

Studi Awal Kekuatan Produk Hasil 3D-Printing Menggunakan Teknik *Conformal Printing*

Christiand ^{a*}, Gallentio Christanto Gunarso ^a, Adrian Sutjiadi ^a, Yosua Setiawan ^a,
Ferry Rippun Gideon Manalu ^b

^aProgram Studi Teknik Mesin, Fakultas Biosains Teknologi dan Inovasi,
Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya

^bProgram Studi Teknik Elektro, Fakultas Biosains Teknologi dan Inovasi,
Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya
Kampus III BSD Atma Jaya, Tangerang, Banten, Indonesia

*E-mail: christiand@atmajaya.ac.id

Abstract

The conformal printing technique in 3D printing optimizes the orientation of material layers so that they remain perpendicular to the surface being printed. This technique enables the layer orientation to continuously follow the contour and geometry of the printed object's surface. Compared to conventional techniques, conformal printing has the potential to create products with more uniform strength and structural integrity under the loads applied from various directions. However, further in-depth studies are still required to fully understand the mechanical strength of 3D-printed objects produced using the conformal printing technique when subjected to multi-directional loading. In this study, the conformal printing approach was implemented using a conventional 3D printer, but with a layering strategy that adheres to the principles of conformal printing. This was achieved by using a concentric pattern in the layering process. Experimental results showed that specimens with the concentric pattern exhibited superior compressive strength compared to specimens with the rectilinear pattern, which is commonly used in conventional layering techniques. The maximum compressive load sustained by the concentric-pattern specimen was 430.78 N higher than that of the rectilinear-pattern specimen.

Keywords: 3D printing, conformal printing, compressive test, 3D printer 5-axis, layering

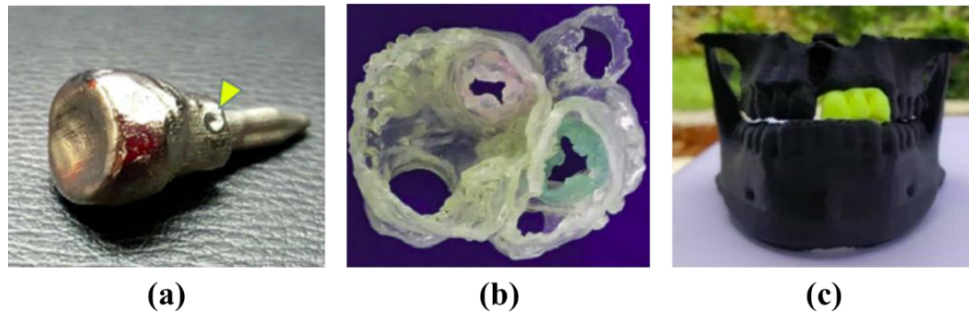
Abstrak

Teknik *conformal printing* pada proses 3D-printing mengoptimalkan arah lapisan material agar selalu tegak lurus terhadap permukaan yang sedang dicetak. Teknik *conformal printing* memungkinkan orientasi *layer* (lapisan material) selalu mengikuti bentuk dan geometri permukaan objek yang dicetak. Dibandingkan dengan teknik konvensional, teknik *conformal printing* berpotensi menghasilkan kekuatan dan integritas produk yang lebih seragam terhadap beban dari berbagai arah. Walaupun demikian, studi mendalam terkait kekuatan hasil cetak 3D printer dengan teknik *conformal printing* terhadap pembebanan dari berbagai arah masih perlu terus dilakukan. Pada penelitian ini, teknik *conformal printing* dilakukan dengan menggunakan mesin 3D-printer konvensional namun dengan strategi *layering* yang mengikuti prinsip-prinsip teknik *conformal printing*. Hal tersebut dilakukan dengan menggunakan pola *concentric* pada proses *layering*. Dari hasil eksperimen diketahui bahwa spesimen dengan pola *concentric* mampu menahan beban tekan lebih baik daripada spesimen dengan pola *rectilinear* yang digunakan oleh teknik konvensional pada proses *layering*. Beban tekan maksimum yang mampu ditahan oleh spesimen dengan pola *concentric* lebih tinggi 430.78 N daripada beban tekan maksimum oleh spesimen dengan pola *rectilinear*.

Kata kunci: 3D printing, conformal printing, uji tekan, 3D printer 5-axis, layering

1. Pendahuluan

Teknologi 3D printing (3DP) telah mengalami perkembangan pesat dan menjadi salah satu metode dalam kategori *additive manufacturing* (AM) yang paling menonjol dalam dekade terakhir. Teknologi ini banyak ditujukan untuk keperluan *rapid prototyping* maupun pembuatan produk-produk secara cepat dan efisien [1]. Salah satu keunggulan utama dari 3DP adalah mudah digunakan oleh berbagai level pengguna, termasuk level pengguna rumahan [2]. Hal tersebut menjadikan 3DP sebagai teknologi yang inklusif dan ekonomis. Material yang digunakan dalam proses 3DP juga dapat diperoleh dengan mudah di pasaran, relatif berbiaya rendah, dan tersedia dalam beberapa jenis material. 3DP menjadi solusi manufaktur yang fleksibel dan adaptif untuk berbagai bidang aplikasi [3]. Secara khusus pada bidang medis, adalah implan gigi, implan tulang, dan implan medis lainnya yang memerlukan desain yang disesuaikan dengan kebutuhan fisik setiap individu [4][5].



