

Pengaruh Variasi Bed Temperature Proses 3D Printing Terhadap Visual Produk Berbahan Dasar Filament PLA

Hilmi Raharjo¹, Asroful Abidin^{2*}, dan Nely Ana Mufarida³

1 Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Jember; Email : rhilmi03@gmail.com

2 Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Jember; Email : asrofulabidin@unmuhjember.ac.id

3 Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Jember; Email : nelyana@unmuhjember.ac.id

* Penulis Korespondensi : Asroful Abidin ; Email : asrofulabidin@unmuhjember.ac.id

Abstract: *3d printing technology with Fused Deposition Modeling (FDM) method is increasingly developing in various industrial sectors due to design flexibility and material efficiency. This study aims to analyze the effect of bed temperature variations on product visual quality, bending strength, and porosity defects in 3D printed products made from Polylactic Acid (PLA) filament. Bending test specimens were fabricated according to ASTM D790 standard with bed temperature variations of 30°C, 40°C, 50°C, and 60°C, while other parameters were kept constant. Bending testing was conducted using Universal Testing Machine (UTM) HT-2402, while porosity observation was performed using a digital microscope. The results showed that the highest bending load value was obtained at 50°C bed temperature with an average of 45.20 N, while the lowest was at 40°C with 42.37N. One Way ANOVA analysis results showed F_{value} of 1.29 and P-value of 0.342 (> 0.05), indicating that bed temperature variations did not have a significant effect on PLA filament bending strength. Microscopic observation revealed porosity defects in all specimens with varying numbers of 1-4 porosities at each temperature variation. This study concludes that although bed temperature variations of 30°C-60°C do not significantly affect bending strength, the temperature of 50°C provides the best mechanical performance and all variations produce products with varying levels of porosity.*

Keywords: *3d printing; bed temperature; PLA; bending test; Porositi; FDM.*

Abstrak: Teknologi *3d printing* dengan metode *Fused Deposition Modeling* (FDM) semakin berkembang dalam berbagai sektor industri karena fleksibilitas desain dan efisiensi materialnya. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi *bed temperature* terhadap visual produk, kekuatan bending, dan cacat porositas pada hasil cetakan *3d printing* berbahan filament *Polylactic Acid* (PLA). Spesimen uji bending dibuat mengacu pada standar ASTM D790 dengan variasi *bed temperature* 30°C, 40°C, 50°C, dan 60°C, serta parameter lainnya dibuat konstan. Pengujian bending dilakukan menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM) HT-2402, sedangkan pengamatan porositas dilakukan menggunakan digital microscope. Hasil penelitian menunjukkan nilai load bending tertinggi diperoleh pada *bed temperature* 50°C dengan rata-rata 45,20 N, sedangkan nilai terendah pada *bed temperature* 40°C sebesar 42,37 N. Hasil analisis *One Way ANOVA* menunjukkan nilai F_{hitung} sebesar 1,29 dan P-value 0,342 (> 0,05), yang mengindikasikan bahwa variasi *bed temperature* tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap kekuatan bending filament PLA. Pengamatan mikroskopis menunjukkan adanya cacat porositas pada seluruh spesimen dengan jumlah bervariasi antara 1-4 porositas pada setiap variasi suhu. Penelitian ini menyimpulkan bahwa meskipun variasi *bed temperature* 30°C-60°C tidak berpengaruh signifikan terhadap kekuatan bending, suhu 50°C memberikan performa mekanik terbaik dan seluruh variasi menghasilkan produk dengan tingkat porositas yang bervariasi.

Kata kunci: *3d printing; Bed temperature; PLA; Uji Bending; Porositas; FDM.*

1. Pendahuluan

Teknologi semakin lama semakin berkembang pesat pada era saat ini, khususnya pada bidang Teknik Mesin yang terus berkembang dari masa ke masa, untuk itu perlu pembaharuan maupun modifikasi dari benda ataupun rancangan. Dalam pekerjaan permesinan khususnya perlu adanya sebuah komponen yang menunjang kerja dari suatu mesin [1]. Dalam suatu komponen mesin terdiri dari banyak elemen permesinan, seperti halnya poros, roda gigi, engkol, bearing, dan juga elemen lainnya. Gear merupakan suatu komponen yang penting bagi keberlangsungan kerja dari suatu mesin agar dapat bergerak secara optimal dan

Diterima: May 18, 2026

Direvisi: May 26, 2026

Diterima: May 29, 2026

Diterbitkan: July 14, 2026



Hak cipta: © 2026 oleh penulis. Diserahkan untuk kemungkinan publikasi akses terbuka berdasarkan syarat dan ketentuan lisensi Creative Commons Attribution (CC BY SA) (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>)

dapat mentransmisikan daya dengan seimbang [2]. Dalam proses pembuatan gear biasanya menggunakan baja karbon yang biasa dipakai untuk pembuatan alat komponen otomotif, konstruksi maupun alat yang lain. Di dalam aplikasinya baja akan terkena pengaruh dari gaya seperti gesekan, kekerasan, maupun tekanan, sehingga menimbulkan sebuah perubahan bentuk [3]. Untuk menentukan gear yang tepat yang akan digunakan untuk proses transmisi, maka diperlukan desain dari suatu gear yang optimal agar dapat melakukan transmisi daya yang seimbang.

Desain dari gear memiliki banyak gigi yang saling bersinggungan dengan dua ataupun lebih roda gigi lain yang nantinya bekerja sama dan disambungkan dengan rantai yang nantinya akan mentransmisikan daya dari motor gerak menjadi energi [4]. Dalam pembuatan roda gigi diperlukan bahan yang kokoh dan juga efisiensi biaya. Pada proses manufaktur yang terus meningkat pada efisiensi dan produktivitas dalam produksi produk baru, saat ini proses pengembangan pesat proses manufaktur ialah *3d printing*. Penggunaan teknologi *3d printing* digunakan di berbagai sektor, seperti kesehatan, industri skala kecil, prototype, maupun sparepart komponen mesin [5]. Prinsip kerja dari *3d printing* adalah membentuk suatu produk dengan meletakkan lapisan-lapisan dari material pada sumbu vertikal. Perkembangan teknologi additive manufacturing atau *3d printing* telah memberikan banyak keunggulan dibandingkan metode manufaktur konvensional, terutama dalam hal fleksibilitas desain, efisiensi material, serta kemampuan untuk memproduksi komponen dengan geometri kompleks. Teknologi ini memungkinkan pembuatan komponen secara langsung dari model digital tanpa memerlukan proses pemesinan yang kompleks. Metode yang paling banyak digunakan dalam proses *3d printing* adalah Fused Deposition Modeling (FDM), yaitu teknik pencetakan dengan cara melelehkan material filamen dan mengekstrusinya secara berlapis-lapis hingga membentuk objek tiga dimensi. Dalam proses FDM, kualitas serta sifat mekanik produk sangat dipengaruhi oleh berbagai parameter proses, seperti suhu ekstrusi, kecepatan cetak, layer height, dan infill density. Parameter-parameter ini berperan dalam menentukan kualitas ikatan antar lapisan (*Interlayer Bonding*), yang sangat memengaruhi kekuatan mekanik produk. Proses pencetakan berlangsung secara bertahap lapis demi lapis hingga produk terbentuk sepenuhnya dan selesai dicetak [6]. Dalam pembuatan dengan menggunakan proses *3d printing* ditentukan oleh parameter mesin. Parameter tersebut seperti halnya *bed temperature*, print speed, infill density, pattern, nozzle temperature, dan layer height [7]. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa parameter proses pada *3d printing* memiliki pengaruh signifikan terhadap sifat mekanik material yang dicetak. Parameter seperti suhu cetak, kecepatan pencetakan, dan kepadatan infill dapat mempengaruhi kekuatan tarik, kekuatan tekan, maupun kekuatan lentur dari material hasil cetakan. Peningkatan parameter tertentu dapat meningkatkan kekuatan mekanik karena menghasilkan ikatan antar lapisan yang lebih baik, sedangkan parameter yang tidak optimal dapat menyebabkan terbentuknya porositas dan cacat pada struktur material. Oleh karena itu, optimasi parameter proses menjadi faktor penting dalam menghasilkan komponen dengan kualitas mekanik yang baik [8]. Pada penelitian ini menggunakan filamen, dimana filamen adalah bahan baku untuk proses pencetakan di mesin *3d printing* yang telah didesain dengan software komputer [9].

