

Penggunaan Teknologi 3D Printing dalam Pembuatan Clamp CNC untuk Mendukung Praktikum CNC

Rizky Wirantara

Program Studi Teknik Mesin, Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang Km.14,5 kab. Sleman, Yogyakarta 55584

email: 191002108@uii.ac.id

Abstract

CNC practicum activities in the Manufacturing Systems Laboratory require reliable clamping devices to ensure workpiece stability during machining processes. Conventional aluminum clamps present limitations in terms of weight, production cost, and maintenance. This study aims to design and evaluate the performance of a CNC clamp made from polylactic acid (PLA) using 3D printing technology. The research stages include three-dimensional modeling, slicing, printing with variations in infill density and nozzle temperature, mechanical testing through static loading, and economic analysis. The results indicate that a PLA clamp with 80% infill density can withstand a static load of up to 65 kg, meeting the requirements for light machining operations on wood and acrylic materials. Cost analysis demonstrates an efficiency improvement of up to 85% compared to conventional aluminum clamps. Therefore, the PLA-based clamp has strong potential as a lightweight, economical, and practical alternative to enhance the effectiveness of CNC practicum activities.

Keywords: 3D printing, CNC clamp, PLA, infill density, practicum.

1. Pendahuluan

Perkembangan teknologi manufaktur telah membawa dampak besar pada cara kita memproduksi dan menggunakan alat-alat di industri [1-2]. Salah satu inovasi terbesar dalam beberapa tahun terakhir adalah penggunaan teknologi Computer Numerical Control (CNC) untuk mempermudah dan meningkatkan presisi dalam proses pemesinan. Mesin CNC digunakan dalam berbagai industri, khususnya dalam bidang teknik mesin, untuk memotong, membentuk, dan memfabrikasi material dengan tingkat akurasi yang tinggi [3-5]. Menurut Groover (2020), teknologi CNC telah menjadi tulang punggung industri manufaktur modern karena kemampuannya dalam menghasilkan produk dengan toleransi yang sangat ketat dan konsistensi yang tinggi.

Dalam praktikum di Laboratorium Sistem Manufaktur Program Studi Teknik Mesin Universitas Islam Indonesia, mahasiswa tidak hanya mempelajari teori tentang CNC, tetapi juga dilatih langsung dalam penggunaan mesin CNC untuk mengerjakan berbagai jenis material [6-7]. Hal ini sejalan dengan kurikulum pendidikan teknik mesin yang menekankan pada keseimbangan antara teori dan praktik [8]. Kegiatan praktikum ini bertujuan untuk membekali mahasiswa dengan keterampilan teknis yang dibutuhkan di dunia industri.

Salah satu komponen penting dalam pemanfaatan mesin CNC adalah clamp CNC, yang digunakan untuk menjaga material tetap stabil dan terpasang dengan kuat pada meja kerja selama proses pemesinan. Clamp CNC berfungsi untuk mencegah material bergoyang, bergeser, atau bergetar yang dapat memengaruhi kualitas hasil pemotongan atau pemesinan. Menurut Rochim (2019), sistem penjepitan yang baik merupakan faktor kritis dalam keberhasilan proses pemesinan karena dapat mempengaruhi akurasi dimensi dan kualitas permukaan hasil pemotongan [5].

Pada umumnya yang dipakai di Laboratorium Sistem Manufaktur Program Studi Teknik Mesin Universitas Islam Indonesia, clamp CNC dibuat dari bahan aluminium karena sifatnya yang keras dan berat, memungkinkan clamp untuk

menahan material dengan kuat. Namun, penggunaan material aluminium ini memiliki beberapa kekurangan, seperti berat yang tinggi, harga yang mahal, serta potensi kerusakan yang sulit diperbaiki jika clamp tersebut rusak [9].

