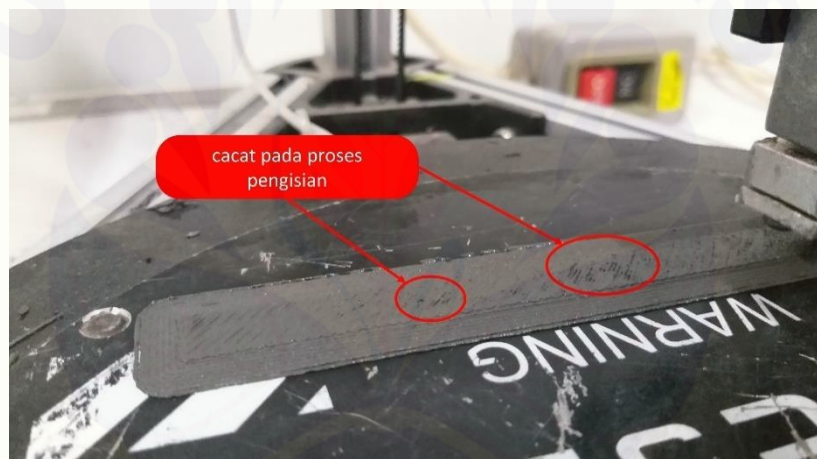


Gambar 4.11 Foto mikro patahan spesimen dengan *extruder temperature* 220°C

Gambar 4.12 merupakan bentuk patahan dari spesimen dengan *extruder temperature* 225°C. Dapat dilihat bahwa ikatan antar *layer* yang terbentuk tidak baik. Hal ini dapat dilihat dari banyaknya *void* yang dihasilkan dan ukuran *void* yang terbentuk juga lebih besar dibandingkan *extruder temperature* 220°C. Fenomena juga terjadi pada penelitian yang dilakukan oleh Xu, dkk., (2021) dimana *extruder temperature* tertinggi yang digunakan mengalami penurunan kekuatan lentur dibandingkan *extruder temperature* yang lebih rendah. Hal ini terjadi karena suhu yang digunakan terlalu tinggi sehingga membentuk banyak pori-pori. Selain itu pada proses pencetakan dengan menggunakan suhu 225°C mengalami cacat pada saat pengisian seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.13. Hal ini bisa terjadi karena filamen yang dipanaskan dengan suhu yang terlalu tinggi menyebabkan hasil ekstrusi filamen yang lebih cair sehingga hasil ekstrusi yang keluar melalui *nozzle* tidak maksimal.



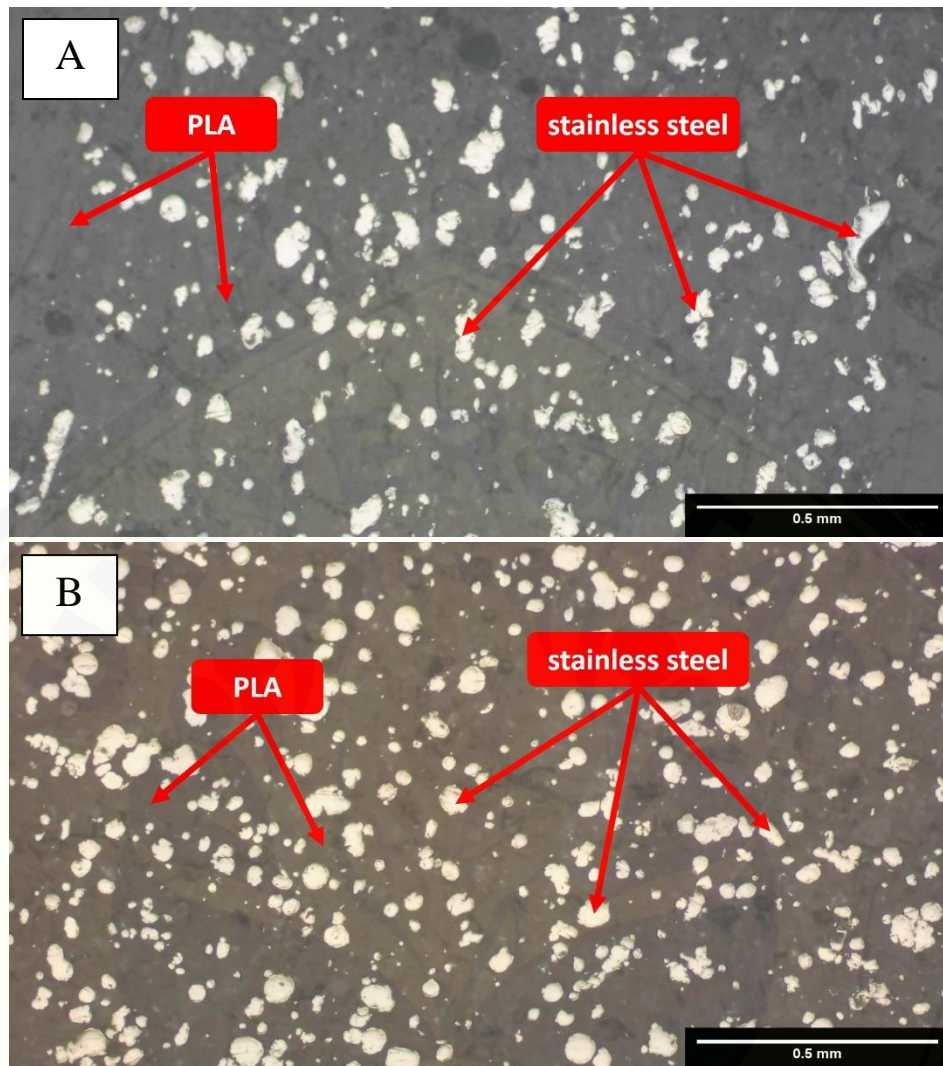
Gambar 4.12 Foto mikro patahan spesimen dengan *extruder temperature* 225°C