PLA (*Polylactic Acid*) adalah filamen yang berbahan dasar dari pati jagung di mana material PLA banyak digunakan dalam teknologi FDM karena memiliki karakteristik yang mudah diproses, ramah lingkungan, serta memiliki stabilitas dimensi yang baik dibandingkan beberapa material termoplastik lainnya. PLA juga memiliki kekakuan yang relatif tinggi sehingga cocok digunakan untuk berbagai aplikasi prototype maupun komponen fungsional ringan. Selain itu, PLA memiliki kemampuan adhesi antar lapisan yang cukup baik sehingga dapat menghasilkan struktur cetakan yang stabil. Namun demikian, sifat mekanik dari PLA sangat dipengaruhi oleh kondisi proses pencetakan seperti pattern, infill, serta temperatur proses yang digunakan selama pencetakan berlangsung [10], yang pastinya memiliki sifat biodegradable atau dapat terurai dengan sendirinya. Filamen jenis ini mudah sekali untuk dicetak dan juga terjangkau. Filamen ini tidak perlu temperatur nozzle tinggi, tidak seperti filamen lain seperti ABS yang membutuhkan suhu 230°C, untuk filamen PLA sendiri cukup 190-220°C [11]. Secara umum, filamen PLA dapat dicetak dengan *bed temperature* berkisar antara 30-60°C, sehingga tidak memerlukan temperatur yang terlalu tinggi agar dapat menempel dengan baik pada permukaan bed [12].

Pada penelitian kali ini akan menggunakan Filamen PLA sebagai bahan untuk proses *3d printing* yang nantinya akan diteliti untuk pengaruh *bed temperature* terhadap hasil uji bending dari proses *3d printing*. Menurut Faisal (2024), penggunaan material seperti PLA semakin meningkatkan aspek keberlanjutan dan fleksibilitas teknologi additive manufacturing, sehingga cocok diterapkan pada berbagai bidang aplikasi. Selain itu, karakteristik PLA yang memiliki permukaan mengilap serta sifatnya sebagai biopolimer yang mudah dicetak telah memperkuat pemanfaatannya dalam berbagai aplikasi.

Berdasarkan uraian di atas, penelitian ini perlu dilakukan untuk menganalisis pengaruh variasi *bed temperature* terhadap kualitas visual produk, kekuatan bending, dan tingkat cacat porositas pada produk hasil *3d printing* berbahan dasar filamen PLA. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam menentukan parameter *bed temperature* yang optimal untuk menghasilkan produk dengan kualitas terbaik.

2. Tinjauan Literatur

2.1. Karakteristik PLA

PLA (Polylactic Acid) adalah termoplastik biodegradable berbasis sumber daya terbarukan yang menjadi alternatif pengganti plastik non-degradable seperti PET, PP, dan PS [13]. Keunggulan PLA meliputi bahan baku dari tumbuhan/hewan, kualitas tarik baik, tidak beracun, resolusi cetak tinggi, terurai dalam 6-24 bulan, dan harga terjangkau [14]. Kelemahannya antara lain sifat rapuh, stabilitas termal terbatas, dan degradasi lambat pada kondisi lingkungan tertentu [5]. Sifat mekanis PLA disajikan pada Tabel 2.1.

Tabel 1. Karakteristik PLA

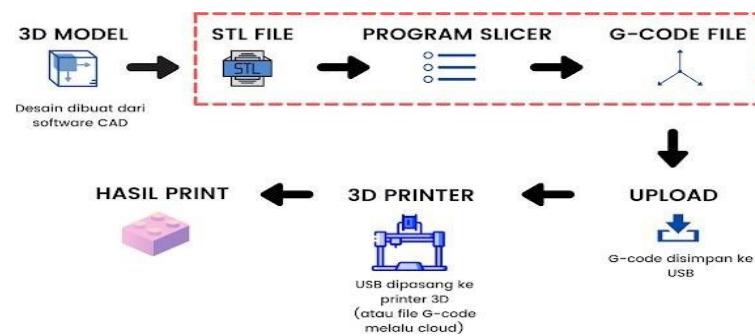
Properties	PLA
Polymer density (g/cm^3)	1.21 – 1.30
Tensile strength (MPa)	15.5 – 150
Tensile modulus (GPa)	2.7-16
Ultimate strain (%)	2-10
Specific tensile strength (Nm/g)	16.8-66.8
Specific tensile modulus (kNm/g)	0.28-3.85
Glass transition temperature ($^{\circ}\text{C}$)	60-65
Melting temperature ($^{\circ}\text{C}$)	130-180

2.2 Gear

Gear atau roda gigi berfungsi mentransmisikan daya agar motor/mesin beroperasi optimal [9]. Roda gigi berbentuk silinder bergigi yang dipasang pada poros untuk meneruskan gerak, mengubah arah putaran, serta menaikkan atau menurunkan kecepatan. Kelebihan gear sebagai transmisi: (1) sistem ringkas untuk putaran tinggi dan daya besar; (2) konstruksi sederhana; (3) kemampuan beban tinggi; (4) kecepatan transmisi dapat diatur; (5) efisiensi tinggi karena slip minimal [15].

2.3. 3d printing

3d printing merupakan inovasi manufaktur aditif yang membentuk objek dengan menambahkan material per lapisan [11]. Metode umum meliputi SLA dan FDM, dengan FDM bekerja melalui ekstrusi filamen plastik di atas base plate. Proses dimulai dari desain CAD, dikonversi ke format STL melalui CAM, lalu dicetak [12]. Keunggulan *3d printing* mampu mencetak geometri kompleks dengan detail tinggi, efisiensi produksi (satu proses tanpa alat tambahan), pengurangan limbah, dan kemudahan iterasi desain tanpa perubahan signifikan [16]. Proses *3d printing* ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 1. Proses *3d printing*
(Sumber: Desaincad, 2021)

2.4. *Bed temperature*

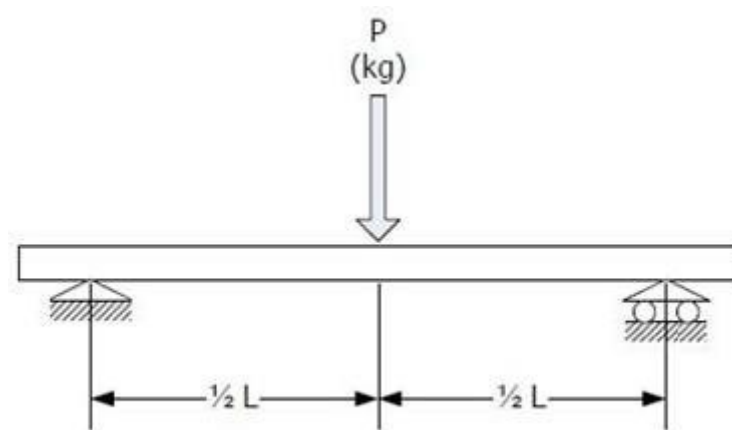
Suhu bed (*Build Plate Temperature*) adalah parameter krusial dalam FDM yang memengaruhi adhesi lapisan pertama, stabilitas cetakan, dan risiko warping [17]. Kenaikan suhu bed hingga di atas suhu transisi gelas (glass transition temperature) material meningkatkan gaya adhesi secara substansial. PLA memiliki suhu transisi gelas 60-65°C, sehingga pemanasan di atas nilai ini memaksimalkan keterikatan lapisan pertama [17]. Suhu bed terlalu rendah menyebabkan lapisan pertama tidak menempel sempurna (permukaan tidak rata/berongga), sedangkan suhu terlalu tinggi membuat material terlalu lunak dan menyebabkan deformasi. Pengaturan optimal diperlukan untuk permukaan halus dan mengurangi cacat visual [18].

