

Analisis Sifat Mekanik Hasil Cetak 3D dengan Variasi Parameter *Fused Deposition Modeling (FDM)*

Mechanical Properties of 3D-Printed Samples under Fused Deposition Modeling (FDM)

Noesanto Dewantoro Ahmad^{1*}, Juriah Mulyanti², Yanuar Pramudya Pamungkas³

^{1*, 2, 3} Jurusan Teknik Mesin Universitas Janabadra

*Email Korespondensi: noesanto@janabadra.ac.id

ABSTRAK

Teknologi *Additive Manufacturing* (AM), khususnya *3D Printing* (3DP) dengan metode *Fused Deposition Modeling* (FDM), telah berkembang pesat dan banyak diterapkan di berbagai bidang teknik. Proses ini menggunakan material termoplastik dalam bentuk filamen yang memiliki beberapa keunggulan, antara lain biaya produksi yang rendah, ketersediaan yang luas, kekuatan mekanik yang baik, serta kemampuan mencetak dengan resolusi tinggi. Kualitas dan performa produk hasil cetak sangat dipengaruhi oleh jenis filamen dan parameter pencetakan yang digunakan selama proses fabrikasi. Beberapa parameter penting yang memengaruhi sifat akhir produk antara lain *nozzle temperature*, *bed temperature*, *infill percentage*, *infill pattern*, *printing speed*, *raster angle*, *build orientation*, *layer height* dan lain sebagainya. Penelitian eksperimental ini bertujuan untuk menentukan parameter pencetakan optimal pada material filamen termoplastik guna memperoleh performa mekanik terbaik. Fokus penelitian ini adalah pada dua parameter utama, yaitu *raster angle* dan *build orientation*. Pengujian tarik dan pengujian impak dilakukan untuk mengevaluasi kekuatan dan ketangguhan sampel hasil cetak 3D. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sampel yang dicetak pada orientasi YXZ memiliki kekuatan tarik dan kekuatan impak tertinggi dibandingkan orientasi lainnya. Sampel dengan sudut raster 45° menghasilkan kekuatan tarik tertinggi sebesar 54,36 MPa, sedangkan energi impak tertinggi sebesar 2,73 kJ/m² diperoleh dari sampel dengan sudut raster 0°.

Kata kunci: *3D Printing* (3DP), *Fused Deposition Modeling* (FDM), Parameter Pencetakan, Pengujian Tarik, Pengujian Impak.

ABSTRACT

Additive Manufacturing (AM), especially *3D Printing* (3DP) using the *Fused Deposition Modeling* (FDM) method, has been rapidly developed and widely applied in many engineering fields. This process uses thermoplastic materials in filament form, which provide advantages such as low cost, easy availability, good mechanical strength, and high printing resolution. The quality and performance of printed products depend on the type of filament and the printing parameters used during fabrication. Parameters such as nozzle temperature, bed temperature, infill percentage, printing speed, raster angle, build orientation, and layer thickness have significant effects on the final properties of printed parts. This experimental study aims to determine the optimal printing parameters for thermoplastic filament materials to achieve the best mechanical performance. The research focuses on two key parameters: raster angle and build orientation. Tensile and impact tests were conducted to evaluate the strength and toughness of the 3D-printed samples. The results show that the samples printed in the YXZ orientation had the highest tensile and impact strength compared to other orientations. The specimen with a raster angle of 45° obtained the highest tensile strength of 54.36 MPa, while the highest impact energy of 2.73 kJ/m² was recorded for the sample with a raster angle of 0°.

Keyword : *3D Printing* (3DP), *Fused Deposition Modeling* (FDM), *Printing Parameters*, *Tensile Test*, *Impact Test*.

