

3D Printed Carbon Fibre Reinforced Polyamides in High Temperature (Poliamida Diperkuat Gentian Karbon Cetakan 3D Pada Suhu Tinggi)

Norazyan Rudi Hartono^a, Nabilah Afiqah Mohd Radzuan^{ab*}, Nisa Naima Khalid^a & Abu Bakar Sulong^{ab}

^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 6 March 2023, Received in revised form 6 April 2023

Accepted 6 May 2023, Available online 30 November 2023

ABSTRACT

In additive manufacturing, polymer composites are often produced by using fuse deposition modeling (FDM) methods which usually have a clear effect on layer by layer due to incomplete bonding once it is been printed. FDM is one of the widely used 3D printing technology due to its fast printing speed and affordable cost. The mechanical characteristics of composite printed using the FDM technology are affected by the printing parameters of the FDM machine. The mechanical and tensile characteristics of polymer printed using FDM technology are also affected when it is exposed to high temperature. Therefore, this study is to identify the effect of high temperature towards the mechanical performance and tensile characteristics of FDM printed with 2 different printing temperature. A total of 18 samples with 2 different printing temperatures, are tested through a tensile test at temperature of 190°C, 200°C, and 210°C, scanning electron microscope (SEM), thermogravimetric analysis (TGA), and dynamic mechanical analysis (DMA).

Keywords: 3d-printing; FDM; PACF; TGA; tensile

ABSTRAK

Dalam pembuatan bahan tambahan, komposit polimer sering dihasilkan dengan menggunakan kaedah fuis pemodelan pemendapan (FDM) yang biasanya mempunyai kesan yang jelas pada lapisan demi lapisan kerana ikatan yang tidak lengkap sebaik sahaja ia dicetak. FDM ialah salah satu teknologi percetakan 3D yang digunakan secara meluas kerana kelajuan pencetakan yang pantas dan kos yang berpatutan. Ciri-ciri mekanikal komposit yang dicetak menggunakan teknologi FDM dipengaruhi oleh parameter pencetakan mesin FDM. Ciri mekanikal dan tegangan polimer yang dicetak menggunakan teknologi FDM juga terjejas apabila ia terdedah kepada suhu tinggi. Oleh itu, kajian ini adalah untuk mengenal pasti kesan suhu tinggi terhadap prestasi mekanikal dan ciri tegangan FDM yang dicetak dengan 2 suhu cetakan berbeza. Sebanyak 18 sampel dengan 2 suhu cetakan berbeza, diuji melalui ujian tegangan pada suhu 190°C, 200°C dan 210°C, mikroskop elektron pengimbasan (SEM), analisis termogravimetrik (TGA), dan analisis mekanikal dinamik. (DMA).

Kata kunci: Pencetakan 3D; FDM; PACF; TGA; Tensile

PENGENALAN

Pemodelan pemendapan bercantum (FDM) merupakan salah satu teknologi pencetakan 3D yang digunakan secara meluas. FDM ialah proses penyemperitan bahan di mana filamen, kebiasannya bahan polimer, ditolak ke dalam penyemperit, bercantum dalam hujung panas, dan dimendapkan mengikuti laluan alat 2D dalam lapisan pada ketinggian yang berbeza (Dorado et al. 2021). Parameter-parameter yang digunapakai dalam proses FDM memberikan efek yang berbeza kepada sifat dan ciri-ciri bahan yang dicetak. Kualiti sesuatu produk yang dicetak bergantung kepada input parameter yang dihantar kepada mesin FDM seperti ketinggian lapisan, ketumpatan isian, orientasi dan sebagainya (Sammaiah et al. 2020). Maka, sifat sesuatu produk juga akan berubah berdasarkan parameter pencetakan yang digunakan. FDM ialah teknik canggih yang memberikan kesukaran yang besar dalam menghasilkan tetapan yang sempurna kerana kewujudan sejumlah besar parameter bercanggah yang akan mempengaruhi kualiti komponen dan ciri bahan (Mohamed et al. 2015). Oleh itu, pemilihan teknik fabrikasi dan penggunaan parameter pemprosesan seperti suhu, masa dan tekanan yang sesuai perlu diberi perhatian bagi menghasilkan produk komposit dengan sifat yang optimum (Ramesh 2016).