Gambar 1. Produk-produk medis inovatif dengan teknik 3DP [7][8][9].

Teknik 3DP konvensional dilakukan dengan cara membuat tumpukan lapisan material dalam orientasi vertikal. Produk 3DP dengan orientasi vertikal memiliki anisotropi struktural sehingga cenderung memiliki kekuatan yang kurang pada arah horizontal, yaitu searah dengan susunan antar lapisan (*inter-layer bonding*) [6]. Fenomena ini menjadi kendala mendasar dalam teknik 3DP konvensional untuk menghasilkan komponen dengan integritas struktural yang seragam dan tahan terhadap pembebanan berbagai arah.

Teknik *conformal printing* (CP) memiliki potensial untuk mengatasi keterbatasan teknik 3DP konvensional dalam menghasilkan produk dengan integritas struktural yang seragam. Proses pencetakan lapisan (*layering*) pada teknik CP dilakukan dengan mengikuti kontur permukaan objek (*freeform surface*) sehingga orientasi lapisan material yang dihasilkan lebih sesuai terhadap pembebanan eksternal dari berbagai arah. Implementasi teknik CP umumnya dilakukan dengan mesin 3DP 5-axis yang mampu melakukan pencetakan suatu titik dengan arah tertentu.

Studi awal kekuatan produk 3DP dengan arah *layer* sesuai prinsip teknik CP perlu dilakukan untuk memahami dan membuktikan sejauh orientasi *layer* berpengaruh terhadap kekuatan struktural produk. Studi karakterisasi ini harus mencakup analisis terhadap parameter kritikal seperti arah pelapisan (*layering orientation*) dan besar gaya pembebanan.

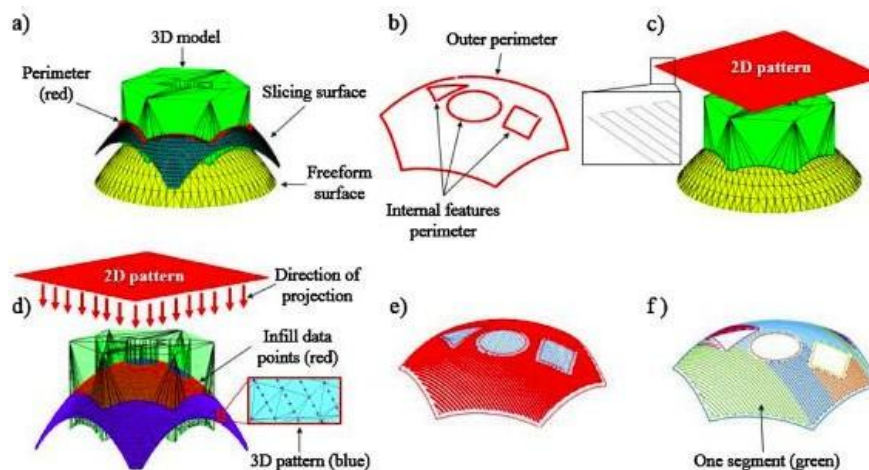
Karakterisasi menyeluruh diperlukan untuk membangun pemodelan hubungan antara konfigurasi proses cetak dengan performa mekanik produk, sebagai dasar dalam pengembangan strategi pencetakan adaptif berbasis geometri permukaan.

Penelitian ini dilakukan untuk melakukan karakterisasi terhadap produk 3DP dengan teknik CP yang dibandingkan dengan teknik konvensional. Teknik CP yang dilakukan pada penelitian ini masih menggunakan mesin 3DP konvensional namun dengan strategi perencanaan orientasi *layer* yang sesuai dengan prinsip CP. Uji kekuatan dilakukan tegak lurus terhadap permukaan berkontur untuk produk CP dan arah vertikal untuk produk konvensional.

2. Teknologi 3D Printing dan Conformal Printing

2.1 Teknologi 3D Printing

Teknologi 3D *printing* (3DP) merupakan teknologi baru dalam bidang manufaktur yang merevolusi teknik fabrikasi pada skala kecil-menengah, terutama untuk bidang rapid prototyping. Teknologi 3DP memiliki keunggulan dalam hal kemudahan proses fabrikasi dan secara khusus mampu mewujudkan personalisasi terhadap produk yang dicetak [7]. Teknologi 3DP mampu mencetak berbagai produk inovatif dengan tingkat presisi tinggi. Dalam hal personalisasi, teknologi 3DP membantu menghasilkan produk implan medis yang membutuhkan penyesuaian terhadap kebutuhan anatomi tubuh pasien secara personal (gambar 1). Aspek personalisasi tersebut sulit didapatkan dengan metode fabrikasi



Gambar 2. Algoritma *conformal slicing* [10].

konvensional lainnya, seperti plastic injection maupun pemessinan logam lainnya. Personalisasi pada teknik fabrikasi implan medis mampu mengurangi risiko ketidaksesuaian terhadap tubuh pasien yang pada akhirnya membantu tindakan medis yang sudah direncanakan.

