

Kesan Ketebalan Lapisan Cetakan Polylactic Acid Pukal melalui Pemodelan Pemendapan Tertertu terhadap Prestasi Mekanikal: Kajian Perbandingan bagi Keadaan Suhu Tinggi

(Printing Layer Thickness Effect of Bulk Polylactic Acid via Fused Deposited Modeling On Mechanical Performance: Comparitive Study For High Temperature Condition)

Nabilah Afifah Mohd Radzuan^{a,b*}, Iswaran Subrain^a, Farhana Mohd Foudzi^a, Abu Bakar Sulong^{a,b}

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

^b*Fuel Cell Institute, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 UKM Bangi, Selangor, Malaysia.*

*Corresponding author: afiqah@ukm.edu.my

Received 16 August 2024, Received in revised form 22 July 2025
 Accepted 22 August 2025, Available online 30 January 2026

ABSTRAK

Permodelan Pemendapan Bersatu (FDM) merupakan teknologi pencetakan 3D yang selalu menggunakan bahan polimer termoplastik dan dipengaruhi oleh beberapa parameter seperti ketebalan lapisan. Ketebalan lapisan ini dapat diubah melalui paksi Z semasa mencantumkan lapisan demi lapisan. Namun, peningkatan ketebalan lapisan PLA sebanyak 0.1mm hingga 0.3mm menyebabkan penurunan sifat mekanikal disebabkan oleh peningkatan kitaran pemanasan dan penyejukan yang mengakibatkan pengumpulan tegasan sisa. Kesan ketebalan cetakan dapat dikaji dengan pencetakan sampel PLA dengan berbeza ketinggian lapisan (0.1mm, 0.2mm, 0.3mm) dan dikaji melalui ujian impak. Hasilnya, ketebalan lapisan 0.1mm merekodkan purata kekuatan impak yang tertinggi sebanyak 29.48 J/m dan menunjukkan penurunan purata kekuatan impak sebanyak 13.41%. Selain itu, peningkatan suhu juga mengurangkan prestasi mekanikal bahan PLA disebabkan sifat haba yang rendah. Oleh itu, sampel bagi ujian tegangan, lenturan dan mampatan dicetak dengan ketebalan lapisan 0.1mm dan diuji dengan suhu yang berbeza (30°C, 55°C, 80°C). Hasil ujian tegangan, lenturan dan mampatan menunjukkan bahawa sampel pada suhu 30°C menunjukkan purata kekuatan yang tertinggi sebanyak 38.777MPa, 82.917MPa dan 69.059MPa berbanding dengan sampel pada suhu 55°C dan 80°C serta menunjukkan penurunan purata modulus sebanyak 98.63%, 100% dan 98.80% dari suhu 30°C ke 80°C. Dapat disimpulkan bahawa ketebalan 0.1mm dipilih sebagai ketebalan lapisan yang terbaik berbanding dengan 0.2mm dan 0.3mm dan sampel pada 30°C mencapai kekuatan tegangan, lenturan dan mampatan yang tertinggi berbanding dengan 55°C dan 80°C.

Kata kunci: Pemodelan Pemendapan Bersatu (FDM); Polilaktik asid(PLA); ketebalan lapisan

ABSTRACT

Fused Deposition Modeling (FDM) as a 3D printing technology using thermoplastic polymer materials, influenced by parameters such as layer thickness. This thickness can be adjusted via the Z-axis during layer-by-layer deposition. However, increasing PLA layer thickness from 0.1mm to 0.3mm results in reduced mechanical properties due to increased heating and cooling cycles leading to residual stress accumulation. The effect of layer thickness was examined by printing PLA samples at different layer heights (0.1mm, 0.2mm, 0.3mm) and assessing them through impact testing. Results showed that a 0.1mm layer thickness recorded the highest average impact strength at 29.48 J/m and exhibited a 13.41% decrease in average impact strength compared to 0.2mm and 0.3mm layer thicknesses. Additionally, increased temperature also decreases the mechanical performance of PLA due to its

low heat resistance. Therefore, samples for tensile, flexural, and compression testing were printed with a 0.1mm layer thickness and tested at different temperatures (30°C, 55°C, 80°C). The tensile, flexural, and compression test results indicated that samples at 30°C demonstrated the highest average strength values of 38.777 MPa, 82.917 MPa, and 69.059 MPa, respectively, compared to samples at 55°C and 80°C, showing decreases of 98.63%, 100%, and 98.80% from 30°C to 80°C. In conclusion, a 0.1mm layer thickness was identified as the best layer thickness compared to 0.2mm and 0.3mm, while samples at 30°C exhibited the highest tensile, flexural, and compressive strengths compared to 55°C and 80°C.

Keywords: Fused Deposition Modeling (FDM); Polylactic Acid (PLA); layer thickness;

PENGENALAN

Terdapat anggaran jumlah 9 bilion tan pengeluaran plastik dan hanya 9-10% sahaja dikitar semula, 12% bilangan plastik dibakar dan 78 – 79% bilangan terkumpul di persekitaraan seperti laut, tasik dan sungai tanpa mempunyai tapak pembuangan yang sistematik (Balla et al. 2021). Pada tahun 2018, pengeluaran plastik telah mencecah 359 juta pengeluaran global yang tertinggi walaupun pencemaran plastik meningkat setiap tahun (Chinthapalli et al. 2019). Pencemaran alam sekitar ini dapat diatasi dengan menghasilkan polimer menggunakan sumber yang boleh diperbaharui seperti tumbuh-tumbuhan. Ia dapat mengurangkan pengeluaran polimer yang diperbuat daripada petroleum (Balla et al. 2021).

