

Sifat Mekanik Bahan Poliamida Menggunakan Kaedah Permodelan Pemendapan Bersatu

(Mechanical Properties of Polyamide Material Using Fused Deposition Modeling Method)

Kwek Kian Sheng^a, Nabilah Afiqah Mohd Radzuan^{a,b*}, Farhana Mohd Foudzi^a, Abu Bakar Sulong^{a,b} & Zaliha Wahid^a

^aAdvanced Manufacturing Research Group, Department of Mechanical & Manufacturing Engineering,
 Faculty Engineering & Built Environment,
 Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 Bangi, Selangor, Malaysia.

^bFuel Cell Institute,
 Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 UKM Bangi, Selangor, Malaysia.

*Corresponding author: afiqah@ukm.edu.my

Received 26 February 2024, Received in revised form 12 June 2024
 Accepted 12 July 2024, Available online 30 September 2024

ABSTRAK

Permodelan pemendapan bersatu (FDM) ialah teknik pencetakan 3D yang popular menggunakan bahan polimer termoplastik dalam menghasilkan pelbagai objek dengan kecekapan yang tinggi. Kualiti pencetakan 3D dalam pembuatan bahan tambahan dipengaruhi oleh beberapa parameter yang memerlukan pelarasan bagi mencapai hasil optimum. Antaranya suhu pencetakan dan ketinggian cetakan. Walaubagaimanapun, bahan poliamida dicetak menggunakan kaedah FDM sering mempunyai kecacatan yang menjejaskan ketepatan percetakan dan sifat mekanik produk cetakan. Kesan pengaruh orientasi cetakan (0° , 45° , 90°) poliamida dicetak menggunakan teknik FDM dilihat mampu mengatasi masalah ini. Oleh itu, ujian lenturan pada orientasi 0° merekodkan nilai tertinggi berbanding orientasi pada 45° (9 %) dan 90° (211 %). Selain itu, ujian ricih bagi orientasi 0° menunjukkan kekuatan ricih 17.57 MPa tertinggi mengatasi orientasi 45° dan 90° sebanyak 1.2 dan 2.5 kali ganda. Keadaan yang sama ditunjukkan oleh ujian tegangan, apabila kekuatan tegangan muktamad yang lebih tinggi (24.53 MPa) dan terikan yang meningkat dengan ketara semasa putus (319 %) bagi sudut orientasi 0° manakala, ujian mampatan merekodkan nilai 29 MPa. Dapat disimpulkan pada orientasi 0° prestasi sifat mekanik adalah cemerlang berbanding orientasi pada 45° dan 90° .

Kata kunci: Pembuatan bahan tambahan; Permodelan Pemendapan Bersatu (FDM); poliamida (PA); orientasi; sifat mekanikal

ABSTRACT

Fused Deposition Modeling (FDM) is a popular 3D printing technique that uses thermoplastic polymer materials to produce various objects with high efficiency. The quality of 3D printing in additive manufacturing is affected by several parameters that require adjustment to achieve optimal results, including printing temperature and print height. However, polyamide materials printed using the FDM method often have defects that affect the printing accuracy and mechanical properties of the printed product. The influence of print orientation (0° , 45° , 90°) polyamide printed using FDM technique is seen to be able to overcome this problem. Therefore, the bending test at 0° orientation recorded the highest values compared to orientations at 45° (9 %) and 90° (211 %). In addition, the shear test for the 0° orientation showed the highest shear strength of 17.57 MPa over the 45° and 90° orientation by 1.2 and 2.5 times. The same situation was shown by the tensile test, when the ultimate tensile strength was higher (24.53 MPa) and the strain increased significantly at break (319 %) for the 0° orientation seam while, the compression test recorded a value of 29 MPa. It can be concluded that at the orientation of 0° the performance of the mechanical properties is excellent compared to the orientation at 45° and 90° .

Keywords: Additive manufacturing; Fused Deposition Modeling (FDM); polyamide (PA); orientation; mechanical properties

PENGENALAN

Pembuatan bahan tambah (*Additive Manufacturing*, AM) yang juga dikenali sebagai percetakan 3D, memainkan peranan yang semakin penting dalam industri pembuatan, terutamanya untuk prototaip alatan elektronik, bio-perubatan, robotik dan sebagainya. Kajian lepas menunjukkan kaedah AM telah meraih populariti yang ketara dengan banyak syarikat mengguna pakainya untuk tujuan pembikinan prototaip dan sebagainya (Fateixa et al. 2023; Yuan et al. 2019). AM dijangka terus berkembang dengan mantap pada tahun-tahun akan datang, dengan pelaburan yang besar dan penggunaan global (Ngo et al. 2018). Ia menawarkan beberapa kelebihan, seperti prototaip pantas, mengurangkan kos pengeluaran, dan keupayaan untuk menggunakan pelbagai bahan dalam kepelbagaian projek (González-Henríquez et al., 2019). Walau bagaimanapun, terdapat juga cabaran yang berkaitan dengan penggunaan percetakan 3D dalam industri pembuatan, termasuk dalam penghasilan bahan yang boleh diubah suai serta kualiti produk akhir yang dihasilkan.

Umum mengetahui bahawa, bahan polimer telah menjadi titik fokus untuk pelbagai aplikasi AM kerana keupayaan fleksibiliti, kebolehsuaian sintetik, dan pelbagai sifat yang boleh dicapai (Tavassoli et al. 2020). Walau bagaimanapun, produk polimer bercetak 3D jarang digunakan untuk bahagian struktur dan berfungsi kerana polimer mempunyai sifat mekanik yang tidak memuaskan dan mempamerkan tingkah laku penebat elektrik dan haba secara umum. Ini menjadikan kebanyakan penyelidikan polimer terhad kepada penggunaan komoditi tertentu dan bahan komposit atau termoplastik berprestasi tinggi telah menjadi tumpuan penyelidikan untuk pelbagai aplikasi (Kakanuru & Pochiraju 2020; Ning et al. 2015).