2.5 Cacat Porositas

Porositas adalah rongga/ celah kecil dalam struktur material akibat deposisi tidak sempurna antar lapisan atau jalur ekstrusi pada FDM [18]. Tingkat porositas dipengaruhi parameter proses seperti nozzle temperature, *bed temperature*, print speed, layer height, dan infill density [11]. Porositas menurunkan sifat mekanik (kekuatan tarik dan lentur) karena rongga menjadi titik awal kerusakan saat menerima beban [8]. Pengaturan parameter tepat diperlukan untuk meminimalkan porositas.

2.6 Pengujian Bending

Pengujian bending adalah uji mekanik dengan pembebanan di titik tengah spesimen yang ditahan pada dua tumpuan, menyebabkan deformasi elastis-plastis hingga kerusakan (Kamphuh *et al.*, 2023). Penelitian ini menggunakan standar ASTM D790 sesuai Siagian *et al.* (2023). Titik pembebanan uji bending ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2. Pembebanan Uji Bending (Sumber:Rajasensor, 2021)

2.7 Uji Mikroskop

Uji mikroskop digunakan untuk mengamati struktur permukaan dan morfologi material, khususnya mengidentifikasi cacat porositas (void), ketidakaturan lapisan, dan kekasaran permukaan hasil cetakan FDM [9].

2.8 Pengolahan Data

One Way ANOVA adalah metode statistik parametrik untuk menguji perbedaan rata-rata signifikan antara tiga kelompok atau lebih berdasarkan satu faktor bebas [6]. Pengujian menggunakan nilai F (rasio ragam antar kelompok terhadap ragam dalam kelompok). Jika $F_{hitung} > F_{tabel}$ atau $p\text{-value} < 0,05$, maka H_0 ditolak (terdapat perbedaan signifikan). Asumsi yang harus dipenuhi: (1) independensi data, (2) normalitas, (3) homogenitas varians (Sidebar, 2022).

3. Metode

Pada bagian ini, Anda perlu menjelaskan metode yang diusulkan langkah demi langkah. Penjelasan disertai dengan persamaan dan diagram alir sebagai ilustrasi akan memudahkan pembaca memahami penelitian Anda.

3.1 Bahan Penelitian

Penelitian ini menggunakan material filament PLA (*Polylactic Acid*) sebagai bahan utama proses *3d printing*. Filament PLA adalah poliester *biodegradable* dan bioaktif yang terdiri dari blok bangunan asam laktat. Spesifikasi material yang digunakan adalah sebagai berikut:

- Diameter Filament: 1,75 mm
- Berat *Spool*: 1 kg
- Nozzle Temperature*: 190-220°C
- Base Plate Temperature*: 30-60°C
- Density*: 1,25 g/cm³

3.2 Alat dan Bahan

3.2.1 Alat

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini meliputi:

a. Timbangan/Neraca Digital

Digunakan untuk menimbang hasil *3d printing* yang telah selesai dicetak.



Gambar 3. Timbangan/ Neraca Digital

b. *3d printing* (Bambu Lab A1)

Mesin *3d printing* tipe FDM (*Fused Deposition Modeling*) digunakan untuk mencetak produk dengan bahan filament PLA.



Gambar 4. *3d printing*

c. Mesin Uji Bending (UTM HT-2402)

Mesin Uji Universal (*Universal Testing Machine*/UTM) tipe HT-2402 digunakan untuk menguji kekuatan bending spesimen hasil *3d printing*.



Gambar 5. Mesin Uji Bending

d. Mistar Ukur

Digunakan untuk mengukur dimensi spesimen hasil pencetakan.



Gambar 6. Mistar Ukur

e. Digital Microscope

Alat ini digunakan untuk mengidentifikasi cacat mikro (porositas) pada hasil *3d printing*.



Gambar 7. Digital Microscope

3.2.2 Bahan

a. Filament PLA

PLA (*Polylactic Acid*) adalah filament berbahan dasar pati jagung yang bersifat *biodegradable*.



Gambar 8. Filament PLA (sumber: Filament2print, 2022)

3.3 Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan desain spesimen uji bending mengacu pada standar ASTM D790. Spesimen berbentuk balok persegi panjang dengan dimensi:

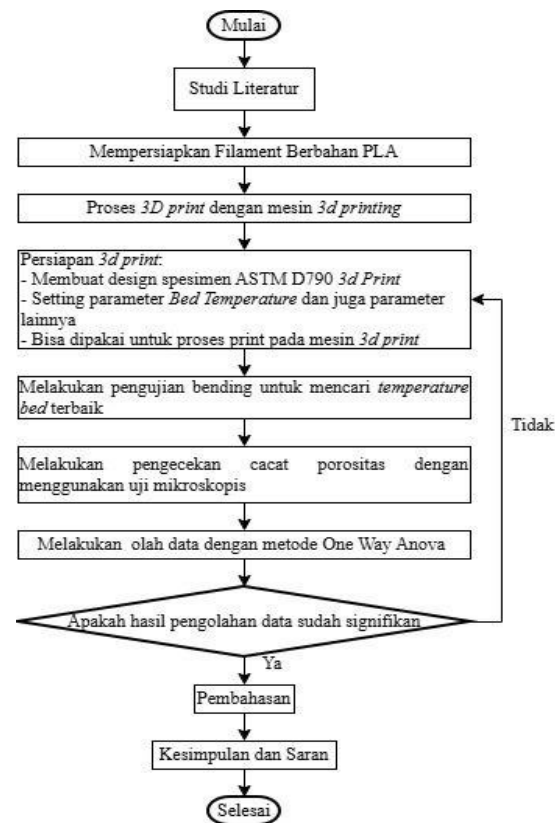
- Panjang: 127 mm
- Lebar: 12,7 mm
- Tebal: 3,2 mm

Ketentuan standar ASTM D790:

- Rasio panjang bentang (*support span*) terhadap ketebalan = 16:1 (untuk metode uji tiga titik/ *three-point bending*)
- Jarak antar penyangga (*span length*): 50–52 mm
- Kecepatan pembebanan diatur sesuai standar

3.4 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian dijelaskan melalui diagram alir pada Gambar 8.