Bioplastik yang mempunyai pengeluaran yang tertinggi adalah Polilaktik asidpolilaktik asid(PLA) iaitu sebanyak 31.0% berbanding dengan biopolimer yang lain dan juga dikenali sebagai '*Polymer of the 21st century*' (Balla et al. 2021; Pretula, Slomkowski & Penczek 2016). Tambahan pula, Polilaktik asidPLA menggunakan teknologi pembuatan aditif iaitu diproses melalui Pemodelan Pemendapan Bersatu, '*Fused Deposition Modeling*', (FDM) yang beroperasi dengan mencantumkan lapisan demi lapisan yang berturut-turut (Corapi et al. 2019). Penghasilan bahan komposit ini penting bagi aplikasi seperti robotik atau *meta-materials* yang kebanyakannya digunakan pada teknologi cetakan-4D.

Proses ini dikategorikan dalam pencetakan 3 dimensi yang memerlukan perisian menghiris seperti '*CURA*' untuk menjana '*G-Code*' dan menghasilkan produk tertentu (Giri et al. 2021). Pencetakan FDM ini selalu digunakan untuk kesemua polimer terutamanya PLA Polilaktik asid dengan kuantiti yang tertinggi sebanyak 86% berbanding dengan bahan polimer lain seperti nilon. Terdapat beberapa parameter FDM boleh diubah mengikut permintaan pelanggan termasuk ketebalan lapisan. Ketebalan lapisan dapat diubah melalui paksi-z semasa mencantumkan lapisan demi lapisan (Sandanamsamy et al. 2023).

Ketebalan lapisan merupakan parameter yang penting untuk mengelakkan masalah seperti meleding yang mengurangkan kualiti pencetakan bahan PLA (Stojković et al. 2023). Di samping itu, ketebalan lapisan yang selalu

digunakan ialah antara 0.1 mm dan 0.3 mm dan peningkatan dalam bilangan lapisan memberi kelekatan lapisan yang baik (Cojocar et al. 2022). Hasil kajian Kholil et al. (2022) melaporkan bahawa ketebalan lapisan bahan PLA pada 0.1 mm mencatatkan kekuatan impak tertinggi iaitu 0.049 J/mm² berbanding dengan ketinggian lapisan 0.2 mm dan 0.3 mm. Hasil kajian ini memaparkan bahawa peningkatan pada ketebalan lapisan PLA menyebabkan penurunan pada sifat mekanikal. Masalah ini berlaku apabila peningkatan dalam ketebalan lapisan menyebabkan peningkatan dalam kitaran pemanasan dan penyejukan yang akhirnya menyumbang kepada pengumpulan tegasan sisa. Perkara ini akan mengakibatkan keretakan antara lapisan dan penyahlaminaasi pada bahagian sehingga mengurangkan kekuatan bahan spesimen (Panda et al. 2017).

Penggunaan bahan PLA pada suhu berbeza memberi kesan yang berbeza terhadap prestasi mekanikal. Menurut kajian Grasso et al. (2018), ujian tegangan dijalankan pada suhu yang berbeza iaitu pada 20 °C telah merekodkan kekuatan tegangan yang tertinggi sebanyak 45 MPa berbanding dengan suhu lain. Ini menunjukkan struktur kristal ini mengalami perubahan pada suhu yang tinggi dan mengurangkan prestasi mekanikal PLA. Oleh itu, penggunaan PLA pada suhu lebih 60 °C adalah terhad disebabkan sifat haba yang rendah (Wu, Misra & Mohanty 2019).

Justeru itu, kajian ini akan menentukan ketebalan lapisan PLA Tulen yang terbaik antara berbeza ketinggian lapisan 0.1 mm, 0.2 mm dan 0.3 mm melalui ujian impak. Selepas menentukan ketebalan lapisan yang terbaik, akan mengkaji prestasi mekanikal PLA Tulen melalui ujian tegangan, lenturan dan mampatan pada suhu berbeza iaitu pada 30 °C, 55 °C dan 80 °C.

METODOLOGI

BAHAN DAN ALATAN

Pencetakan sampel PLA ini menggunakan proses Pemodelan Pemendapan Bersatu, FDM secara lapisan demi lapisan. Kajian ini menggunakan granula. Parameter penghasilan filamen PLA menggunakan mesin '*3devo*' dan

parameter untuk pencetakan sampel PLA menggunakan mesin FUNMAT HT adalah ditunjukkan dalam Jadual 1. Selain itu, perisian menghiris seperti ‘INTAMSYS’ digunakan untuk menetapkan parameter sampel sebelum dicetak menggunakan mesin pencetakan FUNMAT HT.

JADUAL 1. Parameter untuk fabrikasi filamen PLA menggunakan mesin ‘3devo’ dan pencetakan sampel PLA menggunakan mesin FUNMAT HT

	Ciri-ciri	Spesifikasi
Filamen PLA	Tempoh pengeringan	12 jam pada suhu 50°C
	Zon haba penyemperit 1	170°C
	Zon haba penyemperit 2	190°C
	Zon haba penyemperit 3	190°C
	Zon haba penyemperit 4	170°C
	Kelajuan putaran penyemperit	5 rpm
Pencetakan filamen	Suhu muncung	240°C
	Suhu landasan	65°C
	Suhu bilik	35°C
	Kelajuan kipas	100%

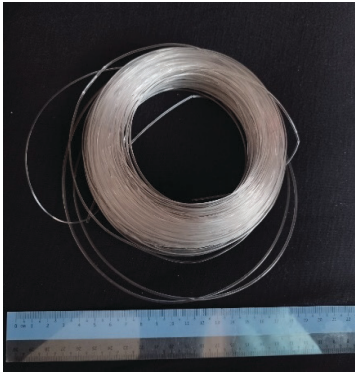
Ujian impak dijalankan ke atas 15 sampel polilaktik asid(PLA) dengan ketinggian lapisan berbeza iaitu 0.1 mm, 0.2 mm dan 0.3 mm bagi menentukan ketebalan lapisan terbaik. Ujian dijalankan menggunakan kaedah impak Izod mengikut piawaian ASTM 256 dengan menggunakan Mesin *Polymer Impact Tester* yang ditunjukkan dalam Rajah 1(a). Jadual 2 juga menunjukkan parameter yang digunakan untuk melakukan ujian ini.