2.2 Conformal Printing

Metode *conformal printing* (CP) berbeda dengan metode pencetakan konvensional 3DP yang selalu bergerak pada arah vertikal dari *layer* ke *layer*. Teknik CP merupakan metode 3DP dimana arah gerak pencetakan benda mengikuti bentuk permukaan benda [10][11]. Teknik CP mampu meminimalkan kelemahan yang biasanya terjadi pada area pertemuan antar *layer* dalam pencetakan konvensional. Hal tersebut dicapai melalui perbaikan adhesi antar lapisan, pengurangan rongga internal, dan optimalisasi distribusi material. Selain itu, teknik CP memungkinkan pencetakan permukaan kompleks, seperti benda dengan lengkungan atau sudut tajam, tanpa mengorbankan kualitas hasil cetakan. Dengan demikian, benda hasil pencetakan dengan teknik CP memiliki kekuatan struktural yang lebih seragam pada berbagai arah. Dalam kaitannya dengan teknik CP, pengembangan mesin 3DP 5-axis membuka peluang juga dalam hal pengembangan algoritma dan simulasi *conformal slicing* (gambar 2) untuk menghasilkan proses pencetakan yang optimal dalam penggunaan material dengan hasil cacat yang minimal [10].

2.3 Kekuatan dan Integritas Produk Hasil 3D Printing

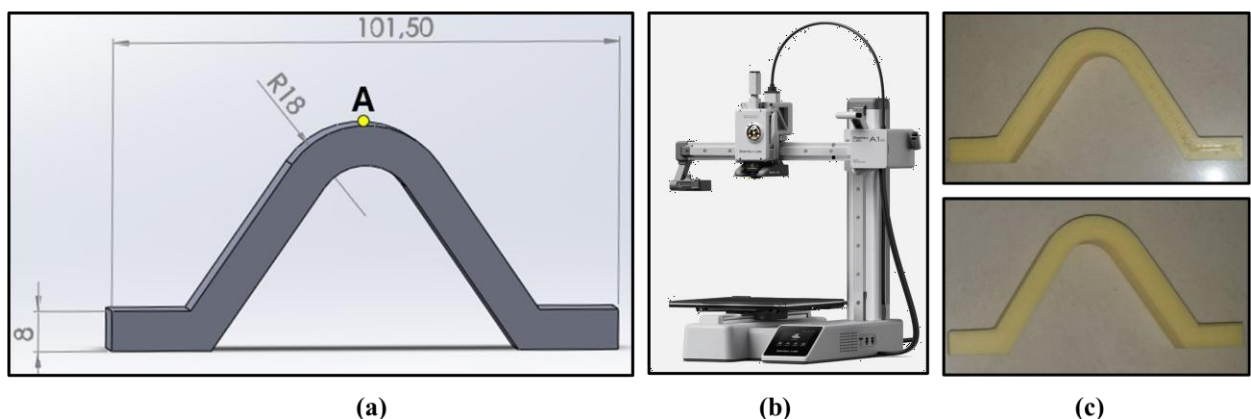
Layering pada mesin 3DP konvensional umumnya dilakukan pada arah vertikal. *Layering* yang konstan secara vertikal menghasilkan integritas dan kekuatan yang lemah jika produk hasil cetak 3DP diberikan beban pada arah horizontal [12]. Mohd Khairul Nizam dkk. melaporkan bahwa kekuatan tarik dan geser dari produk 3DP cenderung lebih rendah pada *layering* arah vertikal dikarenakan gaya adhesi antar *layer* tidak merata [13]. Pada akhirnya dapat disimpulkan bahwa kekuatan mekanik produk 3DP sangat bergantung pada orientasi *layer* dan distribusi tegangan antar *layer*. Ketika beban eksternal diberikan maka konsentrasi tegangan terpusat hanya pada area perbatasan antar *layer*. Pada umumnya, ikatan antar *layer* tidak optimal. Hal ini menyebabkan produk 3DP rentan mengalami kegagalan struktural akibat pembebanan dinamis atau statis. Oleh karena itu, metode konvensional dengan *layering* pada arah vertikal adalah kurang ideal untuk aplikasi yang membutuhkan kekuatan struktural tinggi untuk pembebanan multi-arah.