Dalam menghadapi tantangan ini, teknologi 3D printing menawarkan solusi yang inovatif dan efisien. Gibson et al. (2021) menjelaskan bahwa additive manufacturing atau 3D printing telah berkembang pesat dan kini mampu memproduksi komponen fungsional dengan kualitas yang memadai untuk berbagai aplikasi. Dengan 3D printing, clamp CNC dapat diproduksi menggunakan bahan plastik dengan sifat yang lebih ringan dan fleksibel. Selain itu, harga filamen plastik jauh lebih terjangkau dibandingkan dengan bahan aluminium [10-13]. Keunggulan lainnya adalah kemudahan dalam mencetak clamp CNC sesuai dengan ukuran dan desain yang dibutuhkan. Jika clamp mengalami kerusakan, proses pencetakan ulang dapat dilakukan dengan cepat tanpa harus membeli clamp baru [14-15].

Penerapan 3D printing dalam pembuatan clamp CNC ini tidak hanya memberikan keuntungan dari segi biaya dan fleksibilitas, tetapi juga berpotensi meningkatkan efisiensi dan efektivitas dalam praktikum CNC [11]. Oleh karena itu, ide untuk menggantikan clamp CNC berbahan aluminium dengan yang berbahan plastik hasil cetakan 3D menjadi solusi yang menarik untuk mendukung proses pembelajaran di Laboratorium Sistem Manufaktur Universitas Islam Indonesia.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini difokuskan pada pengembangan clamp CNC berbahan polylactic acid (PLA) yang diproduksi menggunakan teknologi 3D printing. Penelitian ini bertujuan untuk merancang desain clamp CNC berbahan plastik yang optimal guna mendukung kegiatan praktikum CNC di Laboratorium Sistem Manufaktur Program Studi Teknik Mesin. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk menilai pengaruh penggunaan clamp plastik terhadap aspek keamanan pengguna serta perlindungan komponen mesin CNC selama proses pemesinan berlangsung. Lebih lanjut, penelitian ini mengkaji potensi efisiensi dan penghematan biaya yang dapat dicapai melalui pemanfaatan clamp berbahan PLA dibandingkan dengan clamp konvensional, sehingga dapat diperoleh alternatif solusi yang lebih ekonomis, ringan, dan aplikatif dalam mendukung kegiatan pembelajaran praktikum manufaktur.

2. Material dan Metodologi

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Sistem Manufaktur dan Laboratorium Material Program Studi Teknik Mesin Universitas Islam Indonesia pada bulan 1 Maret 2025 hingga Januari 2026. Metode yang digunakan adalah eksperimen langsung dengan pendekatan deskriptif kuantitatif.

2.1. Alat dan Bahan

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini meliputi:

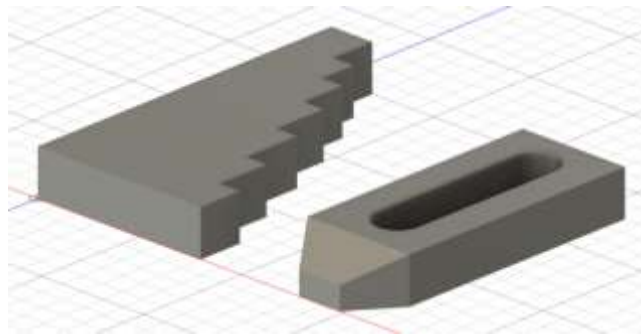
1. Printer 3D (Adventure 3) dengan spesifikasi:
 - Teknologi: FDM (Fused Deposition Modeling)
 - Area cetak: 150 x 150 x 170 mm
 - Diameter nozzle: 0,4 mm
 - Ketebalan lapisan: 0,1-0,4 mm
2. Laptop dengan software:
 - Fusion 360 untuk desain 3D
 - Ultimaker Cura 5.0 untuk proses slicing
3. Jangka sorong digital (ketelitian 0,01 mm) untuk pengukuran dimensi
4. Timbangan digital (kapasitas 500 gram, ketelitian 0,1 gram)
5. Alat uji tekan sederhana (press hidrolik manual kapasitas 2 ton)
6. Mesin CNC Router (untuk uji aplikasi)