Gambar 4.13 Cacat pada proses pengisian di suhu 225°C

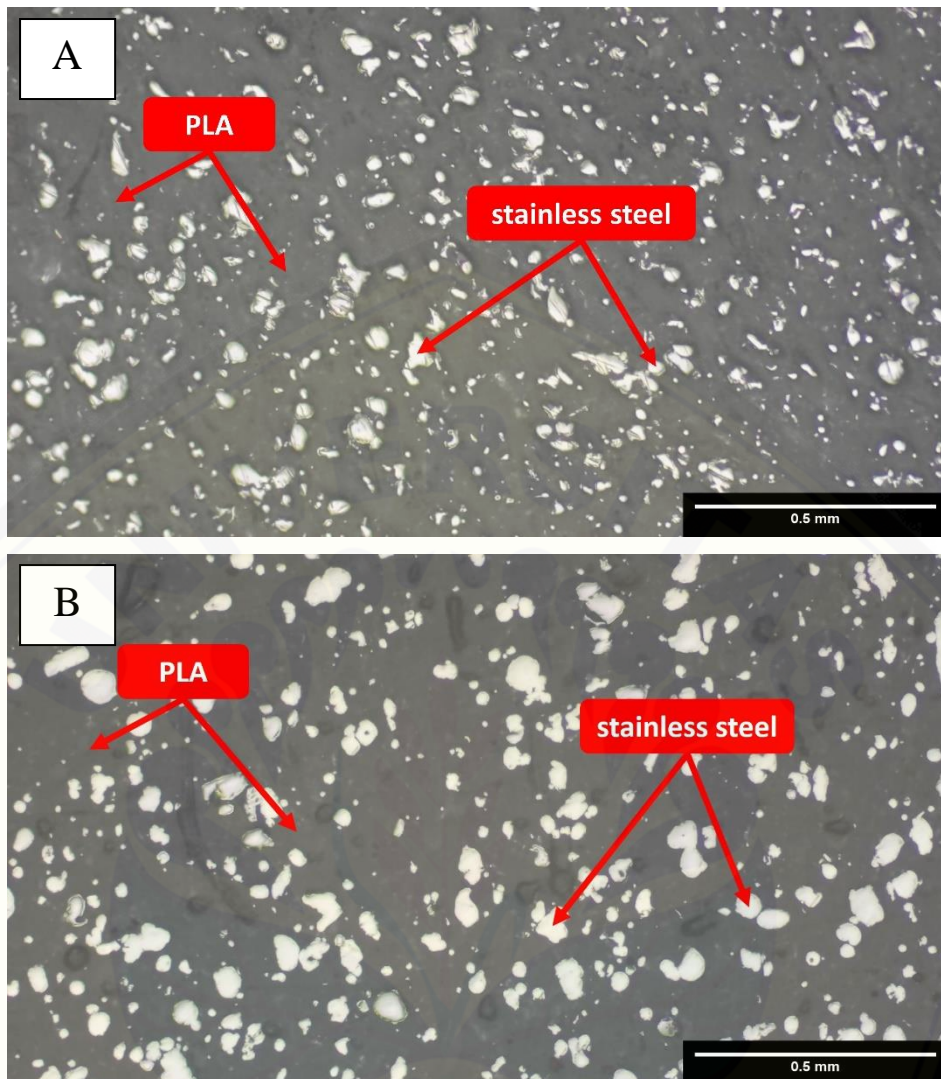
4.2.4 Struktur Mikro

Filamen eSteel merupakan filamen campuran dari bahan PLA dan serbuk *stainless steel*. Komposisi dari filamen ini adalah 55% PLA dan 45% serbuk *stainless steel*. Pada penelitian ini dilakukan pula pengamatan struktur mikro dari filamen eSteel sebelum dan sesudah dilakukan proses ekstrusi. Pengamatan struktur mikro dilakukan menggunakan mikroskop. Berikut adalah foto filamen dengan perbesaran 100 kali sebelum dilakukan proses ekstrusi yang ditunjukkan pada Gambar 4.14.



Gambar 4.14 Struktur mikro filamen eSteel sebelum ekstrusi dengan posisi filamen (A) horizontal dan (B) vertikal

Pada penelitian ini, filamen eSteel diekstrusi dengan *extruder temperature* 220°C dan 225°C. Ketika filamen diekstrusi dengan *extruder temperature* 220°C dan 225°C, tidak terjadi perubahan yang signifikan pada struktur mikro filamen eSteel, bahkan tidak ada. Berikut adalah foto filamen dengan perbesaran 100 kali setelah dilakukan proses ekstrusi yang ditunjukkan pada Gambar 4.15.



Gambar 4.15 Struktur mikro filamen eSteel sebelum ekstrusi dengan posisi filamen (A) 220°C dan (B) 225°C

Dapat dilihat pada Gambar 4.14 terlihat bahwa serbuk *stainless steel* tetap berbentuk serbuk dan tidak menyatu satu dengan lainnya, yang berarti proses ekstrusi tidak berpengaruh terhadap serbuk *stainless steel*. Hal ini karena suhu ekstrusi yang digunakan jauh dari suhu leleh dari *stainless steel* yaitu 1400°C-1530°C sehingga pada suhu 220°C dan 225°C *stainless steel* hanya seperti “dihangatkan”. Struktur mikro filamen tetap seperti sebelum dilakukan ekstrusi, yaitu serbuk *stainless steel* hanya menempel pada PLA.

BAB 5. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang didapatkan dari penelitian analisis sifat lentur produk *metal 3D printing* dengan filamen *PLA-stainless steel* dengan variasi faktor *extruder temperature*, *layer height*, dan *raster angle* adalah sebagai berikut.

1. Faktor yang paling berkontribusi terhadap sifat lentur produk *metal 3D printing* adalah *raster angle* dengan kontribusi sebesar 43,22%. Untuk kontribusi faktor lainnya yaitu *layer height* dan *extruder temperature* adalah sebesar 24,08% dan 12,6%. Adapun kontribusi *error* yang terjadi adalah sebesar 20,10%.
2. *Extruder temperature* yang optimal untuk menghasilkan sifat lentur produk *metal 3D printing* yang baik adalah 220°C. Hal ini karena pada suhu 220°C filamen terekstrusi dengan baik, sedangkan pada suhu 225°C proses ekstrusi tidak maksimal dikarenakan suhu yang terlalu tinggi sehingga menyebabkan ekstrusi filamen yang terlalu cair yang menyebabkan terjadinya kecacatan pada pengisian dan menyebabkan terbentuknya banyak pori-pori atau *air gap* pada produk.
3. *Layer height* yang optimal untuk menghasilkan sifat lentur produk *metal 3D printing* yang baik adalah 0,4 mm. Hal ini karena proses ekstrusi menggunakan *layer height* 0,4 mm berjalan sempurna sehingga ikatan antar *layer* yang terbentuk sangat kuat. Sedangkan pada proses ekstrusi dengan menggunakan *layer height* 0,3 mm terkadang mengalami cacat pada proses pengisian. Hal ini menyebabkan ikatan antar *layer* yang terbentuk menjadi lemah yang berdampak pada buruknya sifat lentur dari produk.
4. *Raster angle* yang optimal untuk menghasilkan sifat lentur produk *metal 3D printing* yang baik adalah 0°/90°. Hal ini karena pada *raster angle* 0°/90° ikatan antar *layer* yang terbentuk sangat baik. Dengan sudut pengisian 0°, maka ikatan antar *layer* yang tercipta adalah sepanjang dari total panjang spesimen. Dengan begitu, sudut 0°/90° menghasilkan kekuatan lentur yang paling optimal.

5. Kombinasi faktor atau parameter yang dapat menghasilkan sifat lentur yang baik berdasarkan perhitungan menggunakan Metode Taguchi adalah dengan *extruder temperature* 220°C, *layer height* 0,4 mm, dan *raster angle* 0°/90°.
6. Dari spesimen uji *bending* kombinasi 1 sampai dengan 4, kekuatan lentur tertinggi dimiliki oleh spesimen uji *bending* kombinasi 4 yaitu 38,45 MPa. Sedangkan kekuatan lentur eksperimen konfirmasi adalah 39,54 MPa. Dengan begitu, kekuatan lentur spesimen eksperimen konfirmasi lebih baik 2.83% dari spesimen kombinasi 4.

5.2 Saran

Saran yang dapat penulis berikan setelah melakukan penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Untuk penelitian selanjutnya bisa membahas faktor lain, seperti *infill pattern*, *infill density*, *printing speed*, *bed temperature*, jumlah *shell* untuk mendapatkan sifat lentur yang baik.
2. Penelitian selanjutnya juga bisa membahas *extruder temperature* di bawah 220°C untuk meneliti pengaruhnya terhadap sifat lentur.
3. Penelitian selanjutnya juga bisa meneliti pengaruh pemberian *heat treatment sintering* pada produk terhadap sifat lentur produk.
4. Menggunakan *nozzle* berbahan baja karena penelitian ini menggunakan filamen yang terdapat campuran bajanya.