(a)



(b)



(c)

RAJAH 1. Mesin (a) *Polymer Impact Tester*; (b) Ujian kekuatan tegangan, mampatan dan lenturan menggunakan alatan *Universal Testing Machine, Instron 3365 30kN* dan (c) filamen PLA yang dihasilkan daripada PLA (granula).

JADUAL 2. Parameter ujian impak, lenturan, mampatan dan tegangan untuk sampel PLA

	Parameter	Nilai
Ujian impak	Lebar	12.70 mm
	Tebal	10.16 mm
	Kelajuan impak	3.46 m/s
	Kapasiti	5.5 J
	Sudut ujian	150°
Lenturan	Kelajuan	4.5 mm/min
	Rentang sokongan	120 mm
	Tebal	3.5 mm
	Lebar	12.7 mm
	Beban	30 kN
	Tebal	3.0 mm
Tegangan	Lebar	13 mm
	Panjang	98 mm
	Kelajuan	6 mm/min
	Beban	30 kN
Mampatan	Kelajuan	2.5 mm/min
	Diameter	12.7 mm
	Terikan mampatan maksimum	0.5 mm/mm

Bagi ujian tegangan, lenturan dan mampatan dijalankan pada suhu 30 °C, 55 °C dan 80 °C mengikut piawaian ASTM D638, ASTM D790 dan ASTM D695. Ujian ini melibatkan 27 sampel dengan menggunakan ketebalan lapisan terbaik dan menggunakan Universal Testing Machine, Instron 3365 30kN seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 1(b).

SIFAT FIZIKAL

Pengimbasan Mikroskop Elektron (SEM) menggunakan mesin SEM model Hitachi Tabletop Microscope TM-1000 dan mengikut ASTM E986-04. Selain itu, ujian ketumpatan turut dilakukan untuk mengkaji perubahan fizikal antara sampel PLA dan menggunakan ASTM D 792-20 serta alatan yang digunakan ialah model Sartorius BSA224S-CW.

SIFAT MEKANIKAL

Kajian Kalorimetri Pengimbasan Berbeza (DSC) dilakukan untuk mengkaji analisis haba apabila sifat fizikal bahan polimer berubah. Analisis ini menggunakan ASTM D3418-15 dan alat pengujian adalah termogravimetrik (TGA) model Mettler Toledo. Seterusnya, analisis TGA dijalankan untuk mengkaji perubahan jisim dari masa ke masa semasa sampel dipanaskan dengan kadar 5 °C/min. Analisis TGA

ini menggunakan ASTM E1131-08 untuk mendapatkan graf peratus berat melawan suhu penguraian diperolehi supaya dapat menganalisis suhu degradasi bahan.

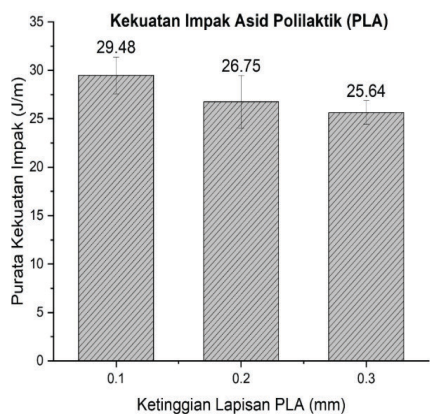
PENGHASILAN FILAMEN POLILAKTIK ASID(PLA)

Pada peringkat permulaan, PLA berbentuk granula digunakan untuk menghasilkan filamen PLA menggunakan mesin ‘3devo’. Seterusnya, PLA granula tersebut menjalani proses pengeringan selama 12 jam pada suhu 50 °C dalam ketuhar kering model Protech FSD-380. Kemudian, PLA granula tersebut disalurkan dalam corong mesin ‘3devo’ dan menjalani proses penghasilan filamen menggunakan kaedah penyemperitan. Parameter yang dipaparkan dalam Jadual 1 dan keputusan data TGA adalah sebagai titik rujukan. Selepas menjalani beberapa pelarasan pada parameter tersebut, akhirnya dapat menghasilkan filamen yang sempurna seperti dalam Rajah 1(c) dan parameter Kritikal ditetapkan di zon haba penyemperitan 1 dengan nilai suhu ditetapkan 156 °C. Tujuan pelarasan suhu dijalankan adalah bagi membolehkan kesemua lembapan dinyahkan serta granula PLA dapat mencair dengan sempurna ketika penyemperitan dilakukan.

KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

KEKUATAN IMPAK

Ujian impak adalah ujian yang mengukur rintangan bahan terhadap beban hentaman dan sesuai untuk mengkaji ketebalan lapisan yang berbeza terhadap sampel PLA (Kholil et al. 2022). Rajah 2 merekodkan ketinggian lapisan 0.1 mm menunjukkan kekuatan impak yang tertinggi sebanyak 29.48 J/m berbanding dengan ketinggian lapisan pada 0.2 mm dan 0.3 mm. Ini menunjukkan apabila ketinggian lapisan meningkat, kekuatan impak berkurang sebanyak 13.41% dari 0.1 mm ke 0.3 mm ketebalan lapisan. Menurut kajian Fadhil Abbas, Mohammad Othman & Basil Ali (2018), menunjukkan ketebalan lapisan 0.1 mm mencatat kekuatan impak yang tertinggi sebanyak 16.7 kJ/m dan penurunan kekuatan impak sebanyak 16.77% dari ketebalan lapisan 0.1 mm ke 0.3 mm. Habeeb et al. (2020), turut melaporkan tren keputusan sama iaitu sampel pada ketinggian lapisan 0.1 mm merekodkan kekuatan impak yang tertinggi sebanyak 237.513 J/m dan penurunan kekuatan impak sebanyak 30.49% dari ketebalan lapisan 0.1 mm ke 0.3 mm.