Beberapa parameter yang mempengaruhi kekuatan produk hasil 3DP adalah arah *layer*, lebar nozzle, area persinggungan *layer*, dan besarnya beban yang diaplikasikan. Parameter-parameter tersebut perlu dipelajari lebih lanjut untuk mendapatkan karakterisasi produk 3D *printer* secara umum. Studi terkait parameter-parameter tersebut menjadi penting karena merupakan sebuah persiapan untuk implementasi teknik *conformal printing* menggunakan mesin 3DP 5-axis. Teknik *conformal printing* inilah yang nantinya akan menjadi solusi untuk mendapatkan kekuatan produk 3DP yang seragam pada multi-arah. Teknik *conformal printing* dapat meningkatkan kekuatan adhesi pada area persinggungan antar *layer* sehingga mengurangi konsentrasi tegangan pada perbatasan *layer* produk 3DP [14]. Pada teknik *conformal printing*, kebutuhan *layering* dengan multi-orientasi hanya dapat dilakukan dengan mesin 3DP yang memiliki 5-axis. Oleh karena itu, parameter-parameter kekuatan produk 3DP perlu dioptimalkan untuk mendapatkan teknik *conformal* yang optimal.

3. Metode Penelitian

3.1 Perancangan Spesimen Uji

Desain spesimen uji kekuatan produk 3DP yang digunakan pada penelitian ini berbentuk segitiga dan dirancang menggunakan perangkat lunak CAD (*computer aided design*). Gambar 3.(a) menunjukkan desain spesimen uji pada perangkat lunak CAD. Titik beban tekan diaplikasikan pada titik tertinggi dari segitiga yang ditunjukkan oleh titik A pada gambar 3.(a).

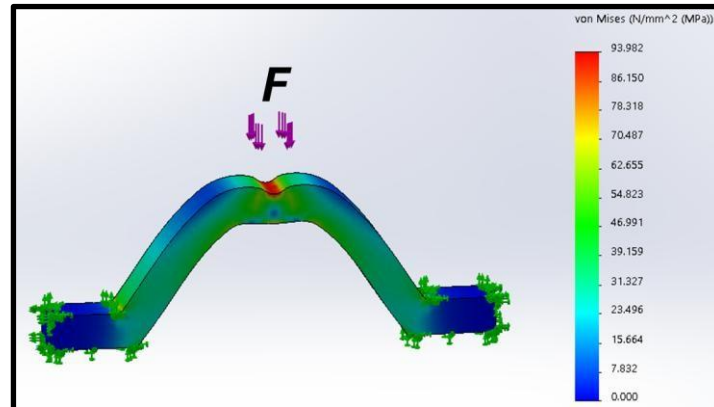


Gambar 3. (a) Desain spesimen uji, (b) mesin 3D printer, (c) spesimen uji hasil 3D printing.

3.2 Prediksi Kekuatan Spesimen Uji Menggunakan Perangkat Lunak FEM (*Finite Element Method*)

Simulasi dilakukan untuk memperkirakan kegagalan dan stress maksimal yang dapat terjadi pada spesimen. Untuk keperluan tersebut, sebuah modul FEM pada perangkat lunak CAD digunakan (gambar 4). Simulasi yang dilakukan mengukur stress yang terjadi ketika spesimen menerima beban tekan terpusat pada titik A pada gambar 3.(a). Beban tekan diasumsikan sebesar beban yang dapat diterima oleh material 3DP yang digunakan pada eksperimen. Berdasarkan informasi yang disediakan pabrik pembuat material 3DP, tensile strength (σ) dari material 3DP yang digunakan adalah 53.4 MPa untuk material berjenis PLA+. Luasan permukaan (A) tekan dari spesimen dihitung sebesar 80 mm^2 . Dengan demikian, asumsi gaya (F) maksimal yang disimulasikan dapat dihitung sesuai persamaan (1). Maka, gaya (F) maksimal terhitung sebesar 4272 N . Pada simulasi ini digunakan *standard mesh* dengan ukuran 2.36 mm .