DAFTAR PUSTAKA

- ASTM International. 2002. Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials D790. Annual Book of ASTM Standards 1–12.
- Akhoundi, B., and A. H. Behraves. 2019. Effect of filling pattern on the tensile and flexural mechanical properties of FDM 3D printed products. *Experimental Mechanics*. 59(6):883–897.
- Berthelot, J. M. 1999. *Composite Materials, Mechanical Behaviour and Structural Analysis*. New York: Spring-Verlag.
- Bhavar, Valmik, Prakash Kattire, Vinaykumar Patil, Shreyans Khot, Kiran Gujar, and Rajkumar Singh. 2017. A review on powder bed fusion technology of metal additive manufacturing. *Additive Manufacturing Handbook: Product Development for the Defense Industry*. 251–261.
- Castro-Cedeno, Mario H. 2014. *Introduction to Solidworks*.
- Duda, Thomas, and L. Venkat Raghavan. 2016. 3D metal printing technology. *IFAC-PapersOnLine*. 49(29):103–110.
- Farrar, J. C. M. 2004. *The Alloy Tree*. England: Woodhead Publishing Limited.
- Gibson, Ian, David Rosen, and Brent Stucker. 2015. *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing, Second Edition*.
- Gupta, Manoj. 2017. 3D printing of metals. *Metals*. 7(10):3–4.
- Halka, Monica, and Brian Nordstrom. 2012. *Periodic Table Of The Element: Transition Metals*. Facts on File.
- Hermawan, Hendra, Dadan Ramdan, and Joy R. P. Djuansjah. 2011. Metals for biomedical applications. *Biomedical Engineering-from Theory to Applications*. 411–420.
- Ismianti, Herianto. 2018. Framework prediksi penggunaan 3D printing di indonesia pada tahun 2030. *Seminar Nasional IENACO*. 546–53.
- Kesavarma, S., E. H. Lee, M. Samykano, K. Kadirgama, M. M. Rahman, and A. G. N. Sofiah. 2020. Flexural properties of 3D printed copper-filler polylactic acid (Cu-PLA). *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 788(1):1-10

- Krishnaiah, K., and P. Shahabudeen. 2012. *Applied Design Of Experiments And Taguchi Methods*. New Delhi: PHI Learning Private Limited.
- Llewellyn, D. T., and R. C. Hudd. 1998. *Steels*. third edit. Butterworth-Heinemann.
- Lu, Y., and S. C. Chen. 2004. Micro and nano-fabrication of biodegradable polymers for drug delivery. *Advanced Drug Delivery Reviews*. 56(11):1621–1633.
- Lužanin, Ognjan, Dejan Movrin, and Miroslav Plan. 2014. Effect of layer thickness, deposition angle, and infill on maximum flexural force in FDM-built specimens. *Journal for Technology of Plasticity*. 39(1):49–58.
- Milewski, John O. 2017. *Additive Manufacturing of Metals*. Springer International Publishing.
- Nugroho, A., R. Ardiansyah, L. Rusita, and I. L. Larasati. 2018. Effect of layer thickness on flexural properties of PLA (polylactid acid) by 3D printing. *Journal of Physics: Conference Series*. 1130(1):1–10.
- Outokumpu. 2013. *Handbook of Stainless Steel*. Finland: Outokumpu Ojy.
- Rajpurohit, Shilpesh R., and Harshit K. Dave. 2018. Flexural strength of fused filament fabricated (FFF) PLA parts on an open-source 3D printer. *Advances in Manufacturing*. 6(4):430–441.
- Rajpurohit, Shilpesh R., and Harshit K. Dave. 2018. Tensile properties of 3D printed PLA under unidirectional and bidirectional raster angle: a comparative study. *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Materials and Metallurgical Engineering*. 12(1):6–11.
- Riza, Eduar Iqbal, Cahyo Budiantoro, and Aris Widyo Nugroho. 2010. Peningkatan kekuatan lentur produk 3D printing material PETG dengan optimasi parameter proses. *Media Mesin: Majalah Teknik Mesin*. 21(2):66–75.
- Sakthivel, Navin, Jon Bramsch, Phi Voung, Isaac Swink, Saadyah Averick, and Hitesh D. Vora. 2020. Investigation of 3D-printed PLA–Stainless-steel polymeric composite through fused deposition modelling-based additive manufacturing process for biomedical applications. *Medical Devices & Sensors*. 3(6):1–21.

- Saxena, Abhishek, and Medhavi Kamran. 2016. A comprehensive study on 3D printing technology. *MIT International Journal of Mechanical Engineering*. 6(2):63–69.
- Soejanto, I. 2009. *Desain Eksperimental Dengan Metode Taguchi*. Yogyakarta: Ilmu Graha.
- Sulaeman, Budiawan. 2018. Modulus elastisitas berbagai jenis material. *PENA TEKNIK: Jurnal Ilmiah Ilmu-Ilmu Teknik*. 3(2):127-137.
- Wu, Wenzheng, Peng Geng, Guiwei Li, Di Zhao, Haibo Zhang, and Ji Zhao. 2015. Influence of layer thickness and raster angle on the mechanical properties of 3D-printed peek and a comparative mechanical study between PEEK and ABS. *Materials*. 8(9):5834–5846.
- Xu, Chen, Kangjie Cheng, Yunfeng Liu, Russell Wang, Xianfeng Jiang, Xingtao Dong, and Xu Xu. 2021. Effect of processing parameters on flexural properties of 3D-printed polyetherketoneketone using fused deposition modeling. *Polymer Engineering and Science*. 61(2):465–476.

LAMPIRAN

Lampiran 1: Data sheet filamen eSteel



Safety Data Sheet(SDS)

According to GHS

Product name: PLA eSteel filament Prepared by GB/T 16483 and GB/T 17951
 Revision Date: 2018.3.1 SDS Number: YS3D117002
 Initial date: 2017.2.15 Version: 3.1

Section 1 - Identification of the substance/preparation and of the company/undertaking

Product identifier

Product name: PLA eSteel filament



Relevant identified uses of the substance or mixture and uses advised against

Details of the supplier of the safety data sheet

Manufacture/Supplier : Shenzhen Esun Industrial Co., Ltd.
 Address: Wuhan University Building A403-I, No.6 Yuexing2Road,Nanshan District,
 Shenzhen, China
 Tel: 135 3064 5059
 Emergency number : 135 3064 5059
 E-mail : cdm@brightcn.net
 Fax : 2603 1982

Further information obtainable from:Shenzhen Esun Industrial Co.,Ltd

Section 2 - Hazards Identification

	Min	Max
Flammability	1 	0=Minimum
Toxicity	0	1=Low
Body Contact	0	2=Moderate
Reactivit	1 	3=High
Chronic	0	4=Extreme

GHS classification

Not Applicable

Label elements:

GHS label elements

Not Applicable

SIGNAL WORD:

Not Applicable

Product name: PLA eSteel filament

SDS Number:YS3D117002

Revision Date: 2018.3.1

Section 3 –Composition/Information on Ingredients

Ingredient Name	CAS No.	EC No.	Content (%)
Steel power	12597-68-1	--	45
Poly (DL- lactide)	51063-13-9	--	20
Poly lactide resin	9051-89-2	618-575-7	35

Section 4 - First Aid Measures

INGESTION

- Immediately give a glass of water.
- First aid is not generally required. If in doubt, contact a Poisons Information Centre or a doctor.