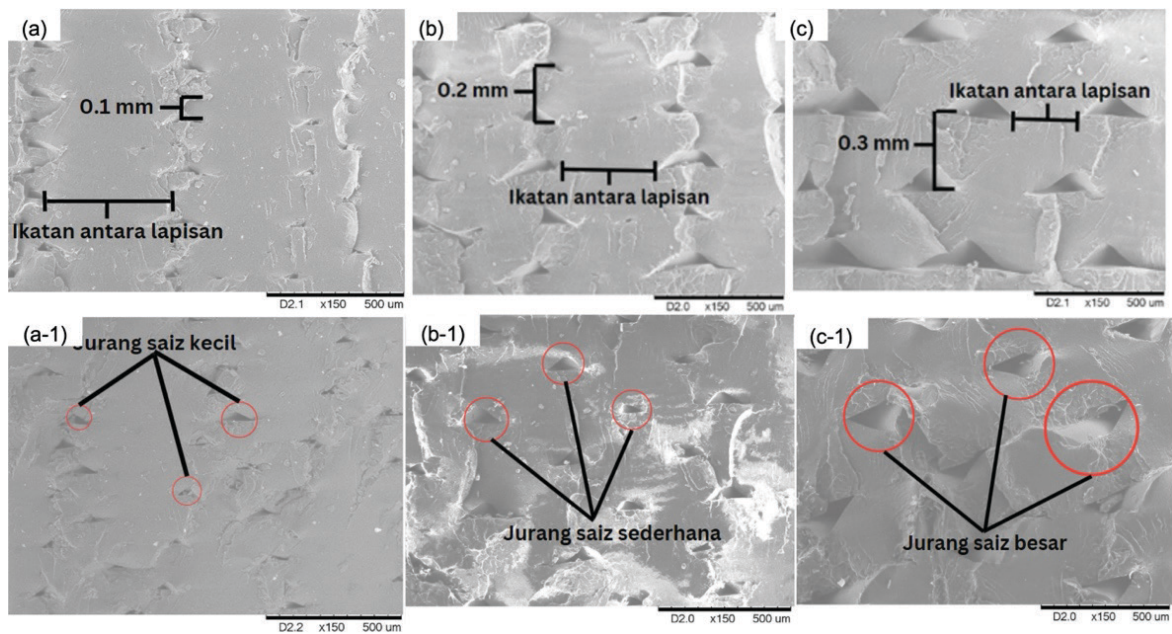
RAJAH 2. Kekuatan impak Polilaktik asid

Perihal ini menunjukkan apabila ketebalan lapisan meningkat, ikatan antara lapisan dan kekuatan hentaman akan berkurang (Kholil et al. 2022). Selain itu, sampel yang kurang tebal seperti 0.1 mm akan mengambil lebih banyak masa untuk pencetakkan berbanding dengan ketinggian lapisan yang tebal seperti 0.2 mm dan 0.3 mm mendorong wujudnya lompong antara lapisan ketika cetakan dilakukan. Oleh itu, sampel dengan ketinggian lapisan 0.1 mm akan sentiasa kekal lebih lama di atas suhu lebur yang membantu meningkatkan ikatan antara lapisan (Wang, Gramlich &

Gardner 2017). Tambahan pula, ketinggian lapisan 0.1 mm memerlukan lebih banyak lapisan untuk mencetak sampel. Hal ini mewujudkan lebih banyak peluang untuk memanaskan semula ikatan lapisan asas dan mengelakkan berlakunya lompong kesan daripada penyejukan tidak sekata antara lapisan (Abbott et al. 2018). Oleh itu, peresapan meningkatkan lekatan antara dua lapisan polimer dan menjadikan permukaan antara lapisan yang stabil (Hashemi Sanatgar, Campagne & Nierstrasz 2017).

Analisa permukaan melalui imej mikroskop dilakukan pada sampel impak dengan ketinggian lapisan berbeza iaitu 0.1 mm, 0.2 mm dan 0.3 mm sepeerti ditunjukkan dalam Rajah 3. Ketinggian lapisan pada 0.1 mm mempunyai ikatan lapisan yang paling baik dengan jumlah lubang atau poros yang paling kurang berbanding dengan ketinggian lapisan 0.2 mm dan 0.3 mm. Diperhatikan apabila ketebalan lapisan meningkat, ikatan antara lapisan semakin jelas dan lubang atau poros semakin jelas kelihatan seperti ditunjukkan dalam Rajah 3(c).

Rajah 3(a-1) hingga Rajah 3(c-1) jelas menunjukkan saiz jurang menjadi besar dari sampel ketinggian lapisan 0.1mm ke 0.3mm. Kehadiran jurang yang besar ini menunjukkan bahawa ketinggian lapisan 0.3mm mempunyai daya pelekat yang sangat rendah berbanding dengan sampel ketinggian lapisan 0.1mm dan 0.2mm (Agaliotis et al. 2022).