Bahan-bahan yang digunakan:

1. Filamen PLA (Poly Lactic Acid) diameter 1,75 mm merek "XYZ Filament" dengan warna hitam
2. Baut dan mur baja M8 panjang 50 mm
3. Benda kerja kayu (kayu jati ukuran 100 x 100 x 10 mm)
4. Benda kerja Akrilik (resin ukuran 100 x 100 x 5 mm)

2.2 Desain dan Parameter

Desain clamp dibuat menggunakan software Fusion 360, mengadopsi bentuk standar strap clamp dengan dimensi panjang 100 mm, lebar 25 mm, dan tinggi 25 mm. Desain ini dipilih karena merupakan bentuk yang paling umum digunakan dalam praktikum CNC. File desain kemudian diekspor dalam format `.stl` untuk diproses lebih lanjut.



Gambar 1. Desain 3D Clamp CNC Tampak Isometrik

Proses slicing dilakukan dengan variasi parameter untuk mengetahui pengaruhnya terhadap kekuatan:

1. Variasi Suhu Nozzle: 200°C, 210°C, 220°C (dengan infill tetap 50%).
2. Variasi Infill Density: 20%, 50%, 80% (dengan suhu tetap 210°C).

Parameter tetap lainnya:

- Layer height: 0,2 mm
- Print speed: 50 mm/s
- Bed temperature: 60°C
- Jumlah shell: 3 lapis
- Top/bottom layers: 4 lapis

Pemilihan parameter ini didasarkan pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Santoso (2022) yang menunjukkan bahwa variasi suhu dan infill memiliki pengaruh signifikan terhadap sifat mekanik hasil cetakan 3D.

2.3 Prosedur Pengujian

1. Pembuatan Spesimen

Mencetak clamp sesuai variasi parameter. Setiap variasi dibuat 3 sampel untuk mendapatkan data rata-rata. Selama proses pencetakan, dilakukan pencatatan waktu cetak dan pengamatan visual terhadap kualitas hasil cetakan.

2. Uji Pembebanan Statis

Clamp dipasang pada meja uji dengan posisi horizontal. Beban diberikan secara bertahap pada bagian tengah clamp hingga terjadi deformasi permanen atau patah. Pengujian ini mengacu pada standar ASTM D638 untuk pengujian mekanik material plastik. Beban maksimum yang mampu ditahan dicatat sebagai indikator kekuatan clamp.

3. Uji Aplikasi Praktikum

Clamp dengan parameter terbaik dipasang pada mesin CNC Router untuk melakukan pemakanan ringan pada kayu dan aluminium. Parameter pemesinan yang digunakan:

- Kecepatan spindel: 10.000 rpm
- Kedalaman potong: 0,5 mm
- Kecepatan pemakanan: 500 mm/menit

Observasi dilakukan terhadap getaran, kestabilan benda kerja, dan kualitas permukaan hasil pemotongan.

2.4 Analisis Biaya

Menghitung biaya material dan listrik untuk 1 buah clamp PLA, lalu dibandingkan dengan harga pasar clamp baja standar. Perhitungan biaya meliputi:

- Biaya material filamen (berdasarkan berat clamp)
- Biaya listrik (berdasarkan daya printer dan waktu cetak)
- Biaya penyusutan printer (diestimasi)

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Hasil Desain dan Manufaktur

Proses desain menghasilkan model 3D clamp yang siap cetak seperti pada Gambar 2. Bentuk ini mengadopsi desain clamp konvensional yang umum digunakan di laboratorium.