Gambar 9. Diagram Alir Penelitian Tahapan

penelitian secara rinci adalah sebagai berikut:

- a. Studi literatur
- b. Persiapan alat dan bahan
- c. Desain spesimen ASTM D790 menggunakan *software* CAD
- d. Proses *slicing* dan pembuatan file G-code
- e. Kalibrasi mesin *3d printing*
- f. Proses pencetakan dengan variasi *bed temperature* (30°C, 40°C, 50°C, 60°C)
- g. Pengambilan spesimen hasil cetak
- h. Pengukuran dimensi dan penimbangan spesimen
- i. Pengujian bending menggunakan UTM HT-2402
- j. Pengamatan porositas menggunakan *digital microscope*
- k. Analisis data menggunakan metode ANOVA
- l. Kesimpulan

3.5 Penetapan Variabel Penelitian

3.5.1 Variabel Bebas (*Independent Variable*)

Variabel bebas yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

- a. Temperature Bed: 30°C, 40°C, 50°C, dan 60°C

3.5.2 Variabel Tetap (*Control Variable*)

Variabel tetap yang digunakan:

- a. Filament PLA
- b. Parameter lain (kecuali *bed temperature*) dibuat konstan meliputi:
 - 1) *Nozzle temperature* : 230 °C
 - 2) *Layer height* : 1mm
 - 3) *Infill density* : 100%
 - 4) *Pattern* : Rectangle
 - 5) *Print speed* : 100mm/s

- c. Kondisi lingkungan (suhu ruangan dan kelembaban) dianggap konstan
- d. Tekanan *nozzle* dan diameter filament (1,75 mm) dibuat sama

3.5.3 Variabel Terikat (*Dependent Variable*)

Variabel terikat yang diamati:

- a. Hasil uji *bending* (nilai *load* maksimum)
- b. Cacat porositas
- c. Visual produk hasil *3d printing*

3.6 Analisis Penelitian

3.6.1 Proses *3d printing*

Langkah-langkah proses *3d printing*:

- a. Tekan tombol ON untuk menghidupkan mesin
- b. Masukkan filament ke tempat pada mesin *3d printing*
- c. Lakukan proses kalibrasi agar *bed* menjadi datar dan menjaga jarak antara *nozzle* dan *bed*
- d. Masukkan kartu memori atau *flashdisk* berisi file G-code yang telah di-*slicing* dari *software slicer*
- e. Atur parameter proses *3d printing* (suhu *nozzle* dan *bed temperature* sesuai parameter yang telah ditentukan)
- f. Proses pencetakan dilakukan dan diulang sebanyak 12 kali (3 replikasi untuk setiap variasi *bed temperature*)

3.6.2 Proses Uji Bending

Langkah-langkah uji *bending*:

- a. Siapkan spesimen, lakukan pengukuran panjang, lebar, tinggi, dan berat spesimen, serta penentuan titik tengah dan titik tumpu
- b. Pasang spesimen pada mesin uji *bending* dan pastikan tepat pada garis tumpuan
- c. Sesuaikan indikator tekanan sampai menyentuh spesimen
- d. Jalankan mesin uji *bending* dengan kecepatan tekan yang konsisten
- e. Data hasil pengujian akan keluar di layar komputer
- f. Matikan proses uji *bending* jika spesimen sudah tidak bisa menerima gaya

3.7 Analisis Data Penelitian

3.7.1 Metode Pengolahan Data

Metode pengolahan data yang digunakan adalah metode *Analysis of Variance* (ANOVA) dengan tahapan:

a. Studi Literatur

Pengumpulan referensi teori yang mendukung penelitian.

b. Analisis One Way ANOVA menggunakan Software Minitab

Data dianalisis menggunakan *software* Minitab dengan dua tahap:

1) ANOVA (*Analysis of Variance*)

Tujuan analisis ANOVA adalah mengidentifikasi faktor-faktor yang memberikan kontribusi signifikan terhadap kinerja produk dengan menggunakan S/N *ratio* sebagai ukuran respons. Perhitungan ANOVA menggunakan *software* Minitab disajikan pada Tabel 3.5.

Tabel 2. Tabel *Analysis of Variance* dan Pengaruh Persen Kontribusi

Sumber Variasi	DF	SS	MS	F-Value	P-Value
<i>Temperature Bed</i>					
<i>Load Uji Bending</i>					
<i>Error</i>					
Total					

2) Uji F

Pengujian hipotesis F dilaksanakan dengan mempertimbangkan perbedaan yang dihasilkan oleh masing-masing faktor dan variasi kesalahan. Hipotesis yang diujikan:

- H_0 (Hipotesis Nol): Tidak ada pengaruh variasi parameter ($\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4$)
- H_1 (Hipotesis Alternatif): Terdapat pengaruh variasi parameter ($\mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3 \neq \mu_4$)

Kriteria pengujian:

- Tingkat signifikansi $\alpha = 0,05$ (5%)
- Jika $F_{hitung} < F_{tabel}$, maka H_0 diterima
- Jika $F_{hitung} > F_{tabel}$, maka H_1 diterima
- Jika $P\text{-value} < 0,05$, maka H_0 ditolak

3.8 Kerangka Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan melalui tahapan sistematis yang dapat digambarkan sebagai berikut:

a. Tahap Persiapan:

- Studi literatur
- Persiapan alat dan bahan (mesin *3d printing*, filament PLA, UTM, *digital microscope*)
Desain spesimen ASTM D790

b. Tahap Pelaksanaan:

- Proses *3d printing* dengan variasi *bed temperature* 30°C, 40°C, 50°C, 60°C (masing-masing 3 replikasi)
- Pengukuran dimensi dan berat spesimen

c. Tahap Pengujian:

- Uji *bending* menggunakan UTM HT-2402
- Pengamatan porositas menggunakan *digital microscope*
- Dokumentasi visual produk

d. Tahap Analisis:

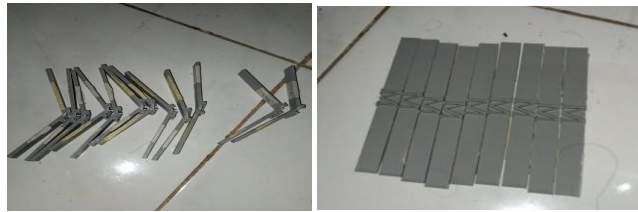
- Analisis data menggunakan metode *One Way ANOVA* dengan *software* Minitab
- Uji F untuk menentukan signifikansi pengaruh *bed temperature*
- Pembahasan hasil penelitian

4. Hasil dan Pembahasan

4.1 Hasil Visual Product *3d printing*

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui visual produk dari hasil *3d printing* menggunakan mesin *3d printing* tipe FDM (*Fused Deposition Modeling*) dengan spesifikasi volume cetak 256×256×256 mm, struktur mesin *bed slinger*, diameter *nozzle* 0,4 mm, suhu maksimal *nozzle* 300°C, suhu maksimal *bed* 100°C, kecepatan maksimal cetak 500 mm/s, dan akselerasi maksimum 10.000 mm/s².

Hasil visual produk yang menggunakan filament PLA ini relatif sama secara visual. Menurut Spoerk *et al.* (2022), peningkatan suhu *bed* hingga mendekati temperatur transisi gelas (*glass transition temperature*) material PLA dapat meningkatkan adhesi lapisan pertama dan memperbaiki kualitas ikatan antar lapisan sehingga menghasilkan sifat mekanik yang lebih baik. Oleh karena itu, penggunaan *bed temperature* 50°C menghasilkan distribusi tegangan yang lebih merata selama proses pembebanan *bending*. Perbedaan utama terletak pada pengujian *bending* dengan standar ASTM D790 yang dibuat menggunakan teknologi *3d printing*. Berikut hasil produk *3d printing* yang ditampilkan pada Gambar 9.



Gambar 10. Hasil 3d printing

Pada gambar tersebut terlihat 12 sampel ASTM D790 yang telah dilakukan proses *3d printing* menggunakan filament PLA, yang selanjutnya akan dilakukan proses uji *bending*. Terdapat 4 level *bed temperature* yang digunakan pada hasil cetakan, yaitu 30°C, 40°C, 50°C, dan 60°C dengan masing-masing 3 replikasi.