EYE

If this product comes in contact with eyes:

- Wash out immediately with water.
- If irritation continues, seek medical attention.
- Removal of contact lenses after an eye injury should only be undertaken by skilled personnel.

SKIN

If skin or hair contact occurs:

- Flush skin and hair with running water (and soap if available).
- Seek medical attention in event of irritation.

Inhalation

- If fumes, aerosols or combustion products are inhaled remove from contaminated area.
- Other measures are usually unnecessary.

Indication of any immediate medical attention and special treatment needed

- Treat symptomatically.

Section 5 - Firefighting Measures

EXTINGUISHING MEDIA

- Foam.
- Dry chemical powder.
- BCF (where regulations permit).
- Carbon dioxide.

FIRE FIGHTING

- Alert Fire Brigade and tell them location and nature of hazard.

Product name: PLA eSteel filament

SDS Number:YS3D117002

Revision Date: 2018.3.1

- Wear breathing apparatus plus protective gloves.
- Prevent, by any means available, spillage from entering drains or water courses.
- Use water delivered as a fine spray to control fire and cool adjacent area.

FIRE/EXPLOSION HAZARD

- Combustible solid which burns but propagates flame with difficulty.
- Organic powders when finely divided over a range of concentrations regardless of particulate size or shape and suspended in air or some other oxidizing medium may form explosive dust-air mixtures and result in a fire or dust explosion (including secondary explosions).

FIRE INCOMPATIBILITY

- Avoid contamination with oxidising agents i.e. nitrates, oxidising acids, chlorine bleaches, pool chlorine etc.as ignition may result

Section 6 –Accidental Release Measures

MINOR SPILLS

- Generally not applicable

MAJOR SPILLS

- Generally not applicable

Personal Protective Equipment advice is contained in Section 8 of the SDS.

Section 7 - Handling and Storage

PROCEDURE FOR HANDLING

- Limit all unnecessary personal contact.
- Wear protective clothing when risk of exposure occurs.
- Use in a well-ventilated area.
- Avoid contact with incompatible materials.
- Store in original containers.
- Keep containers securely sealed.
- Store in a cool, dry, well-ventilated area.

SUITABLE CONTAINER

- Polyethylene or polypropylene container.
- Check all containers are clearly labelled and free from leaks.
- Packing as recommended by manufacturer.

STORAGE INCOMPATIBILITY

Avoid contamination of water, foodstuffs, feed or seed.

Product name: PLA eSteel filament
Revision Date: 2018.3.1

SDS Number:YS3D117002

- Avoid reaction with oxidising agents

Section 8 - Exposure Controls, Personal Protection

EXPOSURE CONTROLS

Appropriate engineering controls

Engineering controls are used to remove a hazard or place a barrier between the worker and the hazard. Well-designed engineering controls can be highly effective in protecting workers and will typically be independent of worker interactions to provide this high level of protection.

The basic types of engineering controls are:

Process controls which involve changing the way a job activity or process is done to reduce the risk.

Enclosure and/or isolation of emission source which keeps a selected hazard "physically" away from the worker and ventilation that strategically "adds" and "removes" air in the work environment.

Personal protection



Eye and face protection

- Safety glasses with side shields.
- Chemical goggles.
- Contact lenses may pose a special hazard; soft contact lenses may absorb and concentrate irritants. A written policy document, describing the wearing of lenses or restrictions on use, should be created for each workplace or task.

Skin protection

See Hand protection below

Hands/feet protection

The selection of suitable gloves does not only depend on the material, but also on further marks of quality which vary from manufacturer to manufacturer. Where the chemical is a preparation of several substances, the resistance of the glove material can not be calculated in advance and has therefore to be checked prior to the application.

The exact break through time for substances has to be obtained from the manufacturer of the protective gloves and has to be observed when making a final choice.

Suitability and durability of glove type is dependent on usage.

Body protection

See Other protection below

Product name: PLA eSteel filament
Revision Date: 2018.3.1

SDS Number:YS3D117002

Other protection

- Overalls.
- P.V.C. apron.
- Barrier cream.

Section 9 - Physical and Chemical Properties

Information on basic physical and chemical properties

Odour	Odorlessness
Form	Solid
Melting Range (°C)	No data
Boiling Range (°C)	No data
Flash Point (°C)	No data
Decomposition Temp (°C)	No data
Autoignition Temp (°C)	No data
Upper Explosive Limit (%)	No data
Lower Explosive Limit (%)	No data
Volatile Component (%vol)	No data
Solubility in water (g/L)	Insoluble in water
p H (1% solution)	No data
p H (as supplied)	No data
Print Temp (°C)	200-220
Bed Temp(°C)	25-70
Density(g/cm³)	2.46
Heat Distortion Temp (°C,0.45MPa)	52
Melt Flow Index (g/10min)	1590°C/2.16kg)
Tensile Strength (MPa)	45
Elongation at Break (%)	5
Flexural Strength (MPa)	63
Flexural Modulus (MPa)	4452
IZOD Impact Strength (kJ/m²)	5

Section 10 - Stability and Reactivity

Reactivity

See section 7

Product name: PLA eSteel filament
Revision Date: 2018.3.1

SDS Number: YS3D117002

Chemical stability

- Unstable in the presence of incompatible materials.
- Product is considered stable.
- Hazardous polymerisation will not occur.

Section 11 - Toxicological Information

Information on toxicological affects

Acute Toxicity

LD/LC50 values relevant for classification

No data.

Primary irritant effect

On the skin

No data.

On the eyes

No data.

Inhaled

No data.

Sensitization: No data.

Section 12 - Ecological Information

Ingredient	Persistence: Water/Soil	Persistence: Air	Bioaccumulation	Mobility
Steel power	LOW	LOW	LOW	LOW
Poly (DL- lactide)	No Data available	No Data available	No Data available	No Data available
Poly lactide resin	No Data available	No Data available	No Data available	No Data available

Section 13 - Disposal Considerations

Legislation addressing waste disposal requirements may differ by country, state and/ or territory. Each user must refer to laws operating in their area. In some areas, certain wastes must be tracked.

A Hierarchy of Controls seems to be common - the user should investigate:

- Reduction
- Reuse
- Recycling
- Disposal (if all else fails)

This material may be recycled if unused, or if it has not been contaminated so as to make it unsuitable for

Product name: PLA eSteel filament
Revision Date: 2018.3.1

SDS Number:YS3D117002

its intended use.

Section 14 - Transport Information

Labels Required

Marine Pollutant: NO

NOT REGULATED FOR TRANSPORT OF DANGEROUS GOODS: ADR, IATA, IMDG,ADN

Section 15 - Regulatory Information

REGULATIONS

The product needs to follow local regulations.

Section 16 - Other Information

This information is based on our present knowledge. However, this shall not constitute a guarantee for any specific product features and shall not establish a legally valid contractual relationship.