PENDAHULUAN

Teknologi manufaktur saat ini mengalami perkembangan yang sangat pesat, salah satunya melalui penerapan teknik *additive manufacturing* (AM). *Additive manufacturing* merupakan proses pembuatan objek secara langsung dari material dasar melalui metode pelapisan bertahap (*layer by layer*) dari bawah ke atas [1]. Dibandingkan dengan metode *traditional manufacturing*, AM memiliki beberapa keunggulan, antara lain tidak memerlukan cetakan, penggunaan material yang efisien karena minim limbah, biaya produksi yang relatif rendah, proses yang mudah, serta kemampuan untuk menghasilkan produk dengan bentuk kompleks dalam waktu yang lebih singkat [2][3]. Salah satu bentuk *additive manufacturing* yang paling berkembang saat ini

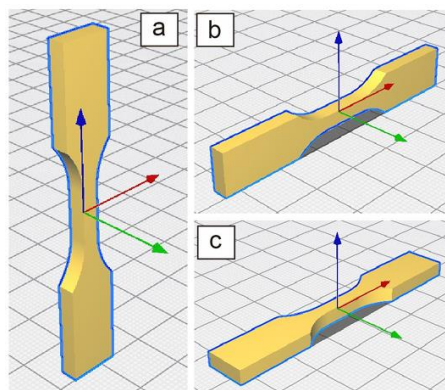
adalah *3D Printing* (3DP), khususnya metode *fused deposition modeling* (FDM). Teknologi FDM merupakan salah satu teknik yang paling populer dan banyak diterapkan, baik di kalangan industri maupun pengguna umum [2]. Penggunaan 3DP juga semakin meluas di Indonesia karena ketersediaan suku cadang dan harga mesin yang semakin terjangkau. Secara prinsip, *3D printing* merupakan metode *additive manufacturing* yang digunakan untuk menghasilkan berbagai macam struktur dan produk. Proses ini dilakukan dengan menumpuk material dalam bentuk filamen secara berlapis (*layer by layer*), di mana filamen tersebut diekstrusi melalui *nozzle* yang dipanaskan [3]. Dalam metode FDM, material utama yang digunakan berupa filamen termoplastik. Jenis filamen yang umum dijumpai di pasaran antara lain polimer dengan sifat termoplastik seperti *polylactic acid* (PLA), *acrylonitrile butadiene styrene* (ABS), dan *polyethylene terephthalate* (PET) [4][5].

Filamen termoplastik memiliki karakteristik khas yang memungkinkan material ini menjadi lunak dan fleksibel ketika dipanaskan, namun kembali mengeras saat didinginkan. Sifat tersebut menjadikan filamen termoplastik banyak digunakan dalam proses pencetakan 3D [6]. Pada proses ini, filamen dipanaskan di dalam *nozzle* printer 3D dan kemudian disusun secara berlapis untuk membentuk objek sesuai desain yang diinginkan. Keunggulan utama filamen termoplastik antara lain adalah biaya yang relatif rendah, ketersediaan bahan yang melimpah, kekuatan serta ketahanan yang baik, dan kemampuan untuk dicetak dengan tingkat ketelitian atau resolusi tinggi. Selain itu, filamen termoplastik dapat diberi pewarna khusus sehingga mampu menghasilkan objek dengan variasi warna dan tampilan yang menarik. Meskipun demikian, perlu diperhatikan bahwa setiap jenis filamen termoplastik memiliki karakteristik tersendiri serta parameter pencetakan yang berbeda-beda. Parameter tersebut harus disesuaikan dengan jenis filamen yang digunakan agar diperoleh hasil cetak yang optimal. Karakteristik dan sifat mekanik dari objek hasil *3D printing* juga sangat dipengaruhi oleh parameter proses pencetakan, seperti *nozzle temperature*, *bed temperature*, *infill percentage*, *infill pattern*, *printing speed*, *raster angle*, *build orientation*, *layer height*, dan parameter lainnya [7].