4.2 Hasil Uji Bending

Pengujian *bending* dilakukan untuk mengetahui kekuatan lentur dari material PLA. Uji kekuatan *bending* filament menggunakan acuan ASTM D790 dengan dimensi spesimen panjang 127 mm, lebar 12,7 mm, dan ketebalan 3,2 mm. Data hasil pengujian *bending* filament disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Data Pengujian Bending

No.	Faktor Temperature)	(Bed Replikasi	Load Hasil Uji Bending (N)
1	30°C	I	45,8
2	30°C	II	41,9
3	30°C	III	47,1
4	40°C	I	41,3
5	40°C	II	44,9
6	40°C	III	40,9
7	50°C	I	44,5
8	50°C	II	45,6
9	50°C	III	45,5
10	60°C	I	45,7
11	60°C	II	42,4
12	60°C	III	42,2

Tabel 3. merupakan output dari hasil uji *bending* terhadap 12 spesimen/material hasil *3d printing*. Parameter yang digunakan adalah *bed temperature* dengan 4 level yaitu 30°C, 40°C, 50°C, dan 60°C.

Berdasarkan data pada Tabel 4.1, rata-rata nilai *load* maksimum untuk masing-masing variasi *bed temperature* adalah:

- 30°C: $(45,8 + 41,9 + 47,1)/3 = 44,93$ N
- 40°C: $(41,3 + 44,9 + 40,9)/3 = 42,37$ N
- 50°C: $(44,5 + 45,6 + 45,5)/3 = 45,20$ N
- 60°C: $(45,7 + 42,4 + 42,2)/3 = 43,43$ N

Hasil tersebut menunjukkan bahwa nilai beban lentur tertinggi diperoleh pada variasi *bed temperature* 50°C (45,20 N), sedangkan nilai terendah diperoleh pada *bed temperature* 40°C (42,37 N). Peningkatan nilai *load* pada *bed temperature* 50°C menunjukkan bahwa temperatur tersebut mampu memberikan kondisi adhesi lapisan pertama yang lebih baik sehingga ikatan antar lapisan (*interlayer bonding*) menjadi lebih optimal. Ikatan antar lapisan yang baik akan meningkatkan kemampuan spesimen dalam menahan pembebanan lentur.

4.2.1 Hasil Uji Bending *Bed temperature* 30°C

a. Replikasi 1:

- 1) Load tertinggi: 45,8 N
- 2) *Displacement*: 68,46%
- 3) *Yield strength*: 0,76 N/mm²

b. Replikasi 2:

- 1) Load tertinggi: 41,9 N
- 2) *Displacement*: 68,46%
- 3) *Yield strength*: 0,73 N/mm²

c. Replikasi 3:

- 1) Load tertinggi: 47,1 N
- 2) *Displacement*: 68,46%
- 3) *Yield strength*: 0,85 N/mm²

4.2.2 Hasil Uji Bending *Bed temperature* 40°C

a. Replikasi 1:

- 1) Load tertinggi: 41,3 N
- 2) *Displacement*: 68,46%
- 3) *Yield strength*: 0,70 N/mm²

b. Replikasi 2:

- 1) Load tertinggi: 44,9 N
- 2) *Displacement*: 62,29%
- 3) *Yield strength*: 0,76 N/mm²

c. Replikasi 3:

- 1) Load tertinggi: 40,9 N
- 2) *Displacement*: 68,46%
- 3) *Yield strength*: 0,64 N/mm²

4.2.3 Hasil Uji Bending *Bed temperature* 50°C

a. Replikasi 1:

- 1) Load tertinggi: 45,5 N
- 2) *Displacement*: 62,29%
- 3) *Yield strength*: 0,76 N/mm²

b. Replikasi 2:

- 1) Load tertinggi: 45,6 N
- 2) *Displacement*: 62,16%
- 3) *Yield strength*: 0,76 N/mm²

c. Replikasi 3:

- 1) Load tertinggi: 45,5 N
- 2) *Displacement*: 62,16%
- 3) *Yield strength*: 0,76 N/mm²

4.2.4 Hasil Uji Bending *Bed temperature* 60°C

a. Replikasi 1:

- 1) Load tertinggi: 45,7 N
- 2) *Displacement*: 62,16%
- 3) *Yield strength*: 0,81 N/mm²

b. Replikasi 2:

- 1) Load tertinggi: 42,4 N
- 2) *Displacement*: 62,16%
- 3) *Yield strength*: 0,72 N/mm²

c. Replikasi 3:

- 1) Load tertinggi: 42,2 N
- 2) *Displacement*: 62,16%
- 3) *Yield strength*: 0,71 N/mm²

4.3 Cacat Porositas

Pada penelitian ini menggunakan proses *3d printing* yang menghasilkan cacat porositas, yaitu terbentuknya rongga atau cacat mikroskopis di dalam struktur cetakan. Penelitian ini menggunakan mikroskop digital untuk mengidentifikasi cacat yang terjadi. Hasil pengamatan ditampilkan pada gambar dan dijelaskan sebagai berikut:

4.3.1 Cacat Porositas pada *Temperature Bed 30°C*

Replikasi ke-3: Terdapat 2 cacat porositas pada hasil *3d printing*.

4.3.2 Cacat Porositas pada *Temperature Bed 40°C*

- Replikasi ke-1: Terdapat 3 cacat porositas
- Replikasi ke-2: Terdapat 4 cacat porositas
- Replikasi ke-3: Terdapat 2 cacat porositas

4.3.3 Cacat Porositas pada *Temperature Bed 50°C*

- Replikasi ke-1: Terdapat 3 cacat porositas
- Replikasi ke-2: Terdapat 2 cacat porositas
- Replikasi ke-3: Terdapat 3 cacat porositas

4.3.4 Cacat Porositas pada *Temperature Bed 60°C*

- Replikasi ke-1: Terdapat 4 cacat porositas
- Replikasi ke-2: Terdapat 2 cacat porositas
- Replikasi ke-3: Terdapat 1 cacat porositas

Hasil pengamatan menunjukkan bahwa seluruh spesimen hasil *3d printing* mengalami porositas dengan jumlah yang berbeda-beda. Pada *bed temperature 30°C* ditemukan 2 porositas, pada *bed temperature 40°C* ditemukan 2-4 porositas, pada *bed temperature 50°C* ditemukan 2-3 porositas, dan pada *bed temperature 60°C* ditemukan 1-4 porositas. Hal ini menunjukkan bahwa variasi *bed temperature* mempengaruhi terbentuknya cacat porositas pada hasil cetakan, namun dalam penelitian ini belum diperoleh kecenderungan yang menunjukkan bahwa satu variasi *bed temperature* tertentu secara konsisten menghasilkan porositas paling rendah dibandingkan variasi *bed temperature* lainnya.

4.4 Analisis Data Penelitian

4.4.1 Hasil Perhitungan *One Way ANOVA*

Perhitungan *One Way ANOVA* ditampilkan pada Tabel 4. berikut:

Tabel 4. Hasil Perhitungan *One Way ANOVA* Pengujian Bending

Sumber Variasi	DF	SS	MS	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
<i>Temperature Bed</i>	3	15,90	32,63%	15,90	5,299	1,29	0,342
<i>Error</i>	8	32,82	67,37%	32,82	4,103		
Total	11	48,72	100%				

4.4.2 Uji Hipotesis

Dari hasil ANOVA untuk hasil *displacement* tersebut dapat disimpulkan bahwa uji hipotesis awal (H_0) dan hipotesis alternatif (H_1) dapat dilakukan dengan pengujian faktor secara signifikan yang berpengaruh terhadap hasil uji *bending* menggunakan tabel distribusi F: H_0 : Tidak ada pengaruh pada perbedaan level faktor *temperature bed* terhadap hasil pengujian *bending* untuk nilai *load* uji *bending*.