***End ***

Gambar 1. Data spesifikasi filamen eSteel

Lampiran 2: Analisis Metode Taguchi menggunakan Minitab

	C1	C2	C3-T	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11
	Extruder Temperature	Layer Height	Raster Angle	Replikasi 1	Replikasi 2	Replikasi 3	Replikasi 4	Replikasi 5	SNRA1	MEAN1	
1	220	0.3	0/90	39.42	38.70	36.24	37.94	37.94	31.5962	38.0472	
2	220	0.4	45/45	37.19	37.88	38.07	37.33	37.20	31.4879	37.5368	
3	225	0.3	45/45	34.27	34.71	35.18	34.81	35.77	30.8657	34.9478	
4	225	0.4	0/90	39.04	37.65	38.89	38.95	37.79	31.6975	38.4630	
5											

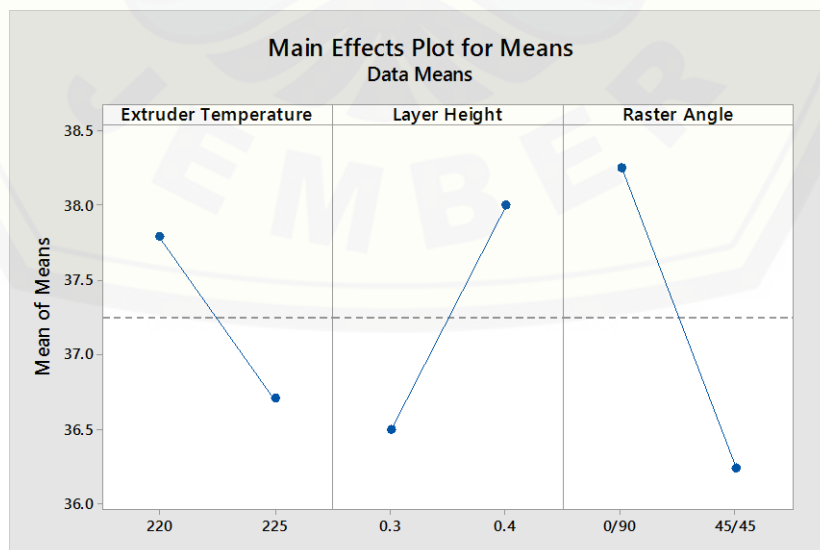
Response Table for Signal to Noise Ratios

Larger is better

Level	Extruder Temperature	Layer Height	Raster Angle
1	31.54	31.23	31.65
2	31.28	31.59	31.18
Delta	0.26	0.36	0.47
Rank	3	2	1

Response Table for Means

Level	Extruder Temperature	Layer Height	Raster Angle
1	37.79	36.50	38.26
2	36.71	38.00	36.24
Delta	1.09	1.50	2.01
Rank	3	2	1