Gambar 2. Clamp Aluminium (kiri) dan Hasil Cetak dengan 3D Printing (kanan)

Proses pencetakan dengan parameter berbeda menghasilkan clamp dengan kualitas visual yang bervariasi.. Pada suhu 200°C, ditemukan sedikit lapisan yang kurang merekat (under extrusion), yang ditandai dengan adanya celah antar lapisan. Hal ini disebabkan oleh viskositas filamen yang terlalu tinggi pada suhu rendah, sehingga aliran material tidak optimal [7]. Pada suhu 220°C, muncul sedikit stringing (benang-benang halus) pada permukaan clamp. Fenomena ini terjadi karena material terlalu encer dan menetes keluar nozzle saat pergerakan non-printing [2]. Parameter terbaik secara visual adalah pada suhu 210°C, di mana lapisan tercetak rapi tanpa cacat yang signifikan.

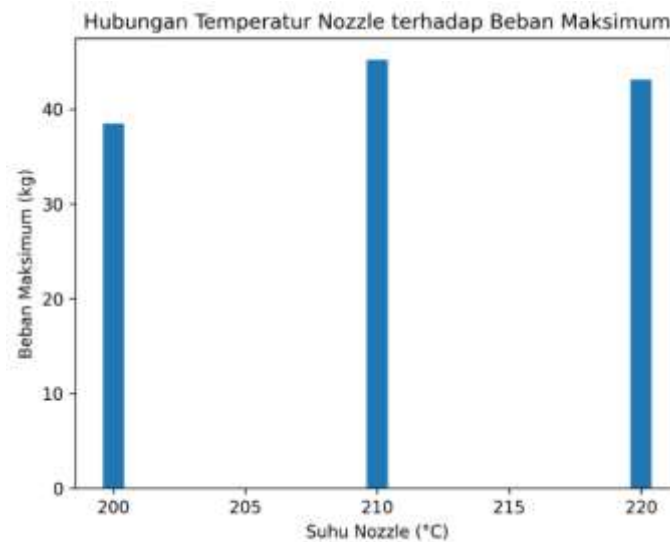
3.2 Pengaruh Temperatur Nozzle terhadap Kekuatan Clamp

Hasil uji pembebanan pada variasi suhu nozzle disajikan pada Tabel 1 dan Gambar 3.

Tabel 1. Data Uji Pembebanan terhadap Variasi Suhu Nozzle (Infill 50%)

Suhu Nozzle (°C)	Sampel 1 (kg)	Sampel 2 (kg)	Sampel 3 (kg)	Beban Maksimum Rata-rata (kg)	Berat Clamp (gram)	Waktu Cetak (menit)
200	37,2	39,1	39,2	38,5	32	65
210	44,8	45,3	45,5	45,2	32	65
220	42,5	43,2	43,6	43,1	32	65

Dari Tabel 1, terlihat bahwa variasi suhu nozzle memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kemampuan clamp dalam menahan beban. Pada suhu 200°C, beban maksimum rata-rata hanya mencapai 38,5 kg. Hal ini disebabkan oleh ikatan antar lapisan yang kurang sempurna akibat temperatur yang terlalu rendah. Gambar 3 dibawah ini adalah hubungan antara temperatur nozzle terhadap beban maksimum



Gambar 3. Grafik Hubungan Temperatur Nozzle terhadap Beban Maksimum

Suhu 210°C menghasilkan beban maksimum tertinggi yaitu 45,2 kg. Pada temperatur ini, filamen PLA mencapai viskositas optimal sehingga dapat mengalir dengan baik dan membentuk ikatan antar lapisan yang kuat. Menurut penelitian Utama (2021), suhu 210°C merupakan titik optimal untuk filamen PLA karena mendekati temperatur transisi gelas material. Pada suhu 220°C, terjadi penurunan kekuatan menjadi 43,1 kg. Penurunan ini disebabkan oleh degradasi termal material yang mulai terjadi pada suhu di atas 215°C. Degradasi termal dapat menyebabkan rantai polimer putus dan mengurangi sifat mekanik material [1].