RAJAH 3. Perbandingan ikatan antara lapisan dan saiz lubang atau poros pada sampel (a) dan (a-1) 0.1mm, (b) dan (b-1) 0.2mm, (c) dan (c-1) 0.3mm

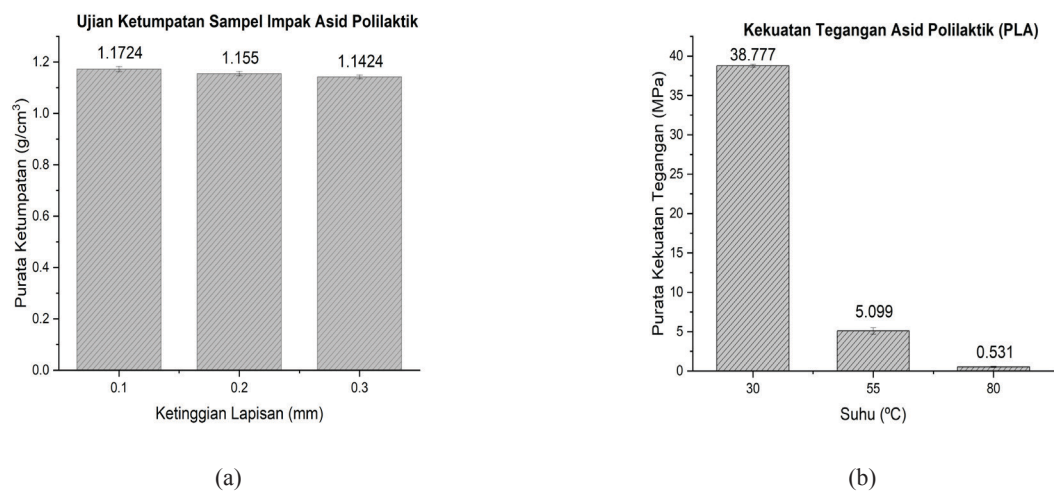
Bukan itu sahaja, ujian ketumpatan turut dilakukan untuk mengkaji prestasi mekanikal sampel impak bahan PLA mengikut ketebalan lapisan. Ujian ketumpatan ini menggunakan prinsip Archimedes dan menetapkan ketumpatan air, pada suhu 30°C. Rajah 4(a), sampel dengan ketinggian lapisan pada 0.1 mm mempunyai ketumpatan yang tertinggi iaitu 1.1724g/cm³ dan penurunan sebanyak 2.56% dari ketebalan 0.1 mm ke 0.3 mm. Keputusan ini memaparkan bahawa 0.1 mm mempunyai bilangan lapisan dalam sampel yang banyak berbanding dengan 0.2 mm dan 0.3 mm. Hal ini menyebabkan purata ketumpatan tertinggi dan penyerapan tenaga juga akan meningkat (Kholil et al. 2022).

Sampel pada ketinggian lapisan 0.1 mm mempunyai penyerapan tenaga yang tertinggi dan dipilih sebagai ketinggian lapisan yang terbaik berbanding dengan sampel ketinggian lapisan 0.2 mm dan 0.3 mm. Tiga sampel diuji untuk setiap suhu dan Rajah 4(b) menunjukkan keputusan ujian tegangan sampel PLA. Hasil dapatan ini menunjukkan

bahawa peningkatan suhu ujian tegangan telah menyebabkan kekuatan tegangan PLA menurun. Pada suhu 30°C, sampel PLA mencatat kekuatan tegangan yang tertinggi sebanyak 38.77 MPa dan penurunan kekuatan tegangan sebanyak 98.63% dari suhu 30 °C ke 80 °C.

Menurut kajian Grasso et al. (2018), pada suhu 20 °C mencatat kekuatan tegangan yang tertinggi sebanyak 46 MPa berbanding dengan suhu lain iaitu pada 30 °C, 40 °C, 50 °C dan 60 °C dan menunjukkan penurunan kekuatan tegangan sebanyak 93.48%. Kedua-dua hasil keputusan ini menjelaskan bahawa kekuatan tegangan berkurang apabila suhu meningkat.

Selepas menentukan ketinggian lapisan yang terbaik iaitu 0.1 mm, sampel bagi ujian tegangan, lenturan dan mampatan dicetak dengan ketinggian lapisan 0.1 mm menggunakan filamen pasaran. Tambahan pula, sampel untuk ujian mampatan dicetak lagi dengan menggunakan filamen kajian ini kerana mempunyai masa yang pendek dan masalah seperti meleding.



RAJAH 4. Keputusan (a) ujian Ketumpatan dan (b) Kekuatan tegangan PLA dengan suhu berbeza

KEPUTUSAN UJIAN LENTURAN POLILAKTIK ASID (PLA) DENGAN BERBEZA SUHU

Rajah 5(a) menunjukkan keputusan kekuatan lenturan PLA yang diuji dengan berbeza suhu. Merujuk kepada Rajah 5(a), ia menjelaskan bahawa kekuatan lenturan mencatatkan nilai yang tertinggi sebanyak 82.917 MPa pada suhu 30 °C berbanding dengan 55°C dan 80°C dan penurunan kekuatan lenturan sebanyak 100% dari suhu 30°C ke 80 °C. Merujuk kajian Charasseangpaisarn Taksid, Wiwatwarrapan Chairat & Srimaneepong Viritpon (2022), pada suhu 25 °C mencatat kekuatan lenturan tertinggi sebanyak 2763.59 MPa dan semakin menurun dari suhu 25°C ke 55 °C dan penurunan sebanyak 100%. Pada suhu 80 °C tidak

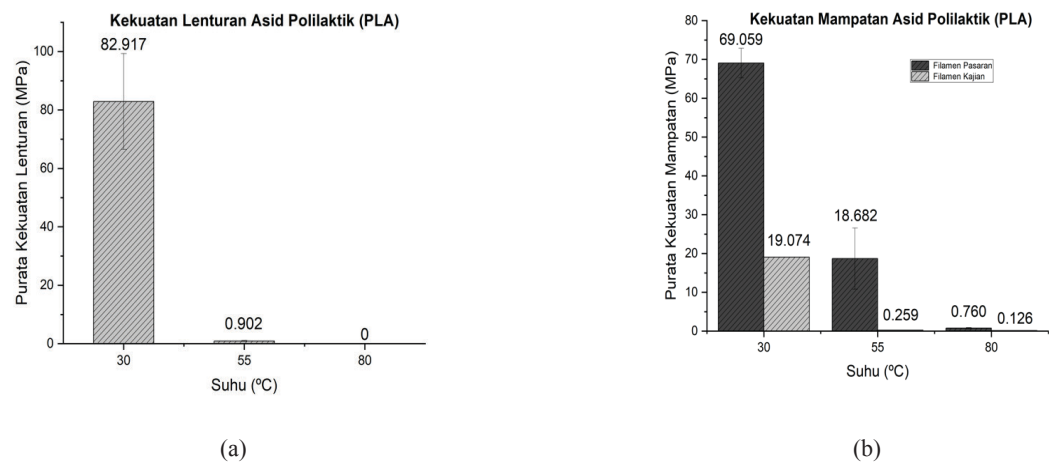
mendapat bacaan kerana sampel menjadi terlalu elastik dan jatuh dari jig semasa proses pemanasan.