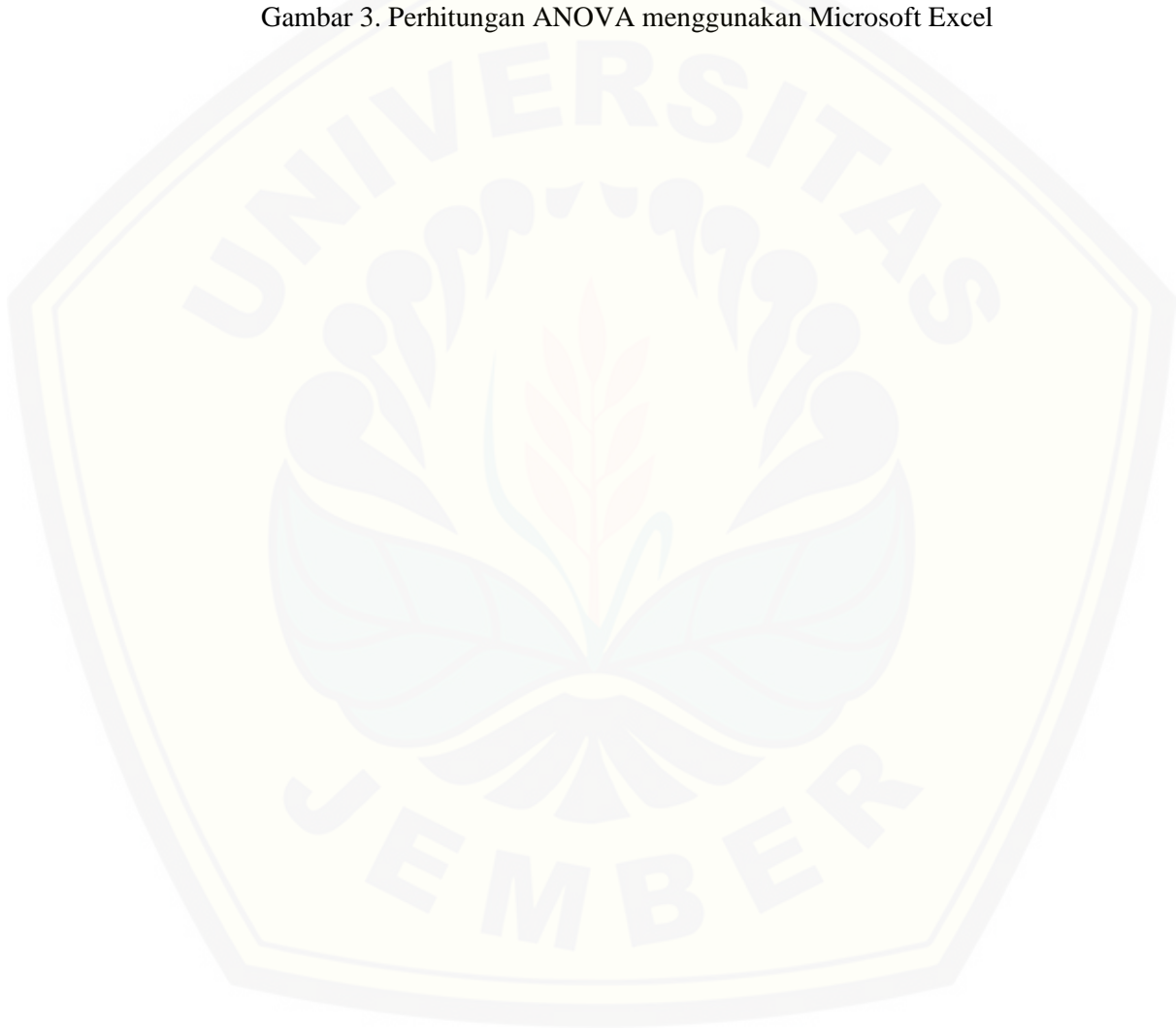


Gambar 2. Perhitungan Metode Taguchi menggunakan Minitab

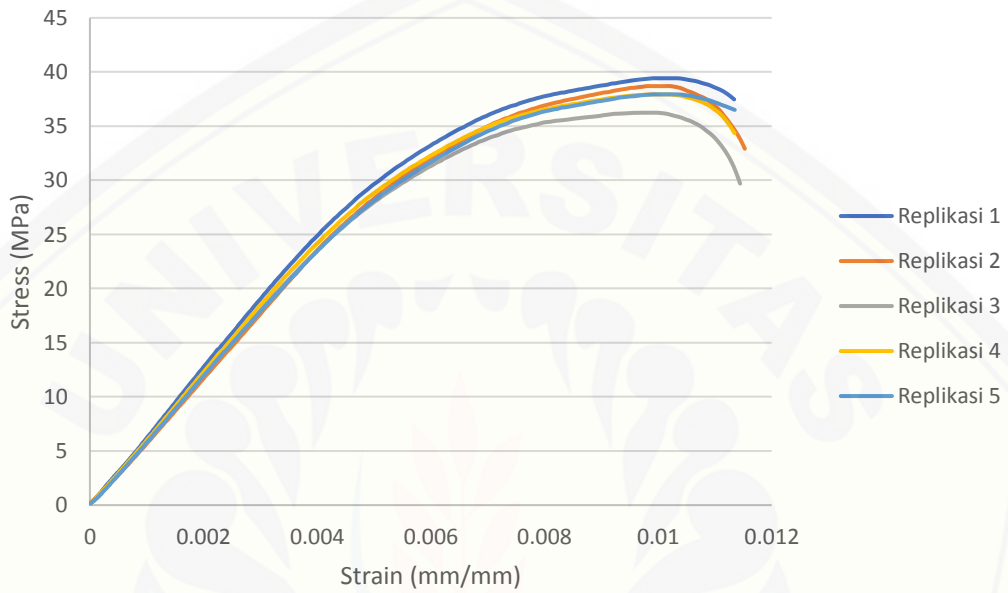
Lampiran 3: Analisis ANOVA menggunakan Microsoft Excel

Faktor Kendali	Degree of Freedom	Seq SS	Adj MS	F	P	Kontribusi
Extruder Temperature	1	5.9034978	5.9034978	10.02973166	Significant	12.60%
Layer Height	1	11.2860288	11.2860288	19.17436819	Significant	24.08%
Raster Angle	1	20.2568192	20.2568192	34.41526834	Significant	43.22%
Error	16	9.4175964	0.588599775			20.10%
Total	19	46.8639422				100%

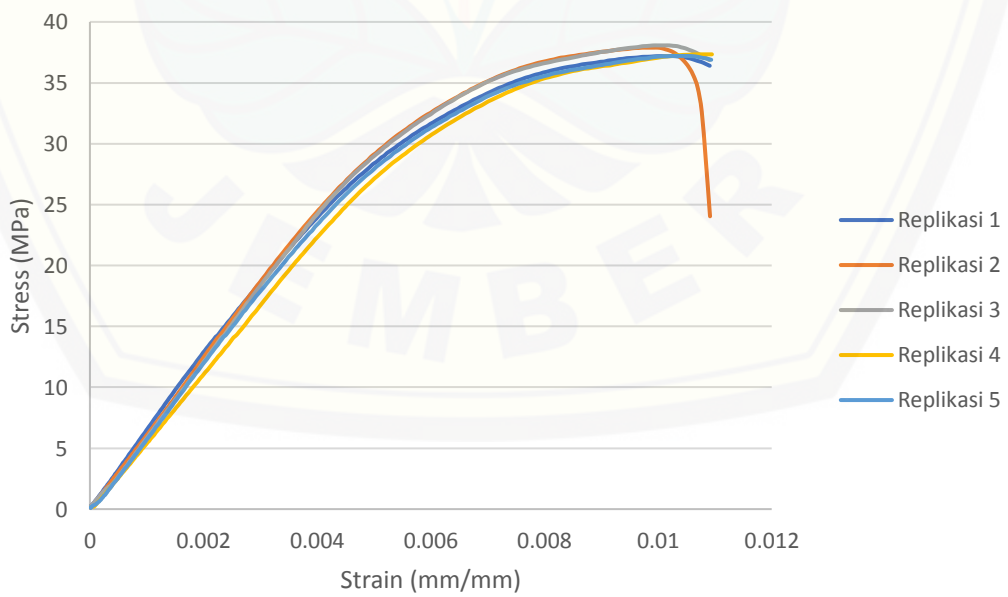
Gambar 3. Perhitungan ANOVA menggunakan Microsoft Excel



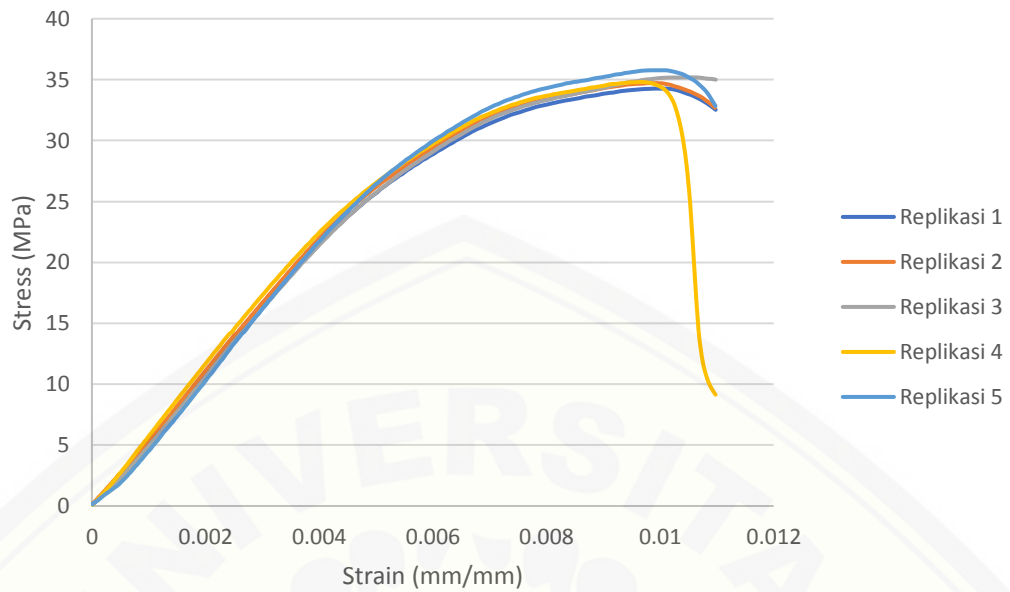
Lampiran 4: Hasil pengujian spesimen uji *bending* kombinasi 1, kombinasi 2, kombinasi 3, dan kombinasi 4



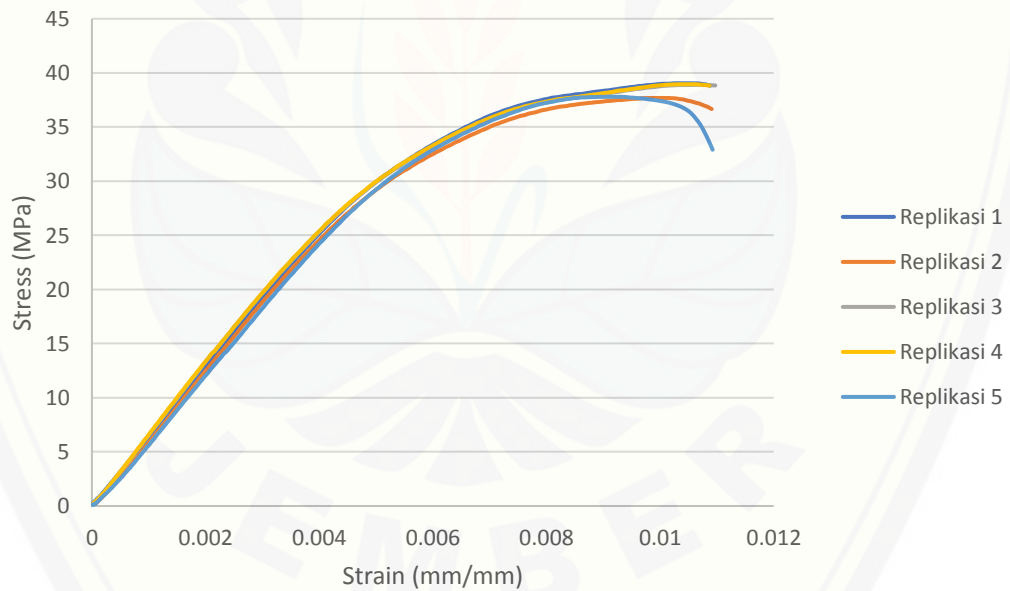
Gambar 4. Grafik tegangan-regangan kombinasi 1