Pelbagai kaedah cetakan 3D dengan pelbagai fungsi telah dibangunkan untuk membentuk produk akhir. Salah satu cabaran biasa dalam permodelan pemendapan bersatu (*Fused Deposition Modeling*, FDM) adalah bahan terhad kepada polimer termoplastik dengan takat lebur di bawah 300°C. Bahan termoplastik tersebut juga harus mempunyai kekuatan yang mencukupi dan keupayaan aliran cair untuk memberikan sokongan struktur dan membolehkan pengecutan semasa proses pencetakan. Poliamida (PA atau nilon) ialah polimer termoplastik kejuruteraan yang

berpotensi tinggi namun tanpa bahan diperkuat seperti pengisi karbon, grafen dan sebagainya bahan asas PA tulen lebih cenderung berubah bentuk dan tidak mempunyai kestabilan dimensi (Khalid et al. 2022). Perihal ini memberi kesan khasnya pada sifat mekanik bahan dicetak. Oleh yang demikian, kajian ini memfokuskan kepada penggunaan kaedah menggunakan bahan poliamida (PA atau nilon) dengan mengubah orientasi binaan cetakan (0°, 45°, dan 90°) sebagai usaha meningkatkan sifat mekanik bahan cetakan seperti kekuatan tegangan, kekuatan ricih, kekuatan tegangan, dan kekuatan mampatan.

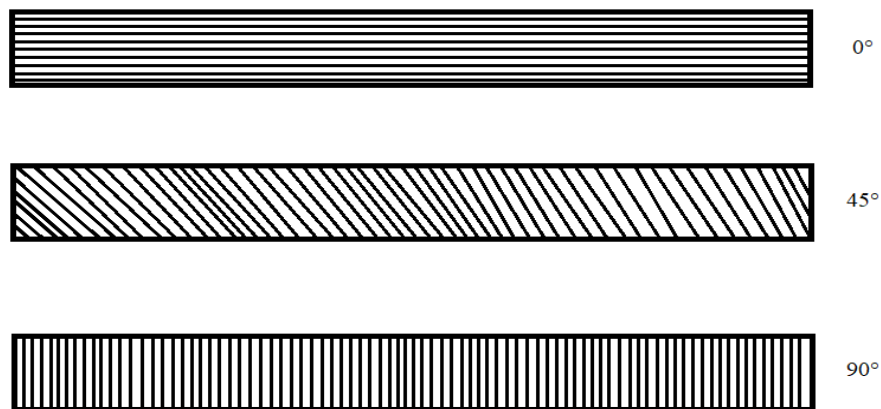
METODOLOGI

BAHAN DAN ALATAN

Penghasilan spesimen menggunakan cetakan 3D FDM dihasilkan menggunakan bahan poliamida seperti ditunjukkan dalam Jadual 1. Peralatan yang digunakan dalam proses pencetakan FDM ialah mesin Ultimaker S3. Bahan yang digunakan dalam kajian ini ialah Poliamida 12 (PA12), juga dikenali sebagai Nylon 12. Poliamida yang diperoleh adalah dalam bentuk filamen dengan size 1.75 mm. Sifat mekanik dan terma yang ditunjukkan dalam Jadual 1 adalah diperoleh daripada pembekal iaitu Sigma-Aldrich (M) Sdn. Bhd. yang mana diperlukan sebagai input parameter cetakan. Parameter cetakan 3D disenaraikan dalam Jadual 2 digunakan dalam mencetak sampel mengikut standard cetakan. Orientasi cetakan ditetapkan pada sudut orientasi yang berbeza (0°, 45°, dan 90°) dicetak seperti ditunjukkan dalam Rajah 1 dan digunakan untuk mengkaji kesannya terhadap sifat mekanikal PA12.

JADUAL 1. Pelbagai sifat mekanikal dan haba PA12 (Sumber: Sigma-Aldrich (M) Sdn. Bhd.)

Sifat	Nilai
Ketumpatan	930 kg/m ³
Modulus young	1620 MPa
Kekuatan tegangan	48 MPa
Modulus lenturan (23°C)	1,500 MPa
Suhu leburan	176 °C
Kelajuan cetakan	30 – 60 mm/s



RAJAH 1. Sudut orientasi percetakan

JADUAL 2. Parameter pencetakan

Parameter	Nilai
Sudut nozel	Tegak
Ketebalan lapisan	0.2 mm
Ketumpatan isian	100%
Kedudukan percetakan	Selari dengan paksi-x
Kelajuan pencetakan	50 mm/s
Suhu percetakan	230 °C

PENCIRIAN

Pencirian bahan PA dicetak dianalisa melibatkan kekuatan lentur, ujian ricih, ujian tegangan dan mampatan pada orientasi berbeza (0°, 45°, dan 90°. Ujian lenturan melibatkan ASTM D790, manakala ujian ricih menggunakan ASTM D5868. Berdasarkan kedua ujian ini, sampel dengan cetakan terbaik dipilih bagi melakukan ujian lanjutan iaitu ujian tegangan (ASTM D638) serta ujian mampatan (ASTM D695). Untuk ujian dilakukan menggunakan mesin pengujian sejagat (Instron *Universal Testing Machine, UTM*) model Instron 5567. Selain itu, pencirian bahan poliamida dicetak akan dilakukan melalui beberapa analisis termasuk analisa mikrograf menggunakan mikroskop imbasan elektron (*Scanning Electron Microscope, SEM*) dan optikal mikroskop bagi analisis permukaan. Pengesanan elemen dan analisis struktur kristal bahan poliamida sebelum dan selepas dilakukan menggunakan pembelauan sinar-x (*X-Ray Diffraction, XRD*). Analisa terma dilaksanakan bagi menentukan suhu cetakan bahan poliamida melibatkan ujian termagravimetrik (*Thermogravimetric Analysis, TGA*) dan kalorimetri pengimbasan berbeza (*Differential Scanning Calorimetry, DSC*) untuk penilaian siat terma.

KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

KEKUATAN LENTURAN

Ujian lenturan adalah penting dalam menentukan rintangan bahan terhadap beban lentur dan tekanan, mengakibatkan ubah bentuk sampel. Jadual 3 menunjukkan keputusan ujian kekuatan lenturan bagi setiap sampel dengan purata nilai kekuatan lentur untuk setiap orientasi juga direkodkan. Berdasarkan Jadual 3, dapat dilihat bahawa pada orientasi 0°, peningkatan nilai kekuatan lenturan adalah sebanyak 211 % berbanding orientasi pada 90°. Perihal ini adalah disebabkan bebanan yang sekata ditampung oleh sampel ketika cetakan dilakukan lapisan demi lapisan. Perkara yang sama turut dilaporkan pada tahun 2022 dan 2023, apabila sifat mekanik bahan meningkat apabila bebanan yang dikenakan adalah seranjang dengan daya dikenakan (Rijckaert et al. 2022; Yang et al. 2023). Walaubagaimanapun, Jadual 3 menunjukkan berbezaan minimum (8.8% antara orientasi 0° dan 45°. Keadaan ini dilaporkan oleh kajian lepas sebagai orientasi yang baik mengambilkira daya yang dikenakan adalah senantiasa 45° dengan arah cetakan (Todoroki et al. 2021).

Rajah 2 merekodkan perbezaan antara nilai kekuatan lenturan dan modulus lenturan bagi ketiga-tiga set sampel. Keputusan ujian kekuatan lentur untuk orientasi 45° dan 90° menunjukkan nilai tidak konsisten kesan daripada kehadiran dinding bercetak pada sisi sampel yang mana kurang diberi perhatian seperti dinyatakan dalam kajian (Giri et al. 2021; Tang et al. 2020). Apabila dinding dicetak di sepanjang sisi sampel, ia boleh memberikan sokongan struktur keseluruhan dan memastikan tekanan sekata ke seluruh bahagian yang dicetak. Ini boleh mengurangkan kemungkinan kejadian ubah bentuk, meleding, serta pemisahan lapisan, terutamanya pada bahagian nipis atau

tinggi. Kehadiran dinding boleh meningkatkan kekakuan keseluruhan, menjadikan sampel lebih teguh seperti direkodkan pada orientasi 0°. Selain itu, dinding boleh meningkatkan kualiti cetakan dengan bertindak sebagai templat atau rujukan untuk lapisan seterusnya, mempertingkatkan penjajaran dan pematuhan lapisan. Sampel dengan orientasi 0° mempunyai dinding di sepanjang sisi, manakala spesimen dengan orientasi 45° dan 90° tidak wujud (Armstrong et al. 2021; Yao et al. 2019). Hal ini mengakibatkan nilai kekuatan lenturan yang lebih tinggi pada 0° berbanding orientasi yang lain.

JADUAL 3. Kekuatan lenturan dan terikan orientasi 0°, 45°, 90°

Sampel	Orientasi	Kekuatan lentur pada beban maksimum (MPa)	Tegangan lentur pada beban maksimum (%)
1	0°	21.6520	10.9099
2		20.5026	9.6927
3		21.3551	9.6163
4		21.8514	10.8182
5		18.9052	9.0926
Purata		20.85	10
1	45°	15.8368	8.4617
2		24.5953	8.4900
3		22.1842	9.3823
4		16.2506	8.4564
5		16.7003	9.0013
Purata		19.11	8.76
1	90°	5.0679	1.9038
2		10.2293	2.4342
3		6.2370	8.7151
4		4.7143	9.3642
5		7.2641	9.3178
Purata		6.7	6.35

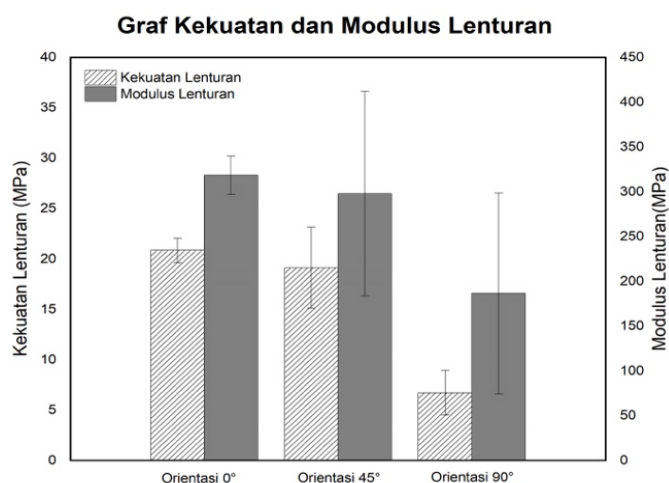
Selain itu, Rajah 2 menunjukkan kekuatan lentur dan modulus untuk pelbagai orientasi yang diuji pada suhu bilik. Keputusan menunjukkan bahawa orientasi 0° mempunyai purata kekuatan lenturan tertinggi iaitu 20.85 MPa iaitu 9.1% lebih tinggi berbanding orientasi 45° (19.1 MPa) dan 211.1% lebih tinggi berbanding orientasi 90° (6.7 MPa). Keadaan yang sama ditunjukkan oleh nilai modulus lenturan bagi orientasi 0° adalah tertinggi pada 318.40 MPa, berbanding 114.29 MPa dan 112.05 MPa untuk orientasi 45° dan 90°. Nilai purata ini menunjukkan bahawa orientasi 0° menunjukkan rintangan yang lebih baik terhadap lenturan berbanding dengan orientasi lain.

Berdasarkan kajian lepas, orientasi memainkan peranan penting dalam sifat mampatan dan lentur (Farashi & Vafaee 2022). Orientasi 0° pada paksi XY dianggap