Ujian mampatan diuji dengan dua kumpulan sampel yang berbeza iaitu sampel yang diperbuat daripada filamen pasaran dan sampel yang diperbuat daripada filamen kajian. Rajah 5(b) menunjukkan keputusan kekuatan mampatan PLA bagi kedua-dua sampel PLA yang diperbuat daripada filamen pasaran dan filamen kajian, Sampel yang diperbuat daripada filamen pasaran mencatatkan purata kekuatan mampatan yang tertinggi sebanyak 69.059 MPa berbanding dengan sampel pada 55 °C dan 80 °C dan penurunan sebanyak 98.8% dari suhu 30 °C ke 80 °C. Menurut kajian Chen et al. (2022), sampel pada 30 °C mencapai kekuatan mampatan yang tertinggi sebanyak 2234.13 N berbanding

dengan 40 °C dan 50 °C dan mencapai penurunan kekuatan mampatan sebanyak 57.08%.

Tambahan pula, sampel yang diperbuat daripada filamen kajian memaparkan keputusan yang sama iaitu sampel pada 30 °C mencapai purata kekuatan mampatan yang tertinggi sebanyak 19.074 MPa berbanding dengan suhu 55 °C dan 80 °C dan menunjukkan penurunan sebanyak 99.34% dari suhu 30 °C ke 80 °C. Seterusnya, sampel daripada filamen pasaran menunjukkan kekuatan mampatan yang tertinggi dalam setiap suhu berbanding

dengan sampel daripada filamen kajian. Hal ini kerana, sampel daripada filamen kajian ini mempunyai pemadatan yang rendah disebabkan oleh gelembung udara atau pertindihan yang tidak mencukupi antara filamen yang menyebabkan jurang. Bukan itu sahaja, semasa penghasilan filamen PLA, ia menghasilkan geseran dengan dinding yang meningkatkan aliran turbulensi yang menyumbang kepada pengambilan udara. Kejadian ini meningkatkan pengambilan buih yang banyak dan menyebabkan gelembung udara antara lapisan (Valerga et al. 2018).



RAJAH 5. Kekuatan lenturan PLA dengan suhu berbeza dan (b) Kekuatan mampatan PLA dengan suhu berbeza.

RINGKASAN DAN PENJELASAN TERHADAP PENGARUH SUHU TERHADAP PRESTASI MEKANIKAL BAHAN PLA

Keputusan daripada ujian tegangan, lenturan dan mampatan menunjukkan hasil pengeluaran yang sama iaitu sampel pada 30 °C menunjukkan kekuatan tegangan, lenturan dan mampatan yang tertinggi berbanding dengan sampel pada 55 °C dan 80 °C. Rajah 6(a) menunjukkan kadar penurunan kekuatan tegangan, lenturan dan mampatan dari suhu 30 °C ke 80 °C.

JADUAL 3. Kadar kekuatan penurunan mengikut ujian mekanik

Ujian	Penurunan kadar purata kekuatan dari suhu 30°C ke 80°C (%)
Tegangan	98.63
Lenturan	100
Mampatan (Filamen pasaran)	98.80
Mampatan (Filamen kajian)	99.34

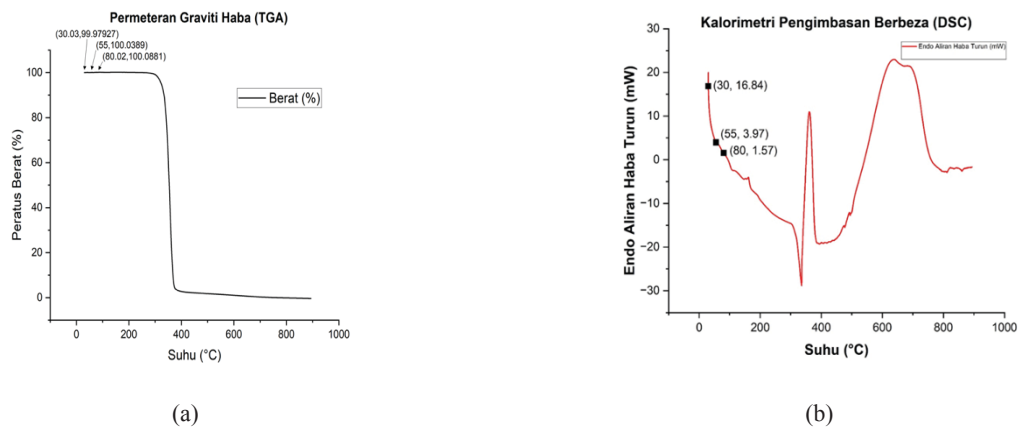
Dengan merujuk kepada Jadual 3, apabila suhu meningkat dari suhu 30 °C ke 80 °C kekuatan bahan PLA

menurun. Semasa pemanasan yang tinggi pada suhu 55 °C dan 80 °C, ikatan antara domain struktur polimer kehilangan keanjalan, ‘elasticity’ dan ketegaran, ‘rigidity’ serta menjadikan kebolehubah bentuk polimer viskoelastik (Korolev et al. 2021). Sifat ketegaran bagi sampel PLA akan menurun apabila mencecah suhu peralihan kaca iaitu pada 60 °C, dimana polimer matrik akan berubah daripada keadaan pepejal kepada separa cecair dan isipadu molekul bebas akan meningkat (Nikzad, Masood & Sbarski 2011). Fasa ini akan menggalakkan pergerakan zarah bebas dan mengurangkan mekanisme saling mengunci, ‘inter-locking mechanism’ serta mengurangkan prestasi mekanikal bahan PLA (Grasso et al. 2018).