H_1 : Ada pengaruh pada perbedaan level faktor *temperature bed* terhadap hasil pengujian *bending* untuk nilai *load* uji *bending*.

Kesimpulan: $F_{value} = 1,29$ dan $F_{tabel} = F(0,05;4,7) = 4,120$. Karena $F_{value} < F_{tabel}$ ($1,29 < 4,120$) dan $P\text{-value} = 0,342 > 0,05$, maka H_0 diterima dan H_1 ditolak. Hal ini berarti perbedaan 4 level pada faktor *temperature bed* tidak memiliki pengaruh yang signifikan terhadap nilai *load* uji *bending*.

4.5 Pembahasan

Parameter proses *3d printing* yang digunakan dalam penelitian ini adalah variasi *bed temperature* sebesar 30°C, 40°C, 50°C, dan 60°C. Setelah proses cetak menggunakan filament PLA selesai dilakukan, seluruh spesimen diuji menggunakan metode *three-point bending* berdasarkan standar ASTM D790 untuk mengetahui kemampuan material dalam menahan beban lentur.

4.5.1 Pengaruh Variasi *Bed temperature* terhadap Kekuatan Bending

Berdasarkan hasil pengujian *bending* pada Tabel 4. diperoleh rata-rata nilai *load* maksimum untuk masing-masing variasi *bed temperature*:

- a. Pada *bed temperature* 30°C diperoleh rata-rata beban maksimum sebesar 44,93 N
- b. Pada 40°C sebesar 42,37 N
- c. Pada 50°C sebesar 45,20 N
- d. Pada 60°C sebesar 43,43 N

Hasil tersebut menunjukkan bahwa nilai beban lentur tertinggi diperoleh pada variasi *bed temperature* 50°C, sedangkan nilai terendah diperoleh pada *bed temperature* 40°C.

Peningkatan nilai *load* pada *bed temperature* 50°C menunjukkan bahwa temperatur tersebut mampu memberikan kondisi adhesi lapisan pertama yang lebih baik sehingga ikatan antar lapisan (*interlayer bonding*) menjadi lebih optimal. Ikatan antar lapisan yang baik akan meningkatkan kemampuan spesimen dalam menahan pembebanan lentur. Menurut Spoerk *et al.* (2022), peningkatan suhu *bed* hingga mendekati temperatur transisi gelas (*glass transition temperature*) material PLA dapat meningkatkan adhesi lapisan pertama dan memperbaiki kualitas ikatan antar lapisan sehingga menghasilkan sifat mekanik yang lebih baik. Oleh karena itu, penggunaan *bed temperature* 50°C menghasilkan distribusi tegangan yang lebih merata selama proses pembebanan *bending*.

Namun demikian, hasil analisis statistik menggunakan *One Way ANOVA* pada Tabel 4.2 menunjukkan nilai *Fhitung* sebesar 1,29 dengan *P-value* sebesar 0,342. Nilai tersebut lebih besar dari tingkat signifikansi 0,05 sehingga H_0 diterima. Dengan demikian, variasi *bed temperature* 30°C, 40°C, 50°C, dan 60°C tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai *load* hasil uji *bending* filament PLA. Hal ini menunjukkan bahwa perubahan *bed temperature* pada rentang tersebut belum cukup besar untuk menghasilkan perbedaan kekuatan lentur yang signifikan secara statistik.

4.5.2 Perbandingan dengan Penelitian Terdahulu

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian As'ad [19] yang menyatakan bahwa parameter *bed temperature* memiliki pengaruh yang relatif kecil dibandingkan parameter proses lainnya seperti *infill density* dan *printing speed* terhadap sifat mekanik hasil cetakan. Selain itu, penelitian Menargues *et al.* [8] juga menjelaskan bahwa kekuatan mekanik produk hasil FDM lebih dipengaruhi oleh kualitas ikatan antar lapisan yang dipengaruhi secara dominan oleh temperatur *nozzle*, *infill density*, dan orientasi pencetakan dibandingkan variasi *bed temperature* pada perbedaan normal cetakan PLA.

Perbedaan nilai *load* yang relatif kecil antar variasi *bed temperature* pada penelitian ini juga menunjukkan bahwa material PLA masih mampu mempertahankan kestabilan dimensi dan kualitas ikatan lapisan pada rentang *bed temperature* 30°C-60°C. Hal ini sesuai dengan penelitian Hakim *et al.* [12] yang menyatakan bahwa PLA dapat dicetak dengan baik pada rentang suhu *bed* 30°C-60°C karena material tersebut memiliki karakteristik adhesi yang baik terhadap permukaan *bed* tanpa memerlukan suhu tinggi seperti material ABS.

4.5.3 Analisis Cacat Porositas

Hasil pengamatan cacat porositas menunjukkan bahwa seluruh spesimen hasil *3d printing* mengalami porositas dengan jumlah yang bervariasi. Porositas terjadi akibat proses deposisi material yang tidak sempurna antar lapisan maupun antar jalur ekstrusi filament [13]. Hal ini disebabkan oleh kurang optimalnya ikatan antar lapisan selama proses pencetakan berlangsung.

Variasi *bed temperature* mempengaruhi terbentuknya cacat porositas. Suhu *bed* yang terlalu rendah (30°C) menyebabkan lapisan pertama tidak menempel sempurna, menghasilkan permukaan yang tidak rata dan berongga [18]. Pada *bed temperature* 40°C ditemukan jumlah porositas tertinggi (2-4 porositas), yang menunjukkan bahwa pada temperatur ini proses ikatan antar lapisan belum optimal. Sebaliknya, pada *bed temperature* 60°C ditemukan variasi porositas 1-4, dengan replikasi ke-3 hanya memiliki 1 porositas, mengindikasikan bahwa suhu yang lebih tinggi dapat mengurangi cacat porositas pada

beberapa kondisi.

Keberadaan porositas dapat mempengaruhi sifat mekanik material. Semakin tinggi tingkat porositas pada material, maka kekuatan mekanik yang dimiliki akan semakin menurun karena rongga pada struktur material dapat menjadi titik awal terjadinya kerusakan saat menerima beban [8]. Namun dalam penelitian ini, perbedaan jumlah porositas antar variasi *bed temperature* tidak cukup signifikan untuk menghasilkan perbedaan kekuatan *bending* yang signifikan secara statistik.

4.5.4 Implikasi Penelitian

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis data dapat disimpulkan bahwa variasi *bed temperature* 30°C, 40°C, 50°C, dan 60°C tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kekuatan *bending* filament PLA. Meskipun demikian, *bed temperature* 50°C menghasilkan nilai rata-rata *load* tertinggi (45,20 N) sehingga dapat dianggap sebagai temperatur yang memberikan performa mekanik terbaik pada kondisi penelitian ini.

Parameter *bed temperature* yang optimal diperlukan untuk menghasilkan permukaan cetakan yang halus serta mengurangi cacat visual pada produk *3d printing* [18]. Oleh karena itu, meskipun pengaruhnya tidak signifikan secara statistik terhadap kekuatan *bending*, pengaturan *bed temperature* tetap penting untuk menghasilkan kualitas visual produk yang baik dan meminimalkan cacat porositas.