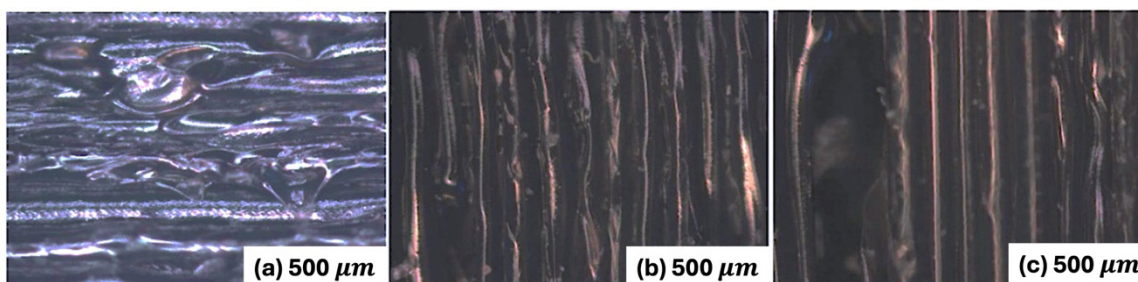
sebagai nilai tertinggi berbanding orientasi lain. Dapatan ini disokong oleh kajian lepas menggunakan kaedah FDM untuk menghasilkan sampel menggunakan filamen PLA (Letcher 2016). Dalam kajian tersebut, sampel dicetak pada orientasi 0°, 45°, dan 90° untuk menilai kesan orientasi terhadap kekuatan lenturan. Orientasi 0° didapati terbaik, dengan kekuatan lentur sebanyak 102 MPa, berbanding dengan orientasi 45° dan 90°. Terdapat juga penyelidikan terdahulu yang menyatakan bahawa modulus pecah (MOR) berada pada tahap maksimum pada orientasi di bawah 30°, manakala sampel menggunakan ABS P430 dengan orientasi 90° menunjukkan kekuatan lentur yang paling rendah (Yadav et al. 2020). Sampel dibuat menggunakan Akrilonitril Butadiena Stirena (ABS P430) dalam kajian tersebut. Semasa ujian, sampel didapati boleh melentur

dengan merekodkan trend bacaan yang sama seperti dapatan kajian ini. Orientasi 0° menawarkan lebih banyak rintangan kepada lenturan kerana lapisan sejajar dengan satah lentur, mempamerkan ikatan yang kuat antara lapisan disebabkan oleh panjang sentuhan yang lebih besar antara lapisan berbanding dengan orientasi lain. Keadaan berbeza pada orientasi 45° dan 90°, kecondongan relatif antara lapisan dan satah lenturan menghasilkan panjang sentuhan yang lebih kecil. Ini membawa kepada pengurangan kapasiti membawa beban (Rijckaert et al. 2022). Kesan daripada fenomena ini mengakibatkan ubah bentuk plastik

minimum dalam kedua-dua orientasi 45° dan 90°. Perihal ini ditunjukkan dalam Rajah 3 yang mana imej mikroskop optik menunjukkan orientasi 90° mempunyai delaminasi yang jelas berbanding orientasi 0° dan 45°. Kehadiran delaminasi yang jelas pada orientasi 90° mendorong kepada nilai kekuatan lenturan yang merosot. Kajian lepas melaporkan delaminasi terjadi kesan daripada permukaan lapisan yang tidak sempurna atau kasar punca daripada parameter cetakan yang dikenakan (Polyzos et al. 2021; White & Sue 2012).



RAJAH 2. Graf tegasan-tegangan lentur untuk orientasi berbeza iaitu (a) 0°, (b) 45° dan (c) 90°



RAJAH 3. Imej mikroskop optik sisi spesimen dengan orientasi; (a) 0°, (b) 45° dan (c) 90°

KEKUATAN RICIH

Kesan daripada ujian lenturan, bagi melihat delaminasi yang terjadi, ujian ricih dilakukan dengan dapatan ditunjukkan dalam Jadual 4. Keputusan ujian ricih akan merekodkan kekuatan antara lapisan sampel bagi setiap orientasi. Selari dengan keputusan ujian lenturan, ujian ricih turut menunjukkan tren yang sama iaitu orientasi 0° merekodkan nilai kekuatan ricih tertinggi dengan perbezaan sebanyak 124% peningkatan berbanding 45°. Keadaan ini

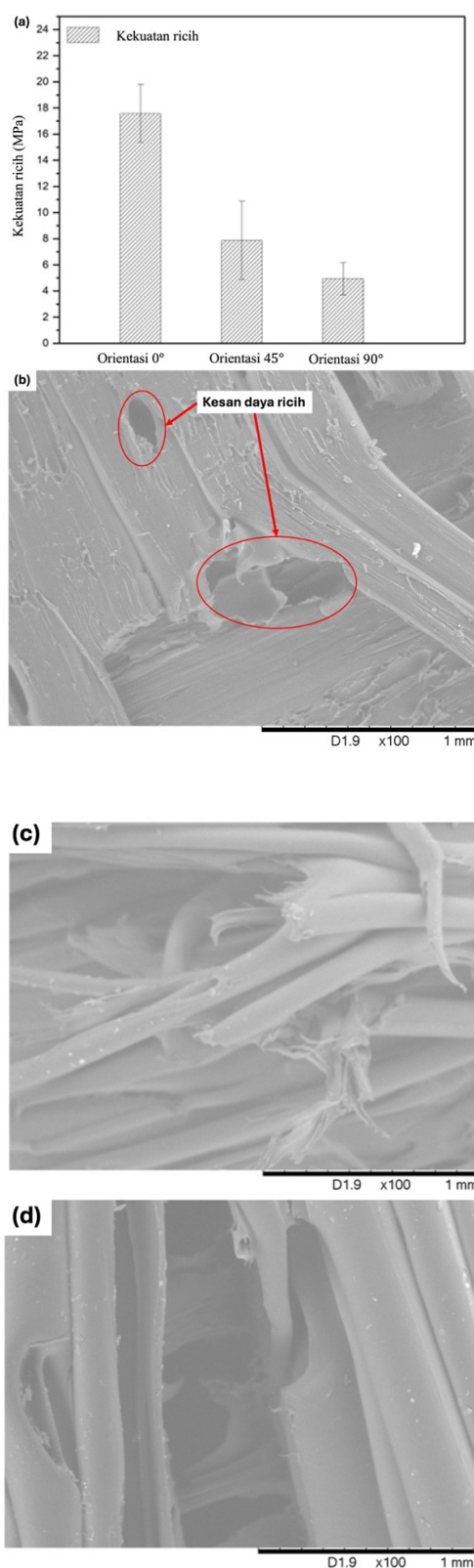
turut dilaporkan oleh kajian lepas menggunakan bahan termoplastik yang mana pada orientasi 0° bacaan nilai kekuatan ricih tertinggi kesan daripada lekatan antara lapisan yang baik berbanding pada orientasi berbeza (Hobbie et al. 2003). Walaubagaimanapun, keadaan berbeza jika dibandingkan perbezaan yang kurang ketara untuk orientasi 0° dan 45° bagi ujian lenturan. Pada ujian ricih, kekuatan ricih berkurang ada disebabkan pergerakan nozel pada hujung cetakan (*u-turn motion*) yang

mengakibatkan lekatan antara lapisan berkurang pada sudut selain 0° (Khosravani & Reinicke 2020; Radzuan et al. 2021).