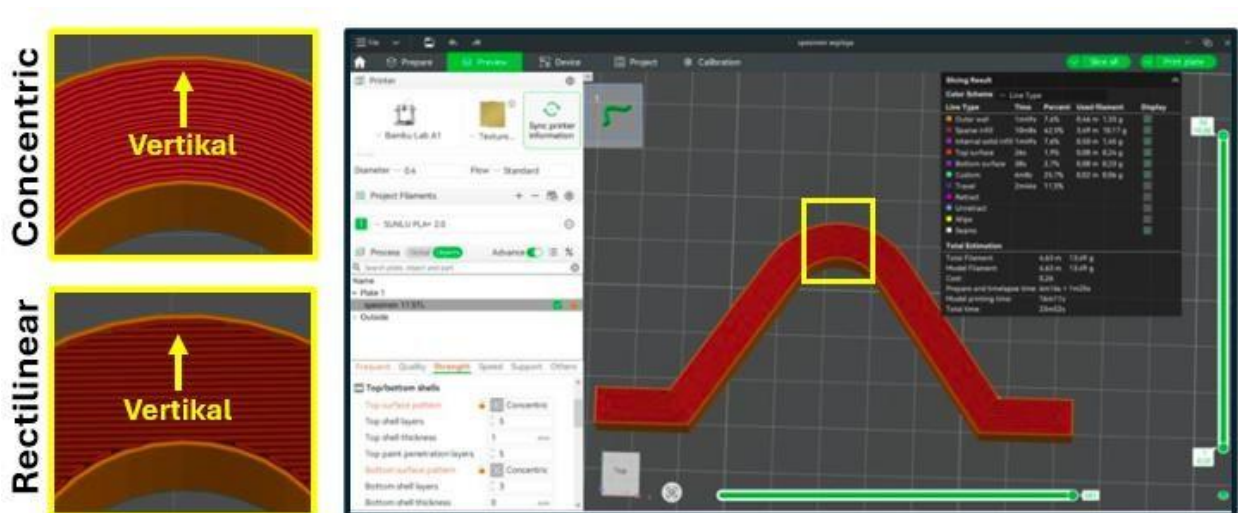
$$F = \sigma \cdot A \quad (1)$$



Gambar 4. Hasil simulasi kekuatan spesimen uji dengan perangkat lunak FEM.

3.3 Strategi Orientasi Pencetakan Lapisan Material (*Layering*) Menggunakan *Slicer*

Perencanaan proses pencetakan lapisan material dilakukan menggunakan sebuah perangkat lunak yang disebut slicer yang telah disediakan oleh pabrik pembuat mesin 3DP. Pada prinsipnya, slicer membuat jalur gerak *nozzle* dalam bentuk G-Code sehingga pada akhirnya lelehan filamen akibat gerak *nozzle* membentuk lapisan-lapisan material (*layer*) yang membentuk benda kerja secara keseluruhan. Dalam hal ini, benda kerja seperti dipotong-potong (*sliced*) secara digital berdasarkan bidang tertentu (gambar 5). Pada teknik konvensional dan menggunakan mesin 3DP 3-axis, bidang potong tersebut tegak lurus terhadap orientasi vertikal. Sedangkan pada teknik CP bidang potong tidak konstan dan bergantung dari algoritma yang digunakan. Secara mendasar, teknik CP menggunakan bidang potong yang tegak lurus terhadap titik pada permukaan benda yang menjadi target.



Gambar 5. Perencanaan *layering* pola *rectilinear* dan *concentric* dalam perangkat lunak *slicer*.

Perbedaan lapisan (*layer*) antara teknik konvensional dan teknik CP dapat dilihat dari arah *layer* yang dihasilkan dan dari G-Code yang memang dispesifikan untuk mesin 3DP 5-axis. Dengan strategi pola *layering* tertentu, orientasi *layer* untuk teknik CP dapat juga disimulasikan dengan slicer konvensional dan mesin 3DP 3-axis. Gambar 4 menunjukkan pendekatan *layering* untuk teknik CP dan membandingkannya dengan *layering* teknik konvensional. Pola *layer* untuk teknik konvensional menggunakan pola rectiliniar sedangkan untuk teknik CP menggunakan pola concentric.

3.4 Mesin 3D Printing dan Material Benda Uji

Mesin 3DP yang digunakan adalah mesin 3DP 3-axis buatan BambuLab dengan tipe A1 mini yang ditunjukkan oleh gambar 3.(b). Mesin ini memiliki volume cetak $180 \times 180 \times 180 \text{ mm}^3$ dengan suhu hot end maksimal hingga 300°C . Mesin ini mampu mencetak dengan kecepatan 50 cm/detik dan kecepatan dorong filamen sebesar $28 \text{ mm}^3/\text{s}$ untuk material berjenis ABS (acrylonitrile butadiene styrene). Proses pencetakan berlangsung dipantau melalui kamera yang tersedia dan dapat diakses melalui komunikasi nirkabel dan internet.

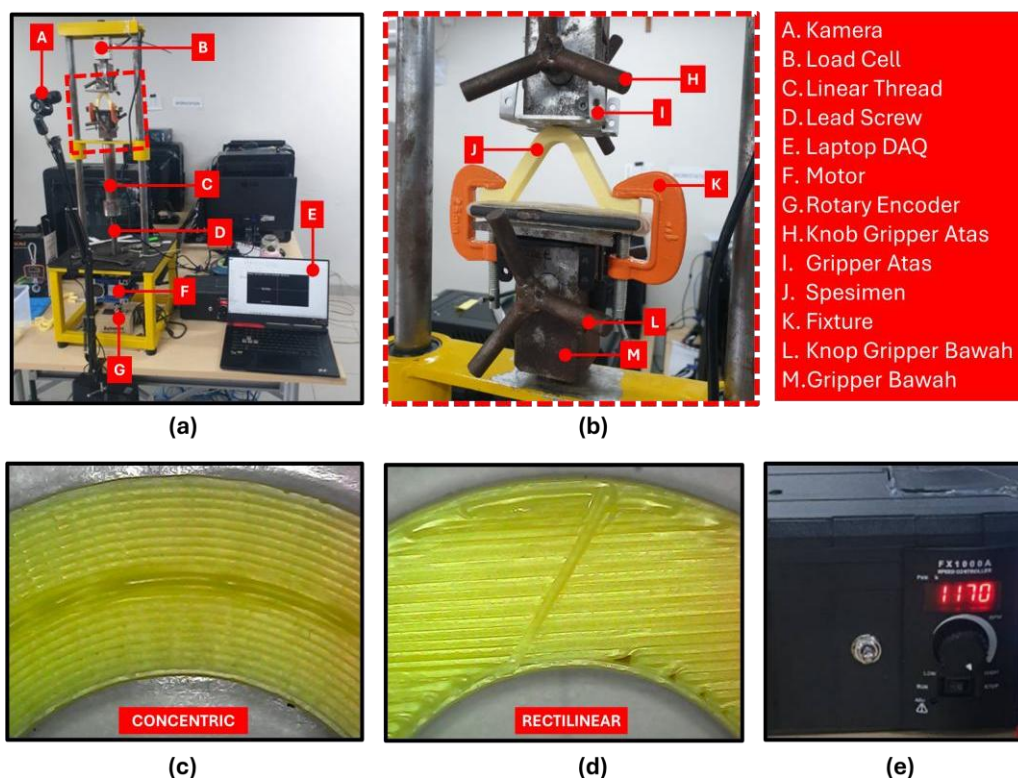
3.5 Alat Uji Tekan dan Pengaturan Eksperimen