4.5.5 Keterbatasan Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan:

- a. Penelitian hanya menggunakan satu jenis material (filament PLA)
- b. Parameter lain seperti *nozzle temperature*, *layer height*, *infill*, *pattern*, dan *print speed* dibuat konstan
- c. Pengamatan porositas dilakukan secara kualitatif (penghitungan jumlah porositas) tanpa pengukuran ukuran dan distribusi porositas secara kuantitatif
- d. Penelitian tidak menguji variasi *bed temperature* di luar rentang 30°C-60°C

4.5.6 Saran untuk Penelitian Lanjutan

Berdasarkan hasil penelitian, disarankan untuk penelitian selanjutnya:

- a. Menggunakan bentuk spesimen berbeda seperti ASTM C393, D7672, dan lain-lain sebagai pembandingan
- b. Menggunakan variasi parameter lain seperti *nozzle temperature*, *print speed*, dan *layer height* untuk mengetahui pengaruhnya terhadap hasil cetakan *3d printing*
- c. Melakukan pengukuran porositas secara kuantitatif menggunakan *image processing* atau *software* analisis mikroskop
- d. Menguji variasi *bed temperature* yang lebih luas untuk melihat tren pengaruhnya terhadap sifat mekanik

5. Perbandingan

Penelitian tentang pengaruh *bed temperature* pada proses *3d printing* FDM telah berkembang pesat. Spoerk *et al.* [17] menemukan bahwa peningkatan suhu *bed* hingga di atas suhu transisi gelas PLA (60-65°C) secara substansial meningkatkan adhesi lapisan pertama. Hakim *et al.* [12] mengkonfirmasi bahwa PLA dapat dicetak optimal pada rentang 30°C-60°C tanpa memerlukan suhu tinggi seperti ABS.

Penelitian terkini oleh Menargues *et al.* [8] pada 495 spesimen menyimpulkan bahwa kekuatan mekanik FDM lebih dominan dipengaruhi oleh temperatur *nozzle*, *infill density*, dan orientasi pencetakan dibandingkan *bed temperature*. Hal ini sejalan dengan As'ad [19] yang menyatakan *bed temperature* memberikan pengaruh paling kecil terhadap sifat mekanik. Mengenai cacat porositas, Chacón *et al.* [18] dan Ngo *et al.* [11] menjelaskan bahwa porositas terjadi akibat deposisi material tidak sempurna, dipengaruhi oleh berbagai parameter proses. Tymrak *et al.* [8] menambahkan bahwa porositas menurunkan kekuatan mekanik karena menjadi titik awal kerusakan.

Penelitian Nurfaedah [20] menunjukkan *layer thickness* sebagai parameter paling berpengaruh terhadap kekuatan *bending* PLA. Zhang *et al.* [6] menekankan pentingnya pengendalian parameter suhu untuk mengurangi porositas. Berdasarkan celah pengetahuan tersebut, penelitian ini menganalisis pengaruh variasi *bed temperature* 30°C-60°C terhadap visual produk, kekuatan *bending*, dan porositas filament PLA dengan standar ASTM D790 dan analisis ANOVA.

6. Kesimpulan

Variasi *bed temperature* 30°C-60°C menghasilkan kualitas visual berbeda pada cetakan PLA. Pengamatan mikroskop menunjukkan seluruh spesimen mengalami porositas dengan jumlah bervariasi, yang dipengaruhi oleh proses adhesi lapisan pertama dan kualitas permukaan.

Uji bending menunjukkan nilai load tertinggi pada *bed temperature* 50°C (45,20 N) dan terendah pada 40°C (42,37 N). Namun analisis One Way ANOVA ($F_{hitung}=1,29$; $P_{value}=0,342>0,05$) menyimpulkan variasi *bed temperature* tidak berpengaruh signifikan terhadap kekuatan bending PLA.

Porositas ditemukan pada semua spesimen dengan jumlah bervariasi: 30°C (2), 40°C (2-4), 50°C (2-3), dan 60°C (1-4). Variasi *bed temperature* mempengaruhi porositas, namun belum ditemukan kecenderungan suhu tertentu yang secara konsisten menghasilkan porositas paling rendah.

Kontribusi Penulis: Penulis memberikan kontribusi dalam pengembangan ilmu manufaktur aditif melalui pembuktian bahwa variasi *bed temperature* 30°C-60°C tidak berpengaruh signifikan terhadap kekuatan bending PLA, dengan rekomendasi suhu optimal 50°C (45,20 N). Penulis juga menyusun prosedur penelitian standar ASTM D790, mengaplikasikan analisis statistik One Way ANOVA, dan memetakan porositas pada setiap variasi suhu. Kontribusi praktisnya berupa acuan parameter produksi bagi industri, promosi PLA sebagai material ramah lingkungan, serta landasan bagi penelitian lanjutan tentang pengaruh parameter proses lainnya terhadap kualitas cetakan.

Pendanaan: Penelitian ini merupakan bagian dari tugas akhir skripsi Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Jember. Seluruh biaya penelitian, meliputi pembelian bahan baku filament PLA, pengoperasian mesin *3d printing*, pengujian bending menggunakan UTM, serta penggunaan peralatan pendukung lainnya, didanai secara mandiri oleh penulis (Hilmi Raharjo). Penelitian ini tidak menerima hibah atau dukungan dana dari lembaga pemerintah, institusi swasta, atau pihak ketiga lainnya.

Pernyataan Ketersediaan Data: Data yang mendukung temuan dalam penelitian ini tersedia dari penulis terkait dan dapat diakses atas permintaan yang wajar. Data tersebut mencakup hasil pengujian bending (nilai load, displacement, dan *Yield strength*) dari 12 spesimen, dokumentasi visual produk hasil *3d printing*, serta gambar hasil pengamatan porositas menggunakan digital microscope pada setiap variasi *bed temperature*. Data mentah hasil pengujian dan perhitungan statistik One Way ANOVA menggunakan software Minitab juga tersedia. Namun, data tidak dipublikasikan secara terbuka karena keterbatasan akses dan merupakan bagian dari karya ilmiah skripsi penulis.

Ucapan Terima Kasih: Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT atas terselesaikannya penelitian dan skripsi ini. Penulis mengucapkan terima kasih kepada Bapak Asroful Abidin, S.T., M.Eng. dan Ibu Nely Ana Mufarida, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing, Ketua Program Studi Teknik Mesin, seluruh dosen dan staf Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Jember, kedua orang tua dan keluarga tercinta atas doa dan dukungannya, serta rekan-rekan yang telah membantu. Semoga kebaikan semua pihak mendapat balasan dari Allah SWT.

Konflik Kepentingan: Penulis menyatakan bahwa tidak terdapat konflik kepentingan dalam penelitian dan penulisan artikel ini. Penelitian ini dilakukan secara independen sebagai bagian dari tugas akhir skripsi di Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Jember. Tidak ada hubungan afiliasi, kepentingan finansial, atau hubungan pribadi dengan pihak-pihak terkait yang dapat mempengaruhi objektivitas dan hasil penelitian. Seluruh proses penelitian, mulai dari perencanaan, pelaksanaan eksperimen, pengolahan data, hingga penarikan kesimpulan, dilakukan secara jujur dan transparan tanpa intervensi dari pihak manapun.