Selain itu, Rajah 4(a) turut merekodkan bahawa kekuatan ricih adalah tidak konsisten pada orientasi 45° dengan bacaan ralat tertinggi. Keadaan ini adalah disebabkan oleh kecacatan pencetakan semasa proses FDM. Kecacatan ini termasuk fenomena meleding dan melengkung yang disebabkan oleh penghabluran polimer yang tidak sekata dan pengecutan isipadu semasa cetakan pada sudut berbeza dilakukan (Ghnatios & Fayazbakhsh 2022; Ramian, Ramian & Dziob 2021). Ledingan dan lengkungan menjejaskan kestabilan bentuk keseluruhan bahagian yang dicetak, menjadikannya tidak sesuai untuk aplikasi kejuruteraan yang tepat. Bagi ujian kekuatan ricih orientasi 0° mencapai keputusan terbaik dengan kekuatan interlayer 17.57 MPa, iaitu 1.233 dan 2.564 kali lebih tinggi daripada 7.869 MPa untuk orientasi 45° dan 4.931 MPa untuk orientasi 90° .

Berbeza dengan ujian kekuatan ricih, bahan epoksi biasanya digunakan sebagai agen ikatan untuk membentuk ikatan. Namun, ujian ini menggunakan proses FDM untuk mencipta lekatan antara lapisan bercetak dalam sampel. Tegasan ricih dikenakan pada sampel dengan satu hujung tetap menggunakan beban tegangan pada substrat. Dalam senario yang ideal, spesimen akan berpecah kepada tiga bahagian semasa ujian kerana simetrinya (Zhang et al. 2020). Kebanyakan sampel mengalami kegagalan yang mana keretakan hanya berlaku pada satu bahagian yang bersebelahan dengan kawasan ikatan dalam ujian sebenar. Selain itu, sesetengah sampel mempamerkan kegagalan pelekat, menunjukkan ikatan lemah antara pelekat epoksi dan permukaan substrat. Spesimen orientasi 90° jelas menunjukkan kegagalan pada lapisan pelekat kerana kekuatan ricih antara lapisan pelekat adalah lebih rendah daripada kekuatan bahan.

Rajah 4(b) menunjukkan permukaan substrat selepas diseret dalam arah tegasan antara lapisan, diedarkan secara homogen ke seluruh permukaan selepas kegagalan lapisan pelekat. Terdapat dua jenis kegagalan, retak ricih intra-lapisan, dan retak ricih antara lapisan. Urutan kegagalan ini sering diperhatikan dalam beberapa bahan berlapis dengan antara muka (Khalid et al. 2023; Zhang et al. 2020). Selain itu, kesan daya ricih hanya berlaku pada satu sisi bersebelahan dengan kawasan ikatan dalam spesimen orientasi 45° dan 90° disebabkan oleh kecacatan pada prosedur ikatan dan pencetakan atau salah jajaran apabila memasang sampel pada lekapan ujian (He, Chow & Li 2020).



RAJAH 4. (a) Graf kekuatan ricih bagi orientasi berbeza ; (b) mikrograf imej bagi orientasi permukaan 90° lapisan pelekat epoksi selepas kegagalan; (c) mikrograf imej bagi kekuatan tegangan bagi sudut orientasi 45° dan (d) 90° .

Selain itu, Rajah 4(c) dan (d) merekodkan imej mikrograf dengan kecacatan kesan daripada lekatan antara lapisan yang tidak sempurna. Perihal ini akan mengakibatkan sifat mekanik bahan poliamida menurun. Bagi sudut orientasi 90 °, bahan poliamida mengalami lopang yang lebih besar berbanding pada orientasi 45 °. Keadaan ini adalah didorong oleh tingkah laku anisotropik. Orientasi lompong boleh membawa kepada tingkah laku anisotropik, yang mana bahan mempamerkan sifat yang berbeza bergantung pada arah pemuatan (Papon & Haque 2018).

ORIENTASI PERCETAKAN TERBAIK

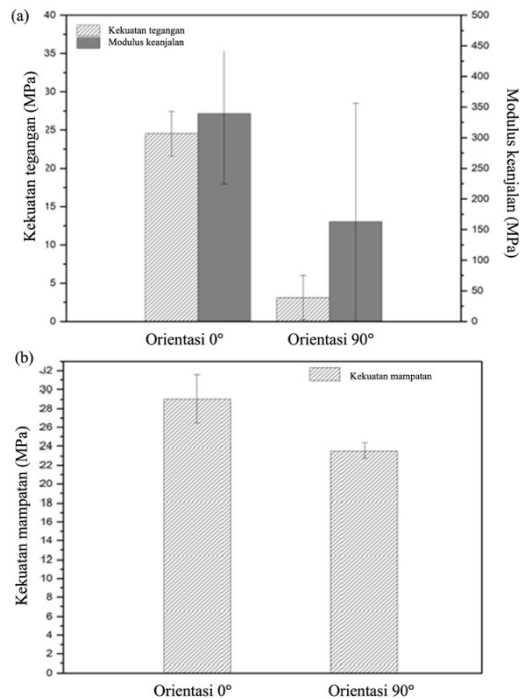
Keputusan menunjukkan bahawa orientasi 0° memberikan kualiti mekanik yang lebih baik dan lebih sedikit kecacatan semasa pencetakan berbanding dengan orientasi lain. Dapatan ini menyokong kajian terdahulu yang telah mengenal pasti orientasi 0° sebagai konfigurasi optimum (Syrlybayev et al. 2021). Bagi mengesahkan lagi penemuan ini dan membuat perbandingan menyeluruh, ujian tambahan seperti ujian tegangan dan ujian mampatan telah dijalankan. Rajah 5(a) merekodkan keputusan kekuatan tegangan dan modulus tegangan bagi orientasi 0° dan 90°.