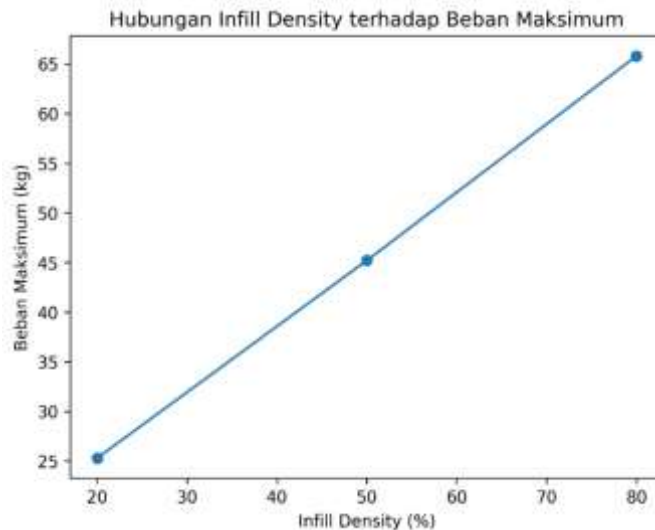
3.3 Pengaruh Infill Density terhadap Kekuatan Clamp

Hasil uji pembebanan pada variasi infill density disajikan pada Tabel 2 dan Grafik 2.

Tabel 2. Data Uji Pembebanan terhadap Variasi Infill Density (Suhu 210°C)

Infill Density (%)	Sampel 1 (kg)	Sampel 2 (kg)	Sampel 3 (kg)	Beban Maksimum Rata-rata (kg)	Berat Clamp (gram)	Waktu Cetak (menit)
20	24,5	25,8	25,6	25,3	22	45
50	44,8	45,3	45,5	45,2	32	65
80	65,2	66,1	66,1	65,8	41	90

Hasil pengujian menunjukkan korelasi positif yang kuat antara kepadatan infill dengan kekuatan clamp. Semakin tinggi persentase infill, semakin banyak material di dalam struktur, sehingga kemampuan menahan beban meningkat signifikan. Bisa dilihat pada gambar 4 dibawah ini yang menunjukkan grafik hubungan infill density terhadap beban maksimum.



Gambar 4. Grafik Hubungan Infill Density terhadap Beban Maksimum

Clamp dengan infill 20% hanya mampu menahan beban rata-rata 25,3 kg. Struktur internal yang jarang menyebabkan konsentrasi tegangan pada area tertentu, sehingga clamp lebih cepat mengalami deformasi plastis. Hal ini sesuai dengan penelitian Prasetyo (2023) yang menemukan bahwa infill rendah menghasilkan komponen dengan kekuatan mekanik yang terbatas.

Clamp dengan infill 50% menunjukkan peningkatan kekuatan yang signifikan menjadi 45,2 kg. Peningkatan ini mencapai 78,7% dibandingkan infill 20%. Struktur internal yang lebih rapat mampu mendistribusikan beban secara lebih merata. Clamp dengan infill 80% mampu menahan beban hingga 65,8 kg, yang merupakan peningkatan 160% dibandingkan infill 20% dan 45,6% dibandingkan infill 50%. Hal ini membuktikan bahwa untuk aplikasi yang

membutuhkan kekuatan, infill tinggi sangat direkomendasikan. Namun, perlu dipertimbangkan trade-off antara kekuatan dengan waktu cetak dan konsumsi material.

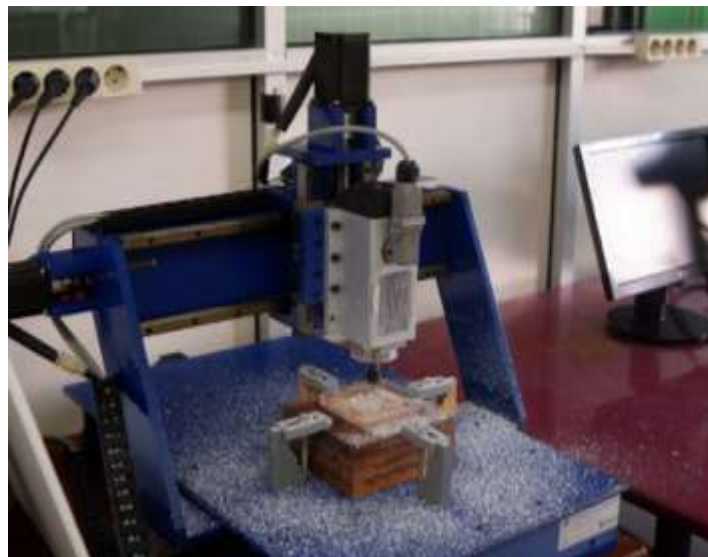
3.4 Uji Keamanan dan Aplikasi pada Praktikum CNC