Referensi

- [1] Ali, M. 2024. "Penerapan Teknologi *3d printing* Dalam Pembuat tan Komponen Mesin." Tugas Mahasiswa Program Studi Mesin: 1–12.
- [2] Aulia, Afifanisa, Muizuddin Azka, Rando Tungga Dewa, Ida Farida, Ariyo Nurachman, Satiya Permana, Valentina Diva, *et al.* 2025. "JURNAL KAJIAN TEKNIK MESIN Vol 10 No 1 Hal 22-31." 10(1): 22–31.
- [3] Boazter, Billy, Sebastian Siregar, Sri Nugroho, and Gunawan Dwi Haryadi. 2021. "Analisis Kegagalan Pada Piringan Gear Belakang Sepeda Motor Kapasitas 150 Cc." Jurnal Teknik Mesin S-1 9(4): 513–18. <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/jtm>.
- [4] Charpy, Metode, and Pada Material. 2021. "C, 215." 2(8).
- [5] Darsin, Mahros, Firman Ema Ismono, Mochamad Asrofi, Yuni Hermawan, and Intan Hardiatama. 2024. "Kuat Bending, Fraktografi, Dan Struktur Mikro Hasil *3d printing* Berbahan Pla (Polylactic Acid) - Titanium." Jurnal Rekayasa Mesin 15(3): 1375–85. doi:10.21776/jrm.v15i3.1631.
- [6] Desaincad. 2021. "Beranda *3d printing* APA ITU SLICER DALAM *3d printing*?" <https://www.desaincad.com/2021/05/apa-itu-3d-slicer-dalam-3d-printing.html>.
- [7] Filament2print. 2022. "PLA - The Filament." <https://filament2print.com/en/pla/2929-pla-the-filament.html>.
- [8] Gautama R, Chaerul, Muhammad Fa'iz Alfatih, and Sabri Alimi. 2022. "Eksperimen Uji Bending Pada Komposit Resin Polyester Dan." Jurnal Teknik Elektronik, Engine Engine 8(2): 237–42.
- [9] Hakim, Rahman, Ihsan Saputra, Gilang Prabowo Utama, and Yuris Setyoadi. 2022. "Pengaruh Temperatur Nozzle Dan Base Plate Pada Material PLA Terhadap Nilai Masa Jenis Dan Kekasaran Permukaan Produk Pada Mesin Leapfrog Creatr 3D Printer." Jurnal Teknologi dan Riset Terapan (JATRA) 1(1): 1–8. doi:10.30871/jatra.v1i1.1242.
- [10] Indah, Nur, and Mus Baehaqi. 2023. "Desain Dan Perancangan Alat Pengepres Geram Sampah Mesin Perkakas." Jurnal Teknik Mesin 6(1): 13. doi:10.22441/jtm.v6i1.1201.
- [11] Indun, A., Rahman, M., & Pratama, D. (2024). Pengaruh parameter proses fused deposition modeling (FDM) terhadap kualitas hasil cetakan ABS transparan. Jurnal Inovasi Teknologi Terapan, 6(1), 45–52.
- [12] Kampuh, Pada, V Baja Karbon, Sedang Terhadap, and Sifat Mekanis. 2023. "2095-Article Text-8345-1-10-20240209 (1)." 1(3): 144–50.
- [13] Kevin Alviansyah, setoawan reza, and suhendra bobie. 2023. "Proses Pembuatan Roda Gigi Pada Mesin Kertas." Jurnal Kajian Teknik Mesin Vol. 8.
- [14] Kumar, S., Singh, R., & Ahuja, I. P. S. (2021). Investigating surface characteristics and mechanical properties of FDM fabricated PLA parts. Materials Today: Proceedings, 44, 2050–2056.
- [15] Lubis, Gita Suryani, Muhammad Taufiqurrahman, and Muhammad Ivanto. 2021. "Analisa Pengaruh Parameter Proses Terhadap Uji Tarik Produk Hasil *3d printing* Berbahan Polylactic Acid." Jurnal Engine: Energi, Manufaktur, dan Material 5(2): 39. doi:10.30588/jeemm.v5i2.877.
- [16] Menargues, Sergi, Javier Navas, Isabel Espinosa, Maria Teresa Baile, Rodolpho Fernando Vaz, and Josep Anton Picas. 2025. "Effect of Additive Manufacturing Parameters on PLA, ABS, and PETG Strength." Processes 13(9): 1–15. doi:10.3390/pr13092733.
- [17] Otivic. 2022. "What Is PLA: A Comprehensive Guide to Polylactic Acid." <https://otivic.com/what-is-pla/>.
- [18] Pasaribu, Mathilda Jowito, Berlina Yunita Sari Romaji, Yeni Rahmawati, and Fadlilatul Taufany. 2021. "Pra Desain Pabrik Poly Lactic Acid (PLA) Dari Porang." Jurnal Teknik ITS 10(2). doi:10.12962/j23373539.v10i2.69208.
- [19] Pivar, Matej, Diana Gregor-Svetc, and Deja Muck. 2022. "Effect of Printing Process Parameters on the Shape Transformation Capability of 3D Printed Structures." Polymers 14(1). doi:10.3390/polym14010117.
- [20] Rajasensor. 2021. "Uji Bending." <https://pengujianlogam.wordpress.com/2012/11/02/uji-bending/>.
- [21] Rozak, Ahmad Abdul, Djoeli Satrijo, Achmad Widodo, Mahasiswa Jurusan, Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, *et al.* 2022. "Gear Test Rig." 2(3): 275–81.
- [22] Setyawan, Bima Agung, and Yatin Ngadiyono. 2022. "Analisis Pengaruh Tingkat Kelembaban Filamen PLA Terhadap Nilai Kekuatan Mekanik Hasil Cetak *3d printing*." Jurnal Dinamika Vokasional Teknik Mesin 7(1): 1–11. doi:10.21831/dinamika.v7i1.48259.
- [23] Siagian, Christine Angelica, Dhimas Wicaksono, and Ferry Setiawan. 2023. "Analisis Uji Tarik Dan Uji Bending Dengan Karakteristik Honeycomb Polylactic Acid (Pla) Terhadap Variasi Suhu Ruangan." Teknika STTKD: Jurnal Teknik, Elektronik, Engine 9(2): 256–61. doi:10.56521/teknika.v9i2.940.
- [24] Soeleman, and M. Isahudin Utama Putra. 2021. "Analisis Karakteristik Gear Sprocket Standard Dan Racing Pada Sepeda Motor." Sintek 2(2): 26–35. <http://motor.otomotifnet.com>.
- [25] Spoerk, Martin, Joamin Gonzalez-Gutierrez, Janak Sapkota, Stephan Schuschnigg, and Clemens Holzer. 2022. "Effect of the Printing *Bed temperature* on the Adhesion of Parts Produced by Fused Filament Fabrication." Plastics, Rubber and Composites 47(1): 17–24. doi:10.1080/14658011.2017.1399531.
- [26] Sumardiyanto, Didit, and Setiawan Putra. 2021. "ALAT PENGOLAHAN LIMBAH FILAMENT 3D PRINT DENGAN MATERIAL POLYLACTIC ACID (PLA) 13 | Page." 6(2): 13–23.
- [27] Wahyudi, Tri Cahyo, Eko Nugroho, Eko Budiyo, and M. Farikil Maktum. 2021. "Kaji Eksperimen Pengaruh Variasi Temperatur Pemanasan Dan Media Pendingin Pada Proses Quenching Terhadap Perubahan Kekerasan Sprocket Gear Sepeda Motor Non Original." Teknika Sains : Jurnal Ilmu Teknik 6(1): 17–23. doi:10.24967/teksis.v6i1.1232.
- [28] Zhang, Y., Liu, H., Wang, X., & Chen, J. (2024). Control of porosity in polymer additive manufacturing: Effects of thermal processing conditions. Composites Part B: Engineering, 275, 111356.