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menentukan parameter pencetakan yang paling optimal pada proses *3D printing* menggunakan material filamen termoplastik, sehingga dihasilkan produk dengan performa terbaik. Penelitian eksperimental ini difokuskan pada pengoptimalan parameter *printing*, khususnya *raster angle* dan *build orientation*, pada setiap sampel yang digunakan. Pengujian dilakukan melalui uji tarik (*tensile test*) dan uji dampak (*impact test*) untuk mengetahui sifat mekanik dari sampel berdasarkan variabel yang telah ditentukan.

METODE PENELITIAN

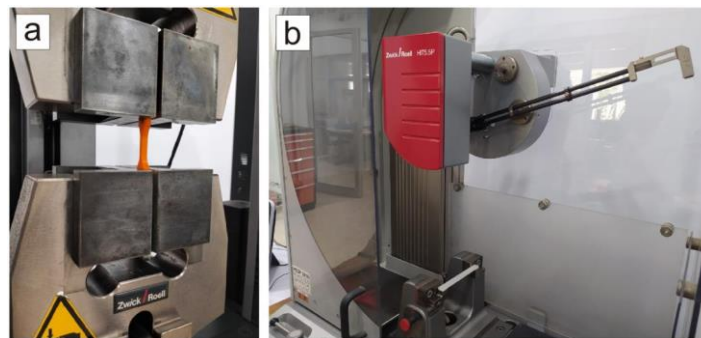
Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui parameter optimal dalam proses pencetakan menggunakan teknologi *3D printing* (3DP). Parameter utama yang dikaji meliputi *raster angle* dan *build orientation*. Material yang digunakan dalam pembuatan sampel *3D print* adalah filamen SUNLU PLA dengan warna natural. Proses pencetakan menggunakan mesin 3D Printer Creality CR-10S Pro V2 yang memiliki dimensi maksimal pencetakan 300 x 300 x 400 mm, tingkat ketelitian sekitar $\pm 0,1$ mm, serta menggunakan *nozzle* berdiameter 0,4 mm. Penelitian ini memfokuskan pada perbedaan posisi pencetakan sampel untuk pengujian tarik dan pengujian dampak. Terdapat 3 variasi posisi pencetakan (*build orientation*) untuk sampel yang dihasilkan dari proses *3D printing* seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. *Build orientation* sampel 3D print, a) ZXY; b) XYZ; dan c) YXZ

Selain memvariasikan posisi pencetakan sampel, penelitian ini juga memvariasikan sudut pencetakan (*raster angle*). *Raster angle* adalah sudut (arah) ekstrusi material dari *nozzle* yang diukur terhadap sumbu X

dengan rentang umum antara 0° hingga 90°. Sehingga parameter pencetakan sampel yang digunakan pada penelitian ini yaitu *raster angle* 0° dan 45°; *nozzle temperature* 215 °C; *bed temperature* 60 °C; *print speed* 100 mm/s; *infill pattern line* dan *infill density* 100%. Sampel yang dicetak memiliki jumlah yang sama untuk masing-masing variasi *build orientation* dan *raster angle* yang kemudian dilakukan pengujian tarik dan pengujian impact. Pengujian tarik sampel menggunakan standar ASTM D638 tipe V dengan dimensi panjang sampel secara keseluruhan yaitu 63,5 mm (2,5 in) dan ketebalan kurang dari 4 mm [8]. Untuk parameter pengujian yang digunakan yaitu kecepatan *crosshead* dari alat pengujian adalah 1 mm/menit. Pengujian impact sampel menggunakan standar ASTM D6110 dengan dimensi panjang 127 mm dan lebar 12,7 mm. Pengujian tarik dan pengujian impact ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. a) pengujian tarik, dan b) pengujian impact sampel