Gambar 5. Grafik tegangan-regangan kombinasi 2

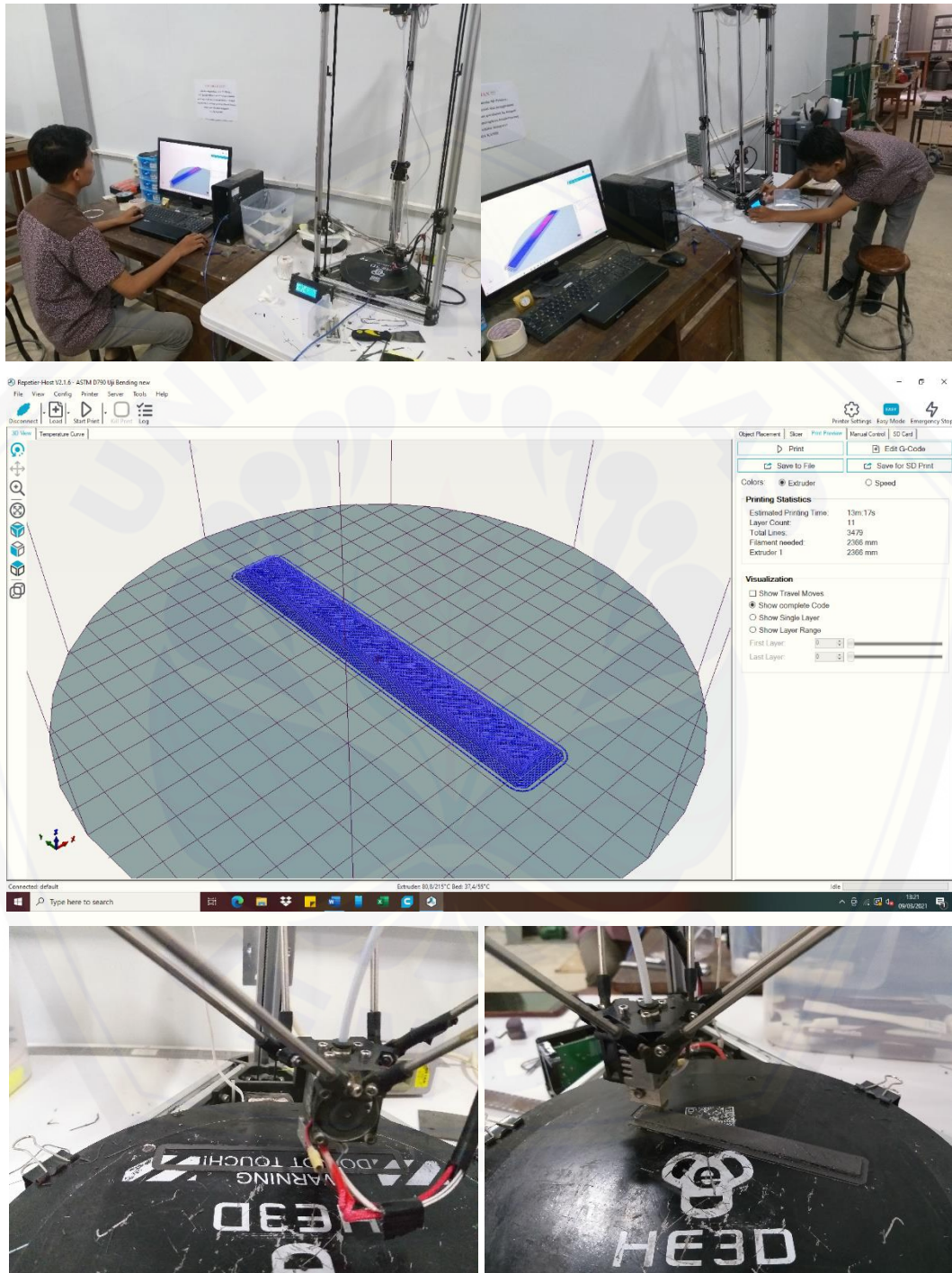


Gambar 6. Grafik tegangan-regangan kombinasi 3



Gambar 7. Grafik tegangan-regangan kombinasi 4

Lampiran 5: Dokumentasi proses pencetakan



Gambar 8. Proses pencetakan spesimen uji *bending*



Gambar 9. Validasi suhu ekstruder menggunakan termokopel



Gambar 10. Validasi suhu *bed* menggunakan termokopel



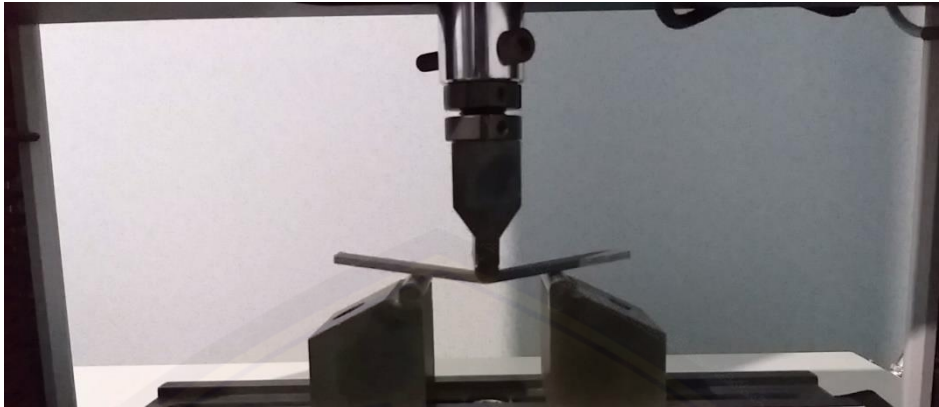
Gambar 11. Hasil 3D *printing* 20 spesimen uji *bending*