JADUAL 4. Kekuatan ricih dan terikan orientasi 0°

Sampel	Orientasi	Kekuatan ricih pada beban maksimum (MPa)	Regangan ricih pada beban maksimum (%)
1	0°	18.5831	260.3194
2		15.8723	123.5091
3		15.5991	102.5757
4		16.8834	84.0651
5		20.9299	447.9552
Purata		17.57	203.69
1	45°	11.6818	24.8405
2		4.1776	8.2243
3		9.5731	19.2897
4		8.2846	10.2197
5		5.6257	6.6066
Purata		7.87	13.84
1	90°	4.8076	4.8630
2		4.8679	6.1246
3		4.4923	5.3919
4		6.9185	7.6006
5		3.5671	4.0596
Purata		4.93	5.61

Dalam ujian tegangan, orientasi 0° mempamerkan kekuatan tegangan muktamad tertinggi dengan purata 24.53 MPa, iaitu 6.86 kali lebih baik daripada orientasi 90° (3.12 MPa). Modulus keanjalan juga lebih tinggi untuk orientasi 0° (339.26 MPa) berbanding dengan orientasi 90° (162.7 MPa). Perbandingan dilakukan bagi kekuatan tegangan untuk pelbagai orientasi dengan sampel ABS dan didapati bahawa sampel berorientasikan pada 0° mempunyai kekuatan tertinggi pada 25.72 MPa, manakala yang

berorientasikan pada 90° mempunyai kekuatan paling lemah pada 14.56 MPa (Quill et al. 2018). Kekuatan muktamad sampel yang berorientasikan pada 90° mewakili hanya 56.23% daripada kekuatan spesimen yang berorientasikan pada 0° (Quill et al. 2018). Penemuan ini konsisten dengan penyelidikan terdahulu yang juga melihat kekuatan tegangan yang lebih tinggi dalam orientasi 0° dan kekuatan 14 hingga 20% lebih rendah dalam orientasi 90° menggunakan bahan PA12 (Pejkowski et al. 2023).



RAJAH 5. Graf (a) kekuatan tegangan dan modulus tegangan dan (b) kekuatan mampatan bagi orientasi 0° dan 90°.

Nilai tertinggi kekuatan tegangan orientasi 0° terhasil daripada orientasi lapisan selari dengan arah beban tegangan. Sebaliknya, spesimen dengan orientasi 90° menunjukkan kekuatan tegangan terendah yang dibenarkan dengan orientasi lapisan berserenjang dengan arah beban yang dikenakan (Lumpe, Mueller & Shea 2019). Delaminasi diperhatikan sebagai mod kegagalan untuk orientasi 90°, menunjukkan ikatan antara lapisan yang lemah antara lapisan bercetak. Ini membawa kepada pengurangan kekuatan dan peningkatan kerapuhan di sepanjang kawasan yang terdelamina. Sebaliknya, kegagalan kohesif menonjol dalam orientasi 0°, di mana keretakan berlaku dalam lapisan akibat pengecutan isipadu polimer semasa penyejukan (Zhou & Cui 2020).

Rajah 4(c) dan (d) melaporkan orientasi 45° juga menunjukkan kekuatan mampatan yang lebih tinggi, dengan purata 29.02 MPa berbanding 23.54 MPa untuk orientasi 90° dalam ujian mampatan. Dapatkan kajian sejajar dengan kajian terdahulu yang menunjukkan kekuatan mampatan yang lebih tinggi untuk orientasi 0° berbanding dengan orientasi 90° (Park & Ahn 2004). Struktur molekul polimer yang unik, dengan rantai yang besar dan memanjang, menyumbang kepada kekuatan mampatan yang lebih tinggi. Kehadiran kawasan kristal dalam polimer separa kristal dan rantaian rantai yang dilanjutkan menyumbang kepada sifat mampatan yang dipertingkatkan.

Kajian ini menjalankan analisis menyeluruh bahan polimer PA-12 menggunakan pelbagai teknik analisis termasuk Analisis Termogravimetrik (TGA), Kalorimetri Pengimbasan Beza (DSC dan Belauan X-ray (XRD) seperti dalam Rajah 6. Objektifnya adalah untuk menyiasat kestabilan terma, tingkah laku degradasi dan struktur kristal bahan di bawah orientasi yang berbeza.

Dalam Analisis Termogravimetrik (TGA), penurunan berat polimer PA-12 telah dikaji pada peningkatan suhu. Keputusan menunjukkan bahawa degradasi haba bahan bermula pada 382°C, dengan jumlah kehilangan berat sebanyak 99.0% untuk kedua-dua orientasi 0° dan 90°. Lengkung TGA mendedahkan dua peringkat penguraian terma, dengan penurunan berat awal dikaitkan dengan penyejukan lembapan yang diserap, gas, atau monomer yang tidak bertindak balas. Peringkat kedua mewakili kemerosotan matriks PA-12.

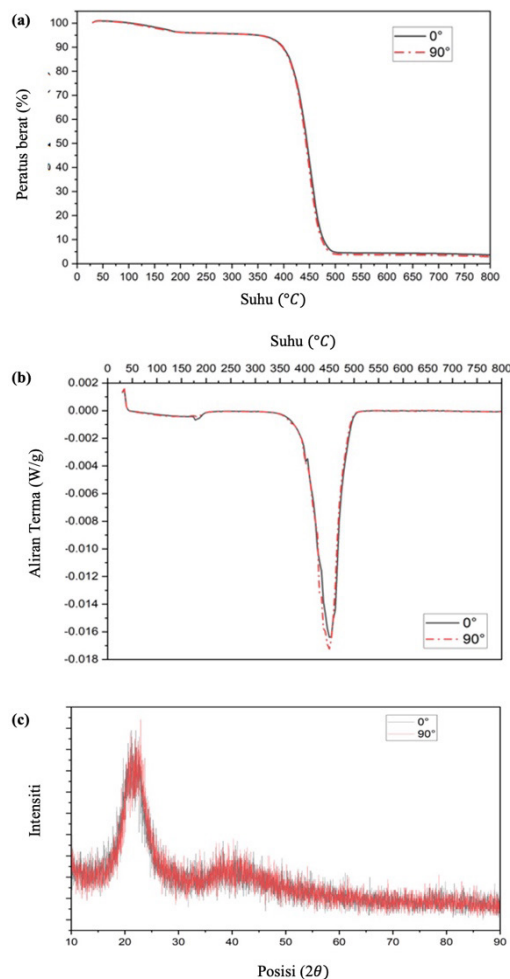
Analisis Differential Scanning Calorimetry (DSC) mendedahkan suhu lebur PA-12 iaitu 178°C untuk orientasi 0° dan 182°C untuk orientasi 90°. Lengkung DSC juga menunjukkan puncak endotermik pada suhu ini, menunjukkan peralihan bahan daripada pepejal kepada keadaan yang lebih fleksibel. Di samping itu, puncak endotermik pada 450°C menunjukkan proses pengoksidaan PA-12 untuk kedua-dua orientasi.