Uji tekan yang dilakukan dengan tidak menggunakan standar tertentu. Material 3DP dapat dikatakan kategori material baru dan bukan logam sehingga masih belum memiliki standar pengujian tekan. Alat uji tekan yang digunakan pada penelitian ini merupakan hasil pengembangan Ferry dkk. [15]. Alat ini memiliki mode sebagai alat uji tekan maupun sebagai alat uji tarik. Gambar 6.(a) menunjukkan alat uji tekan yang digunakan dalam eksperimen. *Leadscrew* yang digerakkan oleh sebuah motor AC mengatur jarak *gripper*. Pengaturan jarak dikendalikan berdasarkan umpan balik posisi sudut rotasi motor yang diberikan oleh rotary encoder. Spesimen dipegang pada *gripper* dengan bantuan *fixture*. Beban tekan diberikan pada titik tekan pada spesimen dengan cara memperkecil jarak *gripper*. Besarnya beban yang terbaca oleh load cell direkam melalui modul data akuisisi yang terhubung ke laptop. Profil beban dapat terbaca secara *real time* pada perangkat lunak yang dikembangkan bersama alat uji tekan ini. Proses penekanan dihentikan ketika sudah didapatkan profil beban yang semakin menurun dibandingkan sebelumnya. Dalam hal ini, struktur spesimen telah dinyatakan mengalami kegagalan.

4. Eksperimen dan Analisis

4.1 Eksperimen

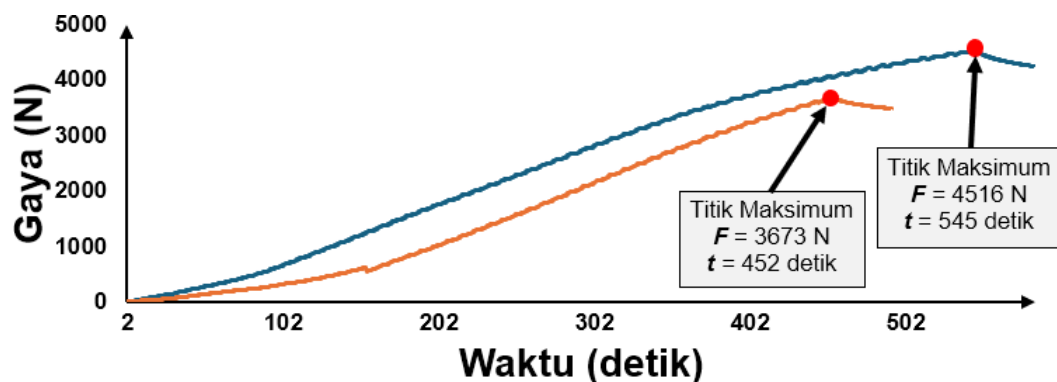
Eksperimen dilakukan dengan melakukan pencetakan spesimen sebanyak total 12 buah. Gambar 6.(c) dan 6.(d) menunjukkan fisik dari spesimen dengan pola *concentric* dan *rectilinear*. Spesimen yang mewakili teknik konvensional



Gambar 6. (a) Alat uji tekan [15], (b) pemasangan spesimen pada alat, (c) spesimen pola *concentric*, (d) spesimen pola *rectilinear*, (e) unit kendali motor *leadscrew*.