Lampiran 6: Dokumentasi pengujian *bending*

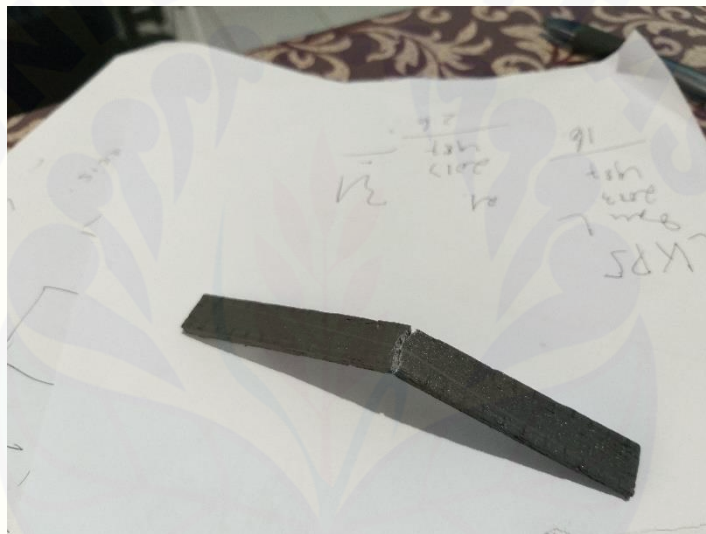
Gambar 12. *Packing* spesimen uji sebelum dibawa ke Lab. Instrumentasi FMIPA



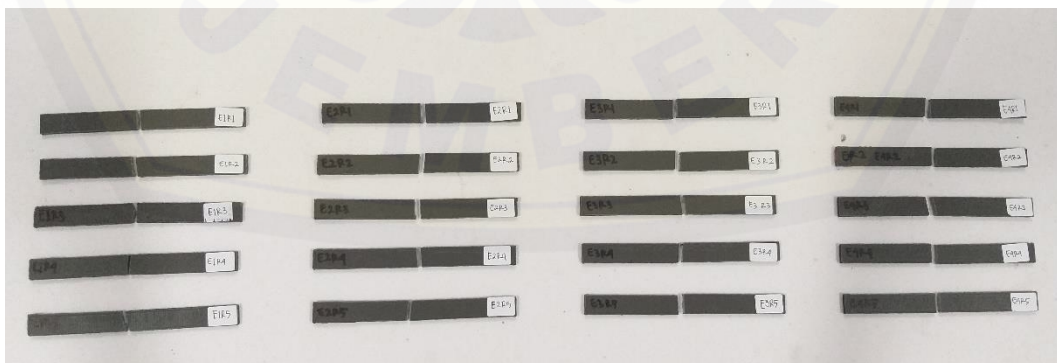
Gambar 13. Kondisi spesimen sebelum pengujian *bending*



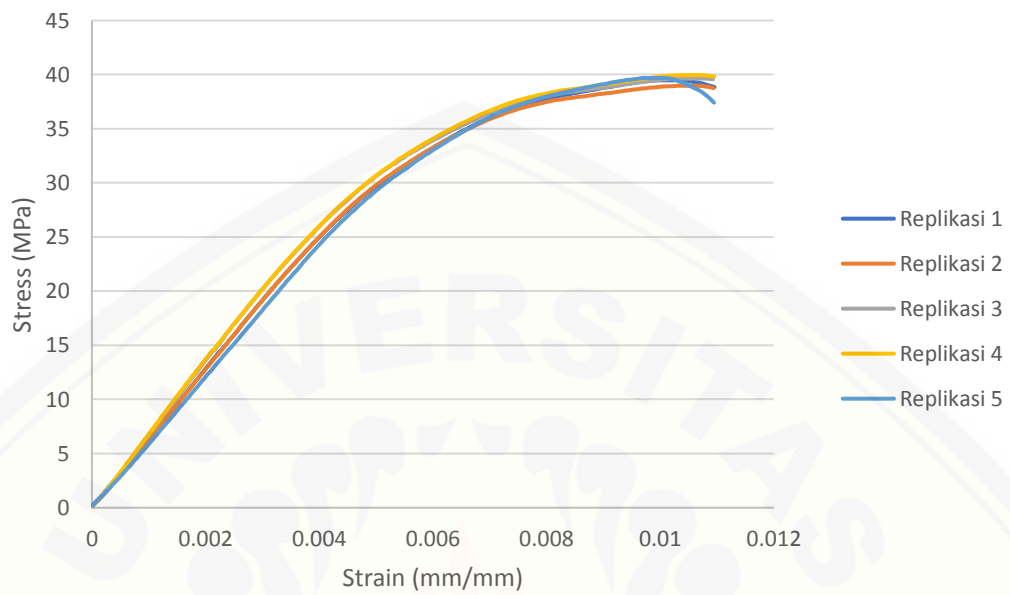
Gambar 14. Kondisi spesimen saat proses pengujian *bending*



Gambar 15. Kondisi benda setelah pengujian *bending*

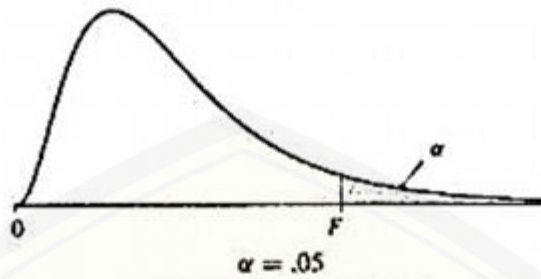


Gambar 16. Hasil pengujian *bending*

Lampiran 7: Grafik hasil pengujian eksperimen konfirmasi

Gambar 17. Grafik tegangan-regangan eksperimen konfirmasi

Lampiran 8: Tabel distribusi F ($\alpha = 0,05$)



df_2	df_1									
	1	2	3	4	5	6	8	12	24	∞
1	161.4	199.5	215.7	224.6	230.2	234.0	238.9	243.9	249.0	254.3
2	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.37	19.41	19.45	19.50
3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.84	8.74	8.64	8.53
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.04	5.91	5.77	5.63
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.82	4.68	4.53	4.36
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.15	4.00	3.84	3.67
7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.73	3.57	3.41	3.23
8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.44	3.28	3.12	2.93
9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.23	3.07	2.90	2.71
10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.07	2.91	2.74	2.54
11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	2.95	2.79	2.61	2.40
12	4.75	3.88	3.49	3.26	3.11	3.00	2.85	2.69	2.50	2.30
13	4.67	3.80	3.41	3.18	3.02	2.92	2.77	2.60	2.42	2.21
14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.70	2.53	2.35	2.13
15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.64	2.48	2.29	2.07
16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.59	2.42	2.24	2.01
17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.55	2.38	2.19	1.96
18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.51	2.34	2.15	1.92
19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.48	2.31	2.11	1.88
20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.45	2.28	2.08	1.84
21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.42	2.25	2.05	1.81
22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.40	2.23	2.03	1.78
23	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.38	2.20	2.00	1.76
24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.36	2.18	1.98	1.73
25	4.24	3.38	2.99	2.76	2.60	2.49	2.34	2.16	1.96	1.71
26	4.22	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.32	2.15	1.95	1.69
27	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.46	2.30	2.13	1.93	1.67
28	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.44	2.29	2.12	1.91	1.65
29	4.18	3.33	2.93	2.70	2.54	2.43	2.28	2.10	1.90	1.64
30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.27	2.09	1.89	1.62
40	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.18	2.00	1.79	1.51
60	4.00	3.15	2.76	2.52	2.37	2.25	2.10	1.92	1.70	1.39
120	3.92	3.07	2.68	2.45	2.29	2.17	2.02	1.83	1.61	1.25
∞	3.84	2.99	2.60	2.37	2.21	2.09	1.94	1.75	1.52	1.09

Gambar 18. Tabel distribusi F ($\alpha = 0,05$)