Analisis X-ray Direction (XRD) telah dilakukan untuk mengkaji struktur kristal dan komposisi fasa bahan PA-12. Corak XRD menunjukkan puncak pembelauan pada 21.19° untuk orientasi 0° dan 22.97° untuk orientasi 90°, mewakili satah kristalografi yang terdapat dalam kedua-dua orientasi. Walaupun terdapat perbezaan halus dalam kedudukan puncak, keputusan XRD keseluruhan menunjukkan struktur kristal dan kehabluran yang sama antara kedua-dua orientasi.

KESIMPULAN

Kajian ini berjaya menjalankan analisis komprehensif sifat mekanikal bahan poliamida menggunakan kaedah Fused Deposition Modeling (FDM). Penemuan penyelidikan menyerlahkan kesan ketara orientasi percetakan pada sifat mekanikal bahan. Orientasi 0° menunjukkan sifat mekanikal yang unggul berbanding dengan orientasi 45° dan 90°. Keputusan menunjukkan bahawa orientasi 0° mempunyai kekuatan lenturan dan modulus yang unggul, menjadikannya pilihan pilihan untuk aplikasi yang memerlukan rintangan yang sangat baik terhadap lenturan dan ubah bentuk. Orientasi 0° juga menunjukkan kekuatan ricih yang lebih tinggi dan kualiti mekanikal yang lebih baik dalam FDM. Ujian tegangan dan mampatan telah

dijalankan untuk orientasi yang berbeza dan orientasi 0° menunjukkan kekuatan tegangan, pemanjangan semasa putus serta kekuatan mampatan yang lebih tinggi berbanding dengan orientasi 90°.



RAJAH 6. a) Lengkung TGA, b) Lengkung DSC, c) Corak XRD untuk spesimen PA dengan orientasi 0° dan 90°

Dari segi penyelidikan masa depan, kajian itu mencadangkan penerokaan parameter tambahan untuk mengoptimumkan sifat mekanikal PA, seperti corak isian, ketebalan lapisan yang berbeza-beza, dan suhu cetakan. Kesan suhu dan masa ke atas ketahanan bahan di bawah tegasan malar juga boleh dikaji untuk meramalkan jangka hayat polimer dan mengenal pasti faktor yang menyumbang kepada kegagalan. Selain itu, menjalankan simulasi proses pembentukan dan membuat perbandingan dengan keputusan eksperimen boleh memberikan pemahaman yang lebih komprehensif tentang geometri yang terhasil dan mekanisme kegagalan spesimen. Tambahan pula, kajian itu mengenal pasti jurang penyelidikan dalam bidang seperti sifat mekanikal 4D, polimer memori bentuk (SMP),

dan tingkah laku poliamida selepas penyerapan air, yang boleh menjadi kawasan yang berpotensi untuk siasatan lanjut.

PENGHARGAAN

Penulis mengakui sokongan oleh Pusat Penyelidikan dan Pengurusan Instrumentasi (CRIM), Universiti Kebangsaan Malaysia, nombor geran GUP-2022-012, dan sebahagiannya oleh dana peruntukan Jabatan Kejuruteraan Mekanikal dan Pembuatan, Fakulti Kejuruteraan dan Alam Bina, UKM.

PENGISYTIHARAN KEPENTINGAN BERSAING

Tiada.

RUJUKAN

- Ahn, S.H., Montero, M., Odell, D., Roundy, S. & Wright, P.K. 2002. Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. *Rapid Prototyping Journal* 8(4): 248–257.
- Armstrong, C.D., Todd, N., Alsharhan, A.T., Bigio, D.I. & Sochol, R.D. 2021. A 3D Printed Morphing Nozzle to Control Fiber Orientation during Composite Additive Manufacturing. *Advanced Materials Technologies* 6(1).
- Farashi, S. & Vafaee, F. 2022. Effect of printing parameters on the tensile strength of FDM 3D samples: a meta-analysis focusing on layer thickness and sample orientation. *Progress in Additive Manufacturing* 7(4): 565–582.
- Fateixa, S., Landauer, M., Schneider, J., Kumar, S. & Böhm, R. 2023. Additive Manufacturing-Enabled Architected Nanocomposite Lattices Coated with Plasmonic Nanoparticles for Water Pollutants Detection. *Macromolecular Materials and Engineering* 308(8).
- Ghnatios, C. & Fayazbakhsh, K. 2022. Warping estimation of continuous fiber-reinforced composites made by robotic 3D printing. *Additive Manufacturing* 55: 102796.
- Giri, J., Chiwande, A., Gupta, Y., Mahatme, C. & Giri, P. 2021. Effect of process parameters on mechanical properties of 3d printed samples using FDM process. *Materials Today: Proceedings* 47: 5856–5861.
- González-Henríquez, C.M., Sarabia-Vallejos, M.A. & Rodríguez-Hernández, J. 2019. Polymers for additive manufacturing and 4D-printing: Materials, methodologies, and biomedical applications. Elsevier Ltd.:
- He, L., Chow, W.T. & Li, H. 2020. Effects of interlayer notch and shear stress on interlayer strength of 3D printed cement paste. *Additive Manufacturing* 36.