Pengujian tarik merupakan pengujian dengan cara merusak/destruktif dan akan diperoleh informasi terkait kekuatan tarik, kekuatan luluh, dan keuletan suatu material. Dari pengujian ini akan dihasilkan diagram tegangan-regangan (*stress-strain*) dengan informasi kekuatan tarik (*tensile strength*), regangan (*tensile strain*), modulus elastisitas (*tensile modulus*), penambahan panjang (*elongation*) [9]. Persamaan 1-3 dijabarkan oleh Callister dan Rethwisch [10] untuk dapat menentukan nilai dari:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{l_i - l_0}{l_0} \quad (2)$$

$$\sigma = E\varepsilon \quad (3)$$

Pengujian impact digunakan untuk mengetahui kemampuan suatu material dalam menahan beban yang datang secara tiba-tiba. Metode ini bertujuan menggambarkan kondisi nyata saat material mengalami gaya kejut, seperti pada aplikasi konstruksi maupun transportasi, yang dapat memicu terjadinya deformasi. Dalam pengujian ini, energi yang diserap hingga spesimen mengalami patah menjadi parameter utama yang diperoleh. Proses pengujian dilakukan dengan menjatuhkan pendulum dari ketinggian tertentu untuk menghantam spesimen sampai terjadi kerusakan. Setelah spesimen terbelah, pendulum akan berayun kembali dan membentuk sudut tertentu. Selisih energi sebelum dan sesudah tumbukan menunjukkan besarnya energi yang diserap material, yang menjadi indikator tingkat ketangguhannya. Suatu material dinilai tangguh apabila mampu menyerap energi kejut dalam jumlah besar tanpa mudah mengalami retak atau kerusakan permanen. Nilai energi serapan ini umumnya dinyatakan dalam satuan *joule*.

Pengujian yang dilakukan dengan metode Charpy akan menghasilkan harga impact yang lebih valid dibandingkan dengan metode Izod. Hal ini terjadi karena energi yang diserap oleh penyangga sampel tidak terlalu besar sehingga tidak banyak mempengaruhi harga impact sampel. Prinsip pengujian impact ini adalah menghitung energi yang diberikan beban dan menghitung energi yang diserap oleh sampel. Saat beban dinaikkan pada ketinggian tertentu, beban memiliki energi potensial yang kemudian saat menumbuk sampel energi kinetik mencapai maksimum. Energi yang diserap sampel akan menyebabkan sampel mengalami kegagalan, dimana bentuk kegagalan tergantung pada jenis material penyusun sampel [11]. Untuk mendapatkan Harga Impact (HI) didapat dari persamaan (4) berikut ini:

$$HI = \frac{E}{A} \quad (4)$$

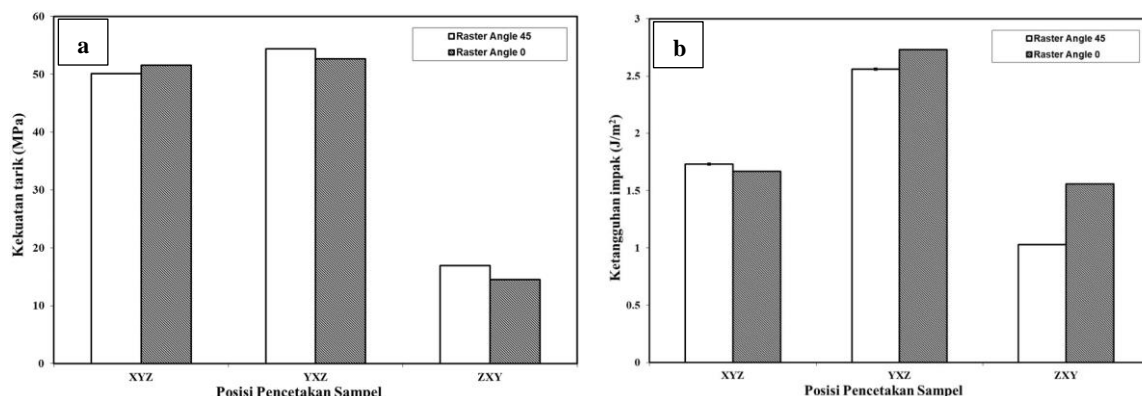
HASIL DAN ANALISIS

Hasil pengujian tarik dari sampel dengan variasi *build orientation* dan *raster angle* yang disajikan pada Tabel 1 menunjukkan bahwa sampel uji tarik dengan *build orientation* XYZ memiliki kekuatan tarik paling tinggi jika dibandingkan dengan *build orientation* sampel lainnya. Kekuatan tarik untuk sampel yang dicetak dengan *build orientation* XYZ memiliki nilai 50,10 MPa dan 51,56 MPa dan kekuatan tarik untuk sampel yang dicetak dengan *build orientation* ZXY memiliki nilai 16,92 MPa dan 14,52 MPa. Kedua *build orientation* tersebut memiliki nilai kekuatan tarik yang lebih rendah jika dibandingkan dengan *build orientation* XYZ dengan nilai kekuatan tariknya masing-masing adalah 54,36 MPa dan 52,68 MPa. Variasi *raster angle* yang digunakan pada masing-masing sampel yaitu 0° dan 45°, dimana *raster angle* pada sampel memberikan pengaruh terhadap kekuatan tarik dari masing-masing sampel. Diketahui bahwa posisi pencetakan sampel pada XYZ *raster angle* 0° dan 45° memiliki nilai kekuatan tarik yang berbeda, dimana sampel dengan *raster angle* 45° memiliki kekuatan tarik paling tinggi yaitu dengan nilai 54,36 MPa.

Tabel 1. Hasil pengujian tarik sampel variasi *build orientation* dan *raster angle*

Sampel	Kekuatan Tarik (MPa)	Regangan Patah (%)	Modulus Elastisitas (MPa)
XYZ 45	50,10 ± 1,2	7,2 ± 0,1	239,2 ± 9,7
XYZ 0	51,56 ± 1,1	6,7 ± 0,2	267,6 ± 14,8
YZX 45	54,36 ± 0,9	8,3 ± 0,9	326,2 ± 47,6
YZX 0	52,68 ± 0,9	7,0 ± 1,6	324,0 ± 49,0
ZXY 45	16,92 ± 2,1	3,3 ± 0,2	275,2 ± 14,1
ZXY 0	14,52 ± 2,4	3,0 ± 0,3	274,2 ± 19,4

Perbedaan nilai kekuatan dari sampel ini dipengaruhi oleh arah pencetakan (*raster angle*) yang mengakibatkan perbedaan arah pembebanan yang diterima pada sampel [12][13]. Sampel yang dicetak dengan *raster angle* 45° mampu menerima beban tarik yang besar sehingga memiliki kekuatan tarik lebih tinggi. Hal ini disebabkan karena arah ekstrusi dari filamen yang dicetak mampu menahan beban yang diberikan baik secara paralel ataupun diagonal. Berbeda dengan *raster angle* 0° yang hanya mampu menahan beban yang diberikan secara paralel saja [14]. Diagram hasil pengujian tarik dan dampak sampel 3D disajikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Hasil a) pengujian tarik dan b) pengujian dampak sampel variasi *build orientation* dan *raster angle*

Pengujian dampak sampel menggunakan standar ASTM D6110 dengan metode Charpy dimana untuk dimensi panjang secara keseluruhan yaitu 127 mm dan lebar sampel 12,7 mm dengan ketebalan kurang dari 5 mm. Standar ini dipilih karena beberapa pertimbangan yaitu efisiensi filamen dan waktu serta dimensi sampel dan ukuran *bed printer* yang terbatas. Pendulum yang digunakan memiliki panjang 330 mm dengan massa total pembebanan 0,3 kg. Hasil pengujian dampak dari sampel dengan variasi *build orientation* dan *raster angle* disajikan pada Tabel 2 yang menunjukkan bahwa sampel uji dampak dengan *build orientation* YZX memiliki kekuatan tarik paling tinggi jika dibandingkan dengan *build orientation* sampel lainnya. Kekuatan dampak untuk sampel yang dicetak dengan *build orientation* XYZ memiliki nilai 1,73 kJ/m² dan 1,67 kJ/m² dan kekuatan