(*rectilinear*) sebanyak 6 buah dan teknik CP (*concentric*) sebanyak 6 buah. Uji tekan dilakukan secara berurutan dan bergantian per kelompok spesimen. Untuk setiap satu spesimen, langkah-langkah pengujian adalah sebagai berikut:

1. Spesimen dipasang padaudukan di *gripper* bawah dan dipegang dengan menggunakan *fixture* agar spesimen tidak bergerak.
2. Untuk mengatur posisi awal, motor *leadscrew* diputar sedemikian rupa sehingga bagian atas spesimen (titik uji tekan) menyentuh bidang tekan di *gripper* atas. Ketika sudah menyentuh maka posisi tersebut dianggap sebagai posisi awal.
3. Perangkat lunak DAQ dipersiapkan untuk pengambilan data dan gambar video selama proses penekanan.
4. Penekanan spesimen dimulai dengan menyalakan unit pengendali motor *leadscrew* dan fitur perekaman data diaktifkan.
5. Nilai gaya (F) yang terbaca akan menunjukkan kenaikan seiring proses penekanan. Ketika nilai gaya (F) yang terbaca menunjukkan penurunan maka proses penekanan dihentikan dan dianggap spesimen telah mencapai batas maksimum kekuatan struktural.
6. Data gaya (F) berikut timestamp (t) serta video disimpan ke dalam file untuk kemudian dianalisis secara bersamaan.



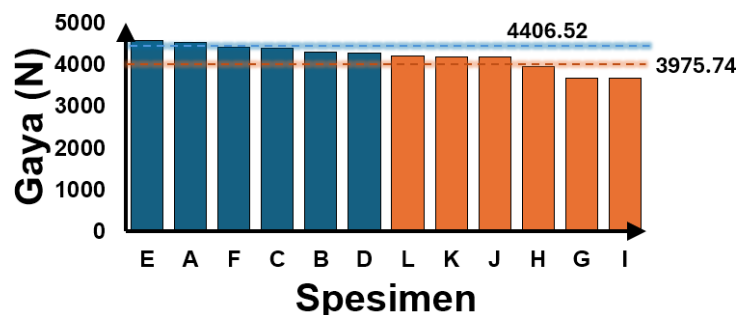
Gambar 7. Data gaya dari salah satu spesimen.

4.2 Analisis

Gambar 7 menunjukkan data gaya tekan yang diterima salah satu spesimen yang diuji. Gaya yang diterima berada dalam kisaran 3000 ~ 5000 N . Kegagalan struktur spesimen ditunjukkan oleh titik merah dimana gaya yang terbaca oleh *load cell* menunjukkan nilai yang menurun. Titik tersebut merupakan besar gaya maksimal yang dapat diterima oleh spesimen tersebut. Keseluruhan data gaya tekan maksimal untuk semua spesimen yang diuji dapat dilihat pada tabel 1 dan gambar 8. Gaya tekan maksimal rata-rata dari spesimen *concentric* sebesar 4406.52 N sedangkan untuk spesimen *rectilinear* sebesar 3975.74 N . Hasil tersebut menunjukkan bahwa spesimen dengan pola *concentric* memiliki kekuatan terhadap beban tekan lebih baik daripada spesimen dengan pola *rectilinear*. Selain itu, spesimen dengan pola *concentric* lebih tahan beban tekan lebih lama. Hal tersebut dapat dilihat dari waktu terjadinya titik beban maksimal (titik merah pada gambar 7) yang lebih lama daripada pola *rectilinear*. Selisih kekuatan antara pola *concentric* dan pola *rectilinear* adalah sebesar 430.78 N .

Tabel 1. Hasil Eksperimen Gaya Tekan Maksimal Tiap Spesimen

Pola Concentric (CP)		Pola Rectilinear (Konvensional)	
Spesimen	Gaya (N)	Spesimen	Gaya (N)
A	4516.29	G	3673.88
B	4289.82	H	3948.46
C	4385.42	I	3668.73
D	4266.31	J	4169.56
E	4575.29	K	4189.10
F	4405.86	L	4204.70



Gambar 8. Hasil Eksperimen Gaya Tekan Maksimal Tiap Spesimen

Kekuatan yang lebih baik pada spesimen dengan pola *concentric* disebabkan oleh orientasi *layer* yang mengikuti kontur geometri dari bentuk segitiga, terutama pada bagian ujung segitiga yang menjadi area uji tekan. Pada area titik uji tekan, gaya tekan terdistribusi lebih merata mengikuti kontur. Selain itu, pola *concentric* pada bentuk segitiga ini menghasilkan integritas dan kekuatan antar *layer* (*inter-layer bonding*) yang lebih baik dikarenakan mengikuti kontur segitiga. Hal tersebut memungkinkan gaya (beban) eksternal yang dikenakan terhadap spesimen tegak lurus (*normal*) terhadap orientasi *layer*. Dengan kata lain, beban tidak menyerang spesimen pada arah *shear* (batas antar layer dan tidak menyebabkan delaminasi layer).

4.3 Kerja Penelitian Lanjutan

Kerja penelitian lanjutan diarahkan pada karakterisasi produk 3DP dengan parameter variasi spesimen seperti bentuk spesimen, parameter *layering*, dan jenis filamen. Dari kerja penelitian tersebut diharapkan melengkapi hasil yang sudah dicapai di kerja penelitian ini. Lebih dari itu, tujuan akhir dari tema penelitian ini adalah untuk mengimplementasikan teknik *conformal printing* dengan menggunakan mesin 3DP 5-axis. Oleh karena itu, aktifitas pengembangan mesin 3DP 5-axis juga penting untuk direalisasikan.