Graf TGA dalam Rajah 6(a) menunjukkan bahawa berat sampel PLA kekal dari suhu 30°C hingga 300°C dan hanya mempunyai penurunan berat sampel yang sedikit sebanyak 0.85%. Dalam fasa ini PLA tidak mengalami degradasi terma yang ketara dalam julat suhu ini. Apabila suhu mencapai 310°C, berat sampel PLA mula menurun secara mendadak dan memulakan proses degradasi haba sampel PLA. Penurunan berat berlaku dari suhu 330°C hingga ke 400°C dan menunjukkan sampel PLA mengalami penguraian terma yang pesat. Selepas 400°C, berat sampel PLA menjadi stabil, menunjukkan bahawa majoritu sampel

PLA telah terurai sepenuhnya. Jadi, julat kestabilan terma bagi sampel PLA hanya sehingga 330°C, kemudian ia mula cepat terurai. Menurut kajian (Hassan et al. 2013), beliau mendapat keputusan yang hampir sama iaitu suhu

penguraian awal berlaku pada suhu 375°C sehingga mencapai kadar maksimum degradasi haba iaitu pada suhu 411°C.



RAJAH 6. Graf (a) Permeteran Graviti Haba (TGA) dan (b) Kalorimetri Pengimbasan Berbeza (DSC)

Analisis DSC ini dilakukan untuk menyiasat kelakuan kehabluran bagi tersintesis dan terdegradasi (Yadav, Nain & Khare 2021). Dengan menganalisis Rajah 7(b), pada suhu 30°C, terdapat sedikit perubahan dalam aliran haba iaitu sebanyak 16.84 mW tanpa berlaku perubahan fizikal yang ketara. Pada suhu 55°C pula, aliran haba mencatatkan sebanyak 3.97 mW, menunjukkan permulaan peralihan kaca dimana rantai polimer memulakan pergerakan yang lebih besar. Kemudian pada suhu 80°C, aliran haba menurun sebanyak 1.57 mW dan menjelaskan bahawa permulaan bagi proses peralihan kepada keadaan yang lebih lembut.

Tambahan pula, suhu peralihan kaca (Tg) dan suhu lebur yang didapati dalam kajian ini pula sebanyak 58.86°C dan 156.24°C. Menurut kajian Cuiffò et al. 2017, pula mendapat suhu peralihan kaca dan suhu lebur yang hampir sama dengan kajian ini iaitu sebanyak 57.7°C dan 166.7°C.

KESIMPULAN

Kajian berkaitan pengaruh ketebalan lapisan yang berbeza dan kesan peningkatan suhu terhadap prestasi mekanikal polilaktik asid telah berjaya dilaksanakan. Hasil keputusan menunjukkan peningkatan ketebalan lapisan dan suhu ujian telah mempengaruhi sifat mekanikal bahan PLA. Ketebalan lapisan 0.1 mm telah dipilih sebagai ketebalan lapisan yang terbaik dengan mempunyai kekuatan impak yang tertinggi berbanding dengan ketebalan lapisan pada 0.2 mm dan 0.3 mm. Bukan itu sahaja, keputusan daripada ujian tegangan, lenturan dan mampatan menunjukkan bahawa sampel pada 30°C menunjukkan kekuatan yang tertinggi berbanding dengan sampel pada suhu 55°C dan 80°C.

Dari segi penyelidikan masa depan, perlu dikaji dengan parameter yang lain untuk mengoptimumkan sampel pada prestasi mekanikal bahan PLA seperti ketumpatan isian, suhu cetakan dan orientasi pencetakan. Selain itu, kajian tentang suhu rawatan yang berbeza perlu dikaji supaya dapat memberikan kesan kepada mikrostruktur bahan PLA. Tambahan pula, penambahan komposit lain seperti Grafin dan Gentian karbon perlu dikaji secara mendalam supaya dapat menggunakan PLA dalam suhu yang tinggi.

PENGHARGAAN

Penulis merakamkan penghargaan atas sokongan kewangan yang diberikan oleh Skim Geran Penyelidikan Fundamental (FRGS), nombor geran FRGS/1/2024/TK10/UKM/02/3, dibiayai oleh Kementerian Pengajian Tinggi (KPT), Malaysia telah menyempurnakan kajian ini.

PENGISYTIHARAN KEPENTINGAN BERSAING

Tiada.