impak untuk sampel yang dicetak dengan *build orientation* ZXY memiliki nilai 1,03 kJ/m² dan 1,56 kJ/m². Kedua *build orientation* tersebut memiliki nilai kekuatan yang lebih rendah jika dibandingkan dengan *build orientation* YXZ dengan nilai kekuatan dampak masing-masing 2,56 kJ/m² dan 2,73 kJ/m².

Tabel 2. Hasil pengujian dampak sampel variasi *build orientation* dan *raster angle*

Sampel	Kekuatan Dampak (kJ/m ²)	Energi yang diserap (Joule)
XYZ 45	1,73 ± 0,1	0,08 ± 0,01
XYZ 0	1,67 ± 0,1	0,07 ± 0,00
YXZ 45	2,56 ± 0,2	0,12 ± 0,01
YXZ 0	2,73 ± 0,3	0,13 ± 0,00
ZXY 45	1,03 ± 0,0	0,05 ± 0,00
ZXY 0	1,56 ± 0,1	0,07 ± 0,00

Variasi *raster angle* yang digunakan pada masing-masing sampel sama seperti dengan sampel uji tarik yaitu 0° dan 45°, dimana *raster angle* pada sampel memberikan pengaruh terhadap kekuatan dampak dari masing-masing sampel. Diketahui bahwa *build orientation* sampel pada YXZ memiliki kekuatan dampak yang paling tinggi dibandingkan dengan *build orientation* yang lain. Jika dibandingkan antara sampel YXZ *raster angle* 0° dan 45° memiliki nilai kekuatan dampak yang berbeda, dimana sampel dengan *raster angle* 0° memiliki kekuatan dampak paling tinggi yaitu dengan nilai 2,73 kJ/m².

Perbedaan nilai kekuatan dari sampel ini dipengaruhi oleh arah pencetakan (*raster angle*) yang mengakibatkan perbedaan arah pembebanan yang diterima pada sampel. Sampel yang dicetak dengan *raster angle* 0° mampu menerima beban kejutan lebih besar dari bandul pendulum yang arahnya tegak lurus dengan arah ekstrusi filamen yang dicetak. Tingginya nilai kekuatan dampak dari sampel disebabkan karena *layer* yang terbentuk memiliki jumlah yang banyak dan mampu untuk menahan beban kejutan pendulum yang datangnya tegak lurus dengan arah *raster angle* yang terbentuk pada sampel dampak.

KESIMPULAN

Hasil pengujian sampel *3D printing* dengan variasi *build orientation* dan *raster angle* menunjukkan bahwa kedua parameter tersebut berpengaruh terhadap kekuatan tarik dan kekuatan dampak dari sampel yang dihasilkan. Nilai kekuatan tarik tertinggi diperoleh dari sampel dengan *raster angle* sebesar 45°, yaitu sebesar 54,36 MPa, sedangkan kekuatan dampak tertinggi sebesar 2,73 kJ/m² diperoleh dari sampel dengan *raster angle* sebesar 0°. Selain itu, variasi *build orientation* juga memberikan pengaruh nyata terhadap hasil pengujian. Sampel yang dicetak pada posisi *build orientation* YXZ menunjukkan nilai kekuatan tarik dan kekuatan dampak tertinggi dibandingkan orientasi lainnya. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa parameter pencetakan yang paling optimal untuk pengujian tarik adalah *build orientation* YXZ dengan *raster angle* 45°, sedangkan parameter pencetakan yang paling optimal untuk pengujian dampak adalah *build orientation* YXZ dengan *raster angle* 0°.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan bantuan, baik berupa materi maupun pemikiran, sehingga penelitian dan penulisan makalah ini dapat terselesaikan dengan baik. Ucapan terima kasih disampaikan kepada Dekan Fakultas Teknik Universitas Janabadra atas dukungan pendanaan melalui program hibah internal FT UJB, serta ucapat terima kasih kepada Jurusan Teknik Mesin Universitas Janabadra atas fasilitas dan dukungan yang diberikan selama kegiatan penelitian berlangsung.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ning, W. Cong, J. Qiu, J. Wei, and S. Wang, "Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling," *Compos. Part B Eng.*, vol. 80, pp. 369–378, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.06.013>.
- [2] B. Coppola, N. Cappetti, L. Di Maio, P. Scarfato, and L. Incarnato, "3D Printing of PLA/clay Nanocomposites: Influence of Printing Temperature on Printed Samples Properties," *Materials*, vol. 11, no. 10, p. 1947, Oct. 2018, doi: <https://doi.org/10.3390/ma11101947>.