Clamp dengan parameter terbaik (suhu 210°C, infill 80%) dipilih untuk uji aplikasi pada mesin CNC Router. Saat digunakan untuk memegang material kayu dan aluminium dengan pemakanan ringan (0,5 mm), clamp terbukti mampu menahan benda kerja dengan stabil. Tidak terjadi getaran berlebihan yang membahayakan proses pemotongan.

Tabel 3. Hasil Observasi Uji Aplikasi pada Mesin CNC

Material Benda Kerja	Parameter Pemesinan	Kestabilan Clamp	Kualitas Permukaan Hasil	Catatan
Kayu Jati	Kecepatan: 300 mm/menit	Stabil	Baik, tidak ada getaran	Clamp mampu menahan dengan baik
Akrilik	Kecepatan: 300 mm/menit	Stabil	Cukup baik	Tidak ada pergeseran benda kerja

Dari segi keamanan, bobot clamp PLA yang ringan (36 gram) sangat kontras dengan aluminium (112 gram). Jika terlepas atau terjatuh saat pergantian benda kerja, risiko kerusakan pada meja mesin atau cedera pada pengguna jauh lebih kecil. Hal ini menjawab tujuan penelitian mengenai aspek keamanan, di mana clamp plastik secara signifikan mengurangi potensi bahaya.



Gambar 5. Aplikasi Clamp PLA (warna abu-abu) pada Mesin CNC Router

Selain itu, sifat plastik yang lebih lunak dibandingkan baja juga memberikan keuntungan dalam hal tidak merusak permukaan benda kerja yang dijepit. Pada clamp baja, tekanan tinggi dapat meninggalkan bekas pada benda

kerja lunak seperti kayu atau aluminium. Clamp PLA dengan elastisitasnya mampu mendistribusikan tekanan secara lebih merata sehingga meminimalkan kerusakan permukaan.

3.5 Analisis Biaya (Kajian Potensi Penghematan)

Analisis biaya produksi clamp PLA dengan infill 80% adalah sebagai berikut:

Tabel 4. Rincian Biaya Produksi Clamp PLA

Komponen Biaya	Perhitungan	Biaya (Rp)
Biaya Material Filamen (Harga filamen 300.000/kg)	Berat clamp 36 gram x Rp 300/gram	10.800
Biaya Listrik	Daya printer 250W x 1,5 jam = 0,375 kWh x Rp 1.500/kWh	563
Biaya Penyusutan Printer	Estimasi Rp 500/jam x 1,5 jam	750
Biaya Tenaga Kerja	Diabaikan (praktikum)	0
Total Biaya Produksi per Unit		12.113

Harga pasar clamp satu set clamp dengan baut Rp 800.000 dengan isi 4 pasang clamp maka harganya adalah Rp 200.000 per unit. Dengan demikian, terjadi penghematan sebesar:

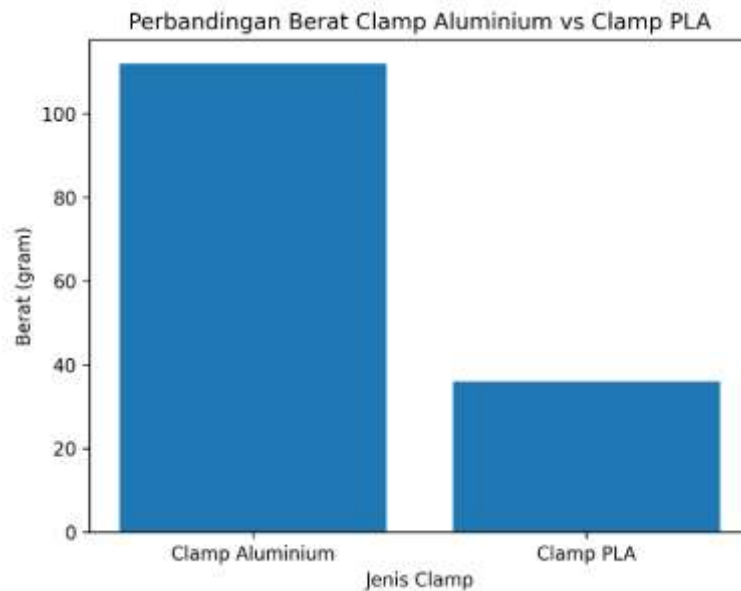
Penghematan = Harga Aluminium - Harga PLA

Penghematan = Rp 200.000 - Rp 12.113 = Rp 187.887 per unit



Gambar 6. Grafik Perbandingan Biaya Clamp Baja vs Clamp PLA

Jika laboratorium membutuhkan 20 pasang clamp untuk kegiatan praktikum, maka total penghematan yang dapat dicapai adalah: Total penghematan = Rp 187.887 × 20 = Rp 3.757.740. Adapun perbandingan berat (gram) antara clamp aluminium dan clamp PLA bisa dilihat pada gambar 4 dibawah ini



Gambar 7. Grafik Perbandingan Berat Clamp Baja vs Clamp PLA

Data pada Gambar 6 dan 7 menunjukkan bahwa penggunaan clamp PLA tidak hanya jauh lebih ekonomis (hemat biaya hingga 93,94 % dari harga Aluminium), tetapi juga sangat ringan (berkurang 86% dari berat Aluminium). Penghematan ini sangat signifikan jika laboratorium membutuhkan puluhan clamp untuk kegiatan praktikum.

3.5.1 Analisis Keandalan untuk Praktikum

Berdasarkan hasil pengujian, clamp PLA dengan infill 80% mampu menahan beban hingga 65 kg. Untuk aplikasi praktikum CNC dengan material kayu atau akrilik, gaya potong yang terjadi umumnya tidak melebihi 20-30 kg (Rochim, 2019). Dengan demikian, clamp PLA memiliki faktor keamanan sekitar 2-3 kali lipat dari kebutuhan aktual.

Namun demikian, perlu diperhatikan bahwa clamp PLA memiliki keterbatasan dalam hal ketahanan terhadap suhu tinggi. Material PLA mulai melunak pada suhu di atas 60°C (Gibson et al., 2021). Oleh karena itu, penggunaan clamp PLA tidak disarankan untuk proses pemesinan dengan kecepatan tinggi yang menghasilkan panas berlebihan atau dengan penggunaan cairan pendingin yang panas.

4. Kesimpulan

Desain clamp CNC berbahan plastik (PLA) berhasil dirancang dan diproduksi menggunakan teknologi 3D printing. Parameter optimal untuk mencetak clamp yang kuat adalah pada suhu nozzle 210°C dengan kepadatan infill 80%. Kombinasi parameter ini menghasilkan clamp dengan kekuatan maksimum 65,8 kg dan kualitas permukaan yang baik. Penggunaan clamp plastik terbukti lebih aman bagi pengguna dan mesin CNC karena bobotnya yang ringan (36 gram) sehingga meminimalisir risiko kerusakan akibat benturan atau jatuh. Dalam uji aplikasi pemakanan ringan pada kayu dan aluminium, clamp mampu memberikan kestabilan yang memadai dan tidak meninggalkan bekas pada benda kerja. Terdapat potensi penghematan biaya yang sangat besar. Biaya produksi sebuah clamp PLA hanya sekitar Rp 12.113, jauh lebih murah dibandingkan harga clamp baja konvensional yang mencapai Rp 200.000, sehingga menghemat anggaran hingga 93,94 %. Untuk kebutuhan 20 unit clamp, penghematan mencapai Rp 3.757.740.