5. Kesimpulan

Hasil eksperimen menunjukkan bahwa spesimen dengan pola *concentric* memiliki ketahanan terhadap beban tekan yang lebih baik daripada spesimen pola *rectilinear*. Dalam hal ini, gaya tekan rata-rata yang mampu ditahan oleh spesimen pola *concentric* lebih tinggi dan waktu tekannya lebih lama. Perbedaan ketahanan di antara kedua spesimen terhadap gaya tekan adalah 430.78 N. Dengan demikian, pencetakan 3DP dengan teknik CP yang prinsip *layering*-nya direpresentasikan oleh pola *concentric* mengikuti permukaan benda memiliki potensi kekuatan yang lebih baik terhadap beban eksternal.

Daftar Pustaka

- [1] Shakibania, S., Khakbiz, M., Bektas, C.K., Ghazanfari, L., Banizi, M.T. and Lee, K.B., "A Review of 3D Printing Technology for Rapid Medical Diagnostic Tools", *Molecular Systems Design & Engineering*, 7(4), pp.315-324, 2022.
- [2] Zhou, L., Miller, J., Vezza, J., Mayster, M., Raffay, M., Justice, Q., Al Tamimi, Z., Hansotte, G., Sunkara, L.D. and Bernat, J., "Additive Manufacturing: A Comprehensive Review", *Sensors*, 24(9), p.2668, 2024.
- [3] Gobena, S.T. and Woldeyohannes, A.D., "Comparative Review on The Application of Smart Material in Additive Manufacturing: 3D and 4D Printing", *Discover Applied Sciences*, 6(7), p.353, 2024.
- [4] Guezou-Philippe, A., Clavé, A., Maguet, E., Maintier, L., Garraud, C., Fouefack, J.R., Burdin, V., Stindel, E. and Dardenne, G., "Fully Automated Workflow for The Design of Patient-Specific Orthopaedic Implants: Application to Total Knee Arthroplasty", *arXiv preprint*, arXiv:2403.15353, 2024.
- [5] Safali, S., Berk, T., Makelov, B., Acar, M.A., Gueorguiev, B. and Pape, H.C., "The Possibilities of Personalized 3D Printed Implants—A Case Series Study", *Medicina*, 59(2), p.249, 2023.
- [6] Maroszek, M., Hager, I., Mróz, K., Sitarz, M. and Hebda, M., "Anisotropy of Mechanical Properties of 3D-Printed Materials—Influence of Application Time of Subsequent Layers", *Materials*, 18(16), p.3845, 2025.
- [7] Nagarajan, N., Dupret-Bories, A., Karabulut, E., Zorlutuna, P. and Vrana, N.E., "Enabling Personalized Implant and Controllable Biosystem Development Through 3D Printing", *Biotechnology Advances*, 36(2), pp.521-533, 2018.
- [8] Yan, Q., Dong, H., Su, J., Han, J., Song, B., Wei, Q. and Shi, Y., "A Review of 3D Printing Technology for Medical Applications", *Engineering*, 4(5), pp.729-742, 2018.
- [9] Prakash, D., Davis, R. and Sharma, A.K., "Design and Fabrication of Dental Implant Prototypes Using Additive Manufacturing", *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 561, No. 1, p. 012041, IOP Publishing, October, 2019.
- [10] Alkadi, F., Lee, K.C., Bashiri, A.H. and Choi, J.W., "Conformal Additive Manufacturing Using A Direct-Print Process", *Additive Manufacturing*, 32, p.100975, 2020.
- [11] Tang, J., Dong, Y., Cai, L., Zhu, Q. and Shi, J., "Conformal 3D Printing Algorithm for Surfaces and Its In Situ Repair Applications", *Micromachines*, 15(7), p.920, 2024.
- [12] Tian, X., Liu, T., Yang, C., Wang, Q., & Li, D., "Interface and Performance of 3D Printed Continuous Carbon Fiber Reinforced PLA Composites", *Composites Part B: Engineering*, 110, 442-449, 2016.
- [13] Mohd Khairul Nizam, M. A. N. B., Ismail, K. I. B., & Yap, T. C., "The Effect Of Printing Orientation on The Mechanical Properties of FDM 3D Printed Parts", *In Enabling Industry 4.0 Through Advances in Manufacturing and Materials: Selected Articles from iM3F 2021, Malaysia* (pp. 75-85). Singapore: Springer Nature Singapore, 2022.
- [14] Zhang, Y., Jarosinski, W., Jung, Y. G., & Zhang, J., "Additive Manufacturing Processes and Equipment", *Additive Manufacturing : Materials, Processes, Quantifications and Applications*, pp. 39-51, Butterworth-Heinemann, 2018.
- [15] Manalu, F. R. G., & Basuki, W. W., "Rancang Bangun Alat Uji Kekuatan Material Polimer dan Komposit Polimer Berpenguat Serat Alam", *Cylinder: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, 11(1), 2025.