-
- [3] J. Yang et al., "Cellulose, hemicellulose, lignin, and their derivatives as multi-components of bio-based feedstocks for 3D printing," *Carbohydrate Polymers*, vol. 250, no. -, p. 116881, Dec. 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116881>.
- [4] Tomy Muringayil Joseph et al., "3D printing of polylactic acid: recent advances and opportunities," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 125, no. 3–4, pp. 1015–1035, Jan. 2023, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10795-y>.
- [5] N. Mohan, P. Senthil, S. Vinodh, and N. Jayanth, "A review on composite materials and process parameters optimisation for the fused deposition modelling process," *Virtual and Physical Prototyping*, vol. 12, no. 1, pp. 47–59, Jan. 2017, doi: <https://doi.org/10.1080/17452759.2016.1274490>.
- [6] C. Peng, P. Tran, and A. P. Mouritz, "Compression and buckling analysis of 3D printed carbon fibre-reinforced polymer cellular composite structures," *Composite Structures*, vol. -, no. -, p. 116167, Aug. 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116167>.
- [7] M. Bertolino, D. Battagazzore, R. Arrigo, and A. Frache, "Designing 3D printable polypropylene: Material and process optimisation through rheology," *Additive Manufacturing*, vol. 40, no. -, p. 101944, Apr. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.101944>.
- [8] N. D. Ahmad, Kusmono, M. W. Wildan, and Herianto, "Preparation and properties of cellulose nanocrystals-reinforced Poly (lactic acid) composite filaments for 3D printing applications," *Results in Engineering*, vol. 17, no. -, p. 100842, Mar. 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100842>.
- [9] American standard for testing and material (ASTM). Standard test method for tensile of plastics D638. 2000.
- [10] W. D. Callister Jr & D. G. Rethwisch, *Material science and engineering an introduction* 8th ed. New Jersey: Wiley. 2010.
- [11] American standard for testing and material (ASTM). Standard test method for impact of plastics D6110. 2000.
- [12] M. ERYILDIZ, "Effect of Build Orientation on Mechanical Behaviour and Build Time of FDM 3D-Printed PLA Parts: An Experimental Investigation," *European Mechanical Science*, vol. 5, no. 3, pp. 116–120, Sep. 2021, doi: <https://doi.org/10.26701/ems.881254>.
- [13] J. S. Ramírez-Prieto, J. S. Martínez-Yáñez, and Andrés Giovanni González-Hernández, "Effect of raster angle on the tensile and flexural strength of 3D printed PLA+ parts," *AIMS Materials Science*, vol. 12, no. 2, pp. 363–379, Jan. 2025, doi: <https://doi.org/10.3934/matricsci.2025019>.
- [14] Tatjana Glaskova-Kuzmina et al., "The Tensile, Thermal and Flame-Retardant Properties of Polyetherimide and Polyetherketoneketone Processed via Fused Filament Fabrication," *Polymers*, vol. 16, no. 3, pp. 336–336, Jan. 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/polym16030336>.