5. Saran

Untuk pengembangan lebih lanjut, disarankan dilakukan pengujian menggunakan material filamen yang memiliki kekuatan lebih tinggi, seperti PETG atau Nylon, guna memperluas kemungkinan penggunaan pada pemesinan yang lebih berat, mengingat PETG memiliki ketahanan suhu yang lebih baik dibandingkan PLA. Selain itu, desain clamp dapat dioptimalkan dengan penambahan rusuk penguat (ribs) pada area yang mengalami tegangan tinggi agar kekuatan meningkat tanpa penambahan berat dan waktu cetak yang signifikan. Pengujian ketahanan aus akibat penggunaan berulang juga perlu dilakukan untuk mengetahui umur pakai serta interval penggantian yang ideal. Untuk implementasi di laboratorium, diperlukan panduan penggunaan yang jelas mengenai batasan beban, jenis material yang dapat dijepit, serta prosedur perawatan dan penyimpanan yang tepat guna menjamin keamanan dan keandalan penggunaan clamp PLA.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Program Studi Teknik Mesin Universitas Islam Indonesia yang telah memberikan bantuan melalui program hibah penelitian laboran pada tahun 2025.

Daftar Pustaka

- [1] Callister WD, Rethwisch DG. *Materials science and engineering: an introduction*. 10th ed. New York: John Wiley & Sons; 2018.
- [2] Gibson I, Rosen D, Stucker B, Khorasani M. *Additive manufacturing technologies*. 3rd ed. Cham: Springer; 2021.
- [3] Groover MP. *Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems*. 7th ed. New York: John Wiley & Sons; 2020.
- [4] Prasetyo A. Studi eksperimen kekakuan clamp pada mesin CNC milling. In: *Prosiding Seminar Nasional Teknik Mesin*; 2023. p. 112-120.
- [5] Rochim T. *Teori dan teknologi proses pemesinan*. Bandung: Institut Teknologi Bandung Press; 2019.
- [6] Santoso B. Optimasi parameter 3D printing terhadap kekuatan tarik material PLA. *J Tek Mesin Indones*. 2022;15(2):45-52.
- [7] Smith J. *Additive manufacturing for engineering applications*. New York: Springer; 2020.
- [8] Sudarman. Evaluasi kurikulum praktikum manufaktur di era industri 4.0. *J Pendidik Vokasi*. 2021;11(3):234-245.
- [9] Utama D. *Analisis biaya manufaktur untuk produk rapid prototyping*. Yogyakarta: UII Press; 2021.
- [10] Ultimaker. Cura settings explanation [Internet]. 2023 [cited 2023 Oct 10]. Available from: <https://support.ultimaker.com/>
- [11] Muzli MF, Ismail KI, Yap TC. Effects of infill density and printing speed on the tensile behaviour of fused deposition modelling 3D printed PLA specimens. *J Eng Technol Appl Phys*. 2024;6(1).
- [12] Mehdi MK, Owed B. The influence of infill density and speed of printing on the tensile properties of three dimension printing PLA parts. *J Eng Sustain Dev*. 2023;27(3).
- [13] Lim T, Cheng H, Jung WS. A study on the mechanical properties of 3D printed PLA specimens according to infilled pattern and printing direction. *Key Eng Mater*. 2021;904:255–260.
- [14] Akçay Ö, Arı A. Effect of infill density and infill pattern on mechanical properties of 3D-printed PLA produced by fused filament fabrication. *Firat Univ J Eng Sci*. 2025;37(1).
- [15] Abbas TF, Othman FM, Ali HB. Investigation and analysis of infill density on impact property of PLA in 3D printing. *Int J Res Sci Manag*. 2018;5(9):15–19.