RUJUKAN

- Abbott, A.C., Tandon, G.P., Bradford, R.L., Koerner, H. & Baur, J.W. 2018. Process-structure-property effects on ABS bond strength in fused filament fabrication. *Additive Manufacturing* 19: 29–38.
- Agaliotis, E.M., Ake-Concha, B.D., May-Pat, A., Morales-Arias, J.P., Bernal, C., Valadez-Gonzalez, A., Herrera-Franco, P.J., Proust, G., Koh-Dzul, J.F., Carrillo, J.G. & Flores-Johnson, E.A. 2022. Tensile behavior of 3D Printed Polylactic Acid (PLA) based composites reinforced with natural fiber. *Polymers* 14(19).
- Balla, E., Daniilidis, V., Karlioti, G., Kalamas, T., Stefanidou, M., Bikiaris, N.D., Vlachopoulos, A., Koumentakou, I. & Bikiaris, D.N. 2021. Poly(lactic acid): A versatile biobased polymer for the future with multifunctional properties—from monomer synthesis, polymerization techniques and molecular weight increase to PLA applications. *Polymers* 13(11).
- Charasseangpaisarn Taksid, Wiwatwarrapan Chairat & Srimaneepong Viritpon. 2022. Thermal change affects flexural and thermal properties of fused deposition modeling poly (lactic acid) and compression molding poly (methyl methacrylate). *Thieme Medical and Scientific Publishers Pvt. Ltd.*
- Chen, W., Guo, C., Zuo, X., Zhao, J., Peng, Y. & Wang, Y. 2022. Experimental and Numerical Investigation of 3D Printing PLA Origami Tubes under Quasi-Static Uniaxial Compression. *Polymers* 14(19).
- Chinthapalli, R., Skoczinski, P., Carus, M., Baltus, W., De Guzman, D., Käß, H., Raschka, A. & Ravenstijn, J. 2019. Biobased building blocks and polymers - Global capacities, production and trends, 2018-2023. *Industrial Biotechnology* 15(4): 237–241.
- Cojocar, V., Frunzaverde, D., Miclosina, C.O. & Marginean, G. 2022. The influence of the process parameters on the mechanical properties of PLA specimens produced by fused filament fabrication—A review. *Polymers* 14(5).
- Corapi, D., Morettini, G., Pascoletti, G. & Zitelli, C. 2019. Characterization of a polylactic acid (PLA) produced by Fused Deposition Modeling (FDM) technology. *Procedia Structural Integrity* 24: 289–295.
- Cuiffò, M.A., Snyder, J., Elliott, A.M., Romero, N., Kannan, S. & Halada, G.P. 2017. Impact of the fused deposition (FDM) printing process on polylactic acid (PLA) chemistry and structure. *Applied Sciences (Switzerland)* 7(6).
- Fadhil Abbas, T., Mohammad Othman, F. & Basil Ali, H. 2018. Influence of layer thickness on impact property of 3D-printed PLA. *International Research Journal of Engineering and Technology* 9001.
- 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.
- Grasso, M., Azzouz, L., Ruiz-Hincapie, P., Zarrelli, M. & Ren, G. 2018. Effect of temperature on the mechanical properties of 3D-printed PLA tensile specimens. *Rapid Prototyping Journal* 24(8): 1337–1346.
- Habeeb, H.A., Abood, A.H., Mohan, A.E., Habeeb, H.A. & Hadi Abood, A. 2020. Influence of layer thickness and infill density on the impact strength of Carbon Particle and Polylactic Acid (CP/PLA) Composite. *Solid State Technology* 63(2).
- Hashemi Sanatgar, R., Campagne, C. & Nierstrasz, V. 2017. Investigation of the adhesion properties of direct 3D printing of polymers and nanocomposites on textiles: Effect of FDM printing process parameters. *Applied Surface Science* 403: 551–563.
- Hassan, E., Wei, Y., Jiao, H. & Muhuo, Y. 2013. Dynamic mechanical properties and thermal stability of poly(lactic acid) and poly(butylene succinate) blends composites. *Journal of Fiber Bioengineering and Informatics* 6(1): 85–94.
- Kholil, A., Syaefuddin, E.A., Supardi, F. & Wulandari, D.A. 2022. the effect of layer thickness on impact strength characteristics of ABS and PLA materials. *Journal of Physics: Conference Series* 2377(1).
- Korolev, A., Mishnev, M., Zherebtsov, D., Vatin, N.I. & Karelina, M. 2021. Polymers under load and heating deformability: Modelling and predicting. *Polymers* 13(3): 1–14.
- Nikzad, M., Masood, S.H. & Sbarski, I. 2011. Thermo-mechanical properties of a highly filled polymeric composites for Fused Deposition Modeling. *Materials and Design* 32(6): 3448–3456.
- Panda, B.N., Shankhwar, K., Garg, A. & Jian, Z. 2017. Performance evaluation of warping characteristic of fused deposition modelling process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 88(5–8): 1799–1811.
- Pretula, J., Slomkowski, S. & Penczek, S. 2016. Polylactides—Methods of synthesis and characterization. *Advanced Drug Delivery Reviews* 107: 3–16.
- Sandanamsamy, L., Harun, W.S.W., Ishak, I., Romlay, F.R.M., Kadirgama, K., Ramasamy, D., Idris, S.R.A. & Tsumori, F. 2023. A comprehensive review on fused deposition modelling of polylactic acid. *Progress in Additive Manufacturing* 8(5): 775–799.
- Stojković, J.R., Turudija, R., Vitković, N., Górski, F., Păcurar, A., Pleša, A., Ianoși-Andreeva-Dimitrova, A. & Păcurar, R. 2023. An experimental study on the impact of layer height and annealing parameters on the tensile strength and dimensional accuracy of FDM 3D printed parts. *Materials* 16(13).
- Valerga, A.P., Batista, M., Salguero, J. & Giro, F. 2018. Influence of PLA filament conditions on characteristics of FDM parts. *Materials* 11(8).

- Wang, L., Gramlich, W.M. & Gardner, D.J. 2017. Improving the impact strength of Poly(lactic acid) (PLA) in fused layer modeling (FLM). *Polymer* 114: 242–248.
- Wu, F., Misra, M. & Mohanty, A.K. 2019. Studies on why the heat deflection temperature of polylactide bioplastic cannot be improved by overcrosslinking. *Polymer Crystallization* 2(6).
- Yadav, N., Nain, L. & Khare, S.K. 2021. Studies on the degradation and characterization of a novel metal-free polylactic acid synthesized via lipase-catalyzed polymerization: A step towards curing the environmental plastic issue. *Environmental Technology and Innovation* 24.