- Hobbie, E.K., Wang, H., Kim, H., Lin-Gibson, S. & Grulke, E.A. 2003. Orientation of carbon nanotubes in a sheared polymer melt. *Physics of Fluids (1994-present)* 15(5): 1196–1202.
- Kakanuru, P. & Pochiraju, K. 2020. Moisture Ingress and Degradation of Additively Manufactured PLA, ABS and PLA/SiC Composite Parts. *Additive Manufacturing* 36.
- Khalid, N.N., Awang Adi, F.Z., Mohd Radzuan, N.A. & Sulong, A.B. 2023. Shear Test Characterization of 3D Printed Polyamide Reinforced Carbon Fiber Composites. *Jurnal Kejuruteraan* 35(2): 431–436.
- Khalid, N.N., Mohd Radzuan, N.A., Sulong, A.B., Mohd Foudzi, F. & Hui, D. 2022. Adhesion behaviour of 3D printed polyamide-carbon fibre composite filament. *Reviews on Advanced Materials Science* 61(1): 838–848.
- Khosravani, M.R. & Reinicke, T. 2020. Effects of raster layup and printing speed on strength of 3D-printed structural components. *Procedia Structural Integrity* 28: 720–725.
- Letcher, T. 2016. Imece2014-39379 Material Property Testing of 3D-Printed Specimen. *Proceedings of the ASME 2014 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*: 1–8.
- Lumpe, T.S., Mueller, J. & Shea, K. 2019. Tensile properties of multi-material interfaces in 3D printed parts. *Materials and Design* 162: 1–9.
- Ngo, T.D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K.T.Q. & Hui, D. 2018. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering* 143(December 2017): 172–196.
- Ning, F., Cong, W., Qiu, J., Wei, J. & Wang, S. 2015. Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling. *Composites Part B: Engineering* 80: 369–378.
- Papon, E.A. & Haque, A. 2018. Tensile properties, void contents, dispersion and fracture behaviour of 3D printed carbon nanofiber reinforced composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 37(6): 381–395.
- Park, K. & Ahn, J.H. 2004. Design of experiment considering two-way interactions and its application to injection molding processes with numerical analysis. *Journal of Materials Processing Technology* 146(2): 221–227.
- Pejkowski, Ł., Seyda, J., Nowicki, K. & Mrozik, D. 2023. Mechanical performance of non-reinforced, carbon fiber reinforced and glass bubbles reinforced 3D printed PA12 polyamide. *Polymer Testing* 118.
- Polyzos, E., Katalagarianakis, A., Van Hemelrijck, D. & Pyl, L. 2021. Delamination analysis of 3D-printed nylon reinforced with continuous carbon fibers. *Additive Manufacturing* 46.
- Quill, T.J., Smith, M.K., Zhou, T., Baioumy, M.G.S., Berenguer, J.P., Cola, B.A., Kalaitzidou, K. & Bougher, T.L. 2018. Thermal and mechanical properties of 3D printed boron nitride – ABS composites. *Applied Composite Materials* 25(5): 1205–1217.
- Radzuan, N.A.M., Sulong, A.B., Verma, A. & Muhamad, N. 2021. Layup sequence and interfacial bonding of additively manufactured polymeric composite: A brief review. De Gruyter Open Ltd.:
- Ramian, J., Ramian, J. & Dziob, D. 2021. Thermal deformations of thermoplast during 3D printing: Warping in the case of ABS. *Materials* 14(22).
- Rijckaert, S., Daelemans, L., Cardon, L., Boone, M., Van Paepegem, W. & De Clerck, K. 2022. Continuous Fiber-Reinforced Aramid/PETG 3D-Printed Composites with High Fiber Loading through Fused Filament Fabrication. *Polymers* 14(2).
- Syrlybayev, D., Zharylkassyn, B., Seisekulova, A., Akhmetov, M., Perveen, A. & Talamona, D. 2021. Optimisation of strength properties of FDM printed parts—A critical review. MDPI AG.:
- Tang, C., Liu, J., Yang, Y., Liu, Y., Jiang, S. & Hao, W. 2020. Effect of process parameters on mechanical properties of 3D printed PLA lattice structures. *Composites Part C: Open Access* 3.
- Tavassoli, S., Brandt, M., Qian, M., Arenius, P., Kianian, B., Diegel, O., Mention, A.L., Cole, I., Elghitany, A. & Pope, L. 2020. Adoption and Diffusion of Disruptive Technologies: The Case of Additive Manufacturing in Medical Technology Industry in Australia. *Procedia Manufacturing*, hlm. 18–24. Elsevier B.V.:
- Todoroki, A., Oasada, T., Ueda, M., Matsuzaki, R. & Hirano, Y. 2021. Reinforcing in the lay-up direction with self-heating for carbon fiber composites fabricated using a fused filament fabrication 3D printer. *Composite Structures* 266: 113815.
- White, K.L. & Sue, H.J. 2012. Delamination toughness of fiber-reinforced composites containing a carbon nanotube/polyamide-12 epoxy thin film interlayer. *Polymer* 53(1): 37–42.
- Yadav, D., Chhabra, D., Kumar Garg, R., Ahlawat, A. & Phogat, A. 2020. Optimization of FDM 3D printing process parameters for multi-material using artificial neural network. *Materials Today: Proceedings*, hlm. 1583–1591. Elsevier Ltd.:
- Yang, J., Sun, Y., Zhang, J., Feng, C., Chen, X. & Bai, L. 2023. Interpenetrating phase composite graded lattice structure integrated with load-bearing and sensing capabilities. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 164.
- Yao, T., Deng, Z., Zhang, K. & Li, S. 2019. A method to predict the ultimate tensile strength of 3D printing polylactic acid (PLA) materials with different printing orientations. *Composites Part B: Engineering* 163(January): 393–402.

- Yuan, S., Shen, F., Chua, C.K. & Zhou, K. 2019. Polymeric composites for powder-based additive manufacturing: Materials and applications. Elsevier Ltd.
- Zhang, H., Dickson, A.N., Sheng, Y., McGrail, T., Dowling, D.P., Wang, C., Neville, A. & Yang, D. 2020. Failure analysis of 3D printed woven composite plates with holes under tensile and shear loading. *Composites Part B: Engineering* 186.
- Zhou, P. & Cui, T. 2020. Enhanced photocatalytic efficiency by layer-by-layer self-assembly of graphene and titanium dioxide on shrink thermoplastic film. *Microsystem Technologies* 26(12): 3793–3798.