Sifat sesuatu bahan akan berubah apabila dikenakan suhu yang berbeza. Penggunaan suhu yang berbeza akan memberikan impak berbeza kepada sifat mekanik bahan dan komposit. Menurut Annamalai & Singh 2011, menaikkan suhu dan masa pemprosesan untuk gentian asli telah mengurangkan kekuatan tegangan. Ini berlaku akibat daripada pecahan haba gentian pada suhu pemprosesan yang tinggi. Suhu mesti dikawal dengan sewajarnya untuk menyediakan impregnasi matriks dan gentian yang berjaya. Kajian terdahulu tidak mengambil kira perubahan atau peningkatan suhu kepada sifat dan orientasi poliamida diperkuat gentian karbon (PACF). Sebuah kajian yang dijalankan oleh Tanaka et al. 2016 menunjukkan apabila suhu meningkat, resin mengembang dan kekuatan ricih antara muka komposit model CF/PA merosot. Dapatan ini membayangkan bahawa pengembangan resin menyebabkan penurunan kekuatan ricih antara muka apabila suhu meningkat. Keputusan kajian yang dijalankan menunjukkan bahawa suhu memberikan kesan kepada sifat komposit poliamida diperkuat gentian karbon (PACF). Namun, kajian yang lebih mendalam perlu dijalankan untuk mengenal pasti kesan suhu kepada sifat fizikal dan mekanik PACF.

METODOLOGI

Teknologi pencetakan 3D yang digunakan untuk penyelidikan ini ialah pencetakan FDM. FDM merupakan kaedah pencetakan yang sesuai kerana sampel yang diinginkan tidak memerlukan pemprosesan yang kompleks. Selain itu, proses pembuatan FDM juga tidak mengambil masa yang terlalu lama dan tidak memerlukan kos yang tinggi. Platform binaan, kepala cecair, muncung penyemperitan, elemen pemanas, roda pemacu, dan bahan kili binaan ialah komponen asas pencetak 3D FDM. Platform binaan bertindak sebagai permukaan untuk item bercetak, dan ia juga dipanaskan pada suhu yang tepat supaya bahan itu melekat padanya. Kepala cecair mempunyai muncung penyemperitan dan elemen pemanas yang bergerak dalam tiga arah: X, Y, dan Z. Muncung penyemperitan digunakan untuk menyemperit filamen ke dalam proses pemendapan lapisan demi lapisan (Prayitno et al. 2021)

Diameter muncung biasanya antara 0.1 dan 0.4 mm, dengan suhu operasi maksimum 250 hingga 500°C. Filamen yang tersemerit oleh muncung penyemperitan telah dipanaskan lebih awal oleh sumber pemanasan dan mempunyai diameter antara 1.75 hingga 3 mm. Filamen yang digulung diarahkan ke dalam elemen pemanas dan muncung penyemperitan oleh roda pemacu penyemperitan. Secara umum, diameter filamen tidak mempunyai pengaruh langsung ke atas kualiti cetakan; walau bagaimanapun, menggunakan diameter yang lebih besar dengan saiz muncung yang sama meningkatkan tekanan pada hujung filamen, yang menjejaskan kelajuan penyemperitan. Mesin FDM jenis Ultimaker, model S3 digunakan untuk menghasilkan sampel PACF.

Secara umumnya, kajian ini dilakukan untuk mengkaji kesan suhu proses komposit poliamida diperkuat gentian karbon bagi aplikasi pembuatan bahan tambahan menggunakan kaedah pemodelan pemendapan bercantum (FDM) terhadap sifat-sifat mekanikal bahan. Kajian ini meliputi beberapa skop penyelidikan antaranya melibatkan mengenalpasti kesan suhu tinggi kepada prestasi mekanikal dan sifat tegangan bahan komposit poliamida diperkuat gentian karbon (PACF). Berdasarkan objektif pertama, ujian tegangan pada suhu tinggi dijalankan terhadap sampel PACF dengan dua set suhu pencetakan yang berbeza. Manakala, objektif kedua memerlukan kajian dilakukan terhadap kesan suhu terhadap sifat terma dan mekanikal bahan PACF pada suhu pencetakan yang berbeza. Maka, perincian bahan dilakukan dengan menggunakan analisis pemeteraan gentian haba (TGA), analisis pemeteraan kalori pengimbasan kebezaan (DSC) serta analisis pemerhatian mikrostruktur.

KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

Terdapat 10 sampel poliamida yang dilakukan ujian tegangan, manakala terdapat 9 sampel PACF dengan suhu pencetakan pada 270°C dan 9 sampel PACF dengan suhu pencetakan pada 230°C pada 230°C telah dilakukan ujian tegangan pada suhu tinggi pada suhu 190°C, 200°C, dan 210°C.

UJIAN KETEGANGAN

Ujian ketegangan dijalankan terhadap 10 sampel poliamida untuk mengkaji sifat ketegangan poliamida yang dicetak menggunakan pemodelan pemendapan bersatu. Ujian kelenturan dijalankan menggunakan parameter kaedah ujian standard untuk sifat tegangan plastik iaitu ASTM D638-99. Jadual 1 di bawah menunjukkan parameter yang digunakan untuk ujian tegangan yang dilakukan terhadap 10 sampel poliamida.

JADUAL 1. Parameter yang digunakan untuk ujian tegangan

Parameter	Nilai digunakan
Kelajuan	5 mm/minit
Beban	30 kN
Panjang	165 mm
Lebar	13 mm
Tebal	3.2 mm

Hasil ujian tegangan 10 sampel poliamida dapat dirumuskan seperti di dalam di bawah. Menurut kajian yang telah dilakukan mengenai sifat tegangan poliamida, (Bernasconi & Cosmi 2011) mendapati bahawa tegangan maksimum yang didapati bagi sampel yang mengandungi poliamida sahaja ialah 61 MPa. Manakala, dalam sebuah

kajian yang dilakukan oleh (Jia & Kagan 2000), tegangan maksimum yang diperoleh daripada ujian tegangan menggunakan standard ISO ialah 84.98 MPa. Tegangan maksimum tertinggi yang diperoleh dalam ujian tegangan bagi kajian ini adalah 17.8 MPa.

JADUAL 2. Rumusan hasil ujian tegangan 10 sampel poliamida

Sampel	Tegangan maksimum pada beban maksimum (MPa)	Terikan maksimum pada beban maksimum (mm/mm)
1	17.8	1.62
2	16.9	1.47
3	16.9	1.57
4	16.4	1.54
5	16.3	1.45
6	16.5	1.21
7	16.5	1.34
8	16.7	1.35
9	16.7	1.39
10	17.1	1.32

Perbezaan nilai tegangan maksimum yang diperolehi dibandingkan dengan nilai yang diperolehi dalam kajian yang dilakukan oleh (Bernasconi & Cosmi, 2011) dan (Jia & Kagan, n.d.), adalah disebabkan kaedah dan parameter yang digunakan. Saiz sampel yang digunakan juga adalah berbeza dan mempengaruhi hasil ujian yang diperolehi.

Ujian ketegangan pada suhu tinggi telah dijalankan terhadap 18 sampel poliamida dengan dua set suhu

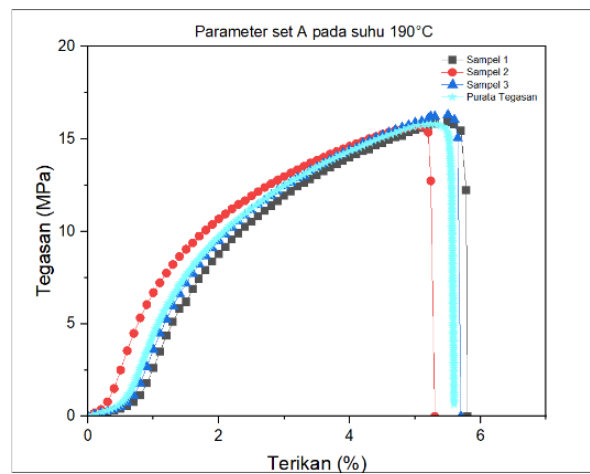
pencetakan berbeza. Parameter ujian ketegangan yang dijalankan menggunakan parameter yang sama seperti tertera dalam Jadual 1, kecuali suhu yang digunakan ialah 190°C, 200°C, dan 210°C. Perincian ujian tegangan pada suhu tinggi yang dijalankan adalah seperti yang ditunjukkan dalam Jadual 3.

JADUAL 3. Perincian bilangan sampel yang dilakukan ujian tegangan pada suhu tinggi.

Suhu pencetakan	Suhu ujian	Bilangan sampel
270°C	190°C	3
	200°C	3
	210°C	3
230°C	190°C	3
	200°C	3
	210°C	3

Sampel dengan suhu pencetakan 270°C akan disebut sebagai sampel set A, manakala sampel dengan suhu pencetakan 230°C akan disebut sebagai sampel set B. Nilai purata hasil ujian yang dijalankan bagi setiap 3 sampel dianalisis, kemudian nilai purata tersebut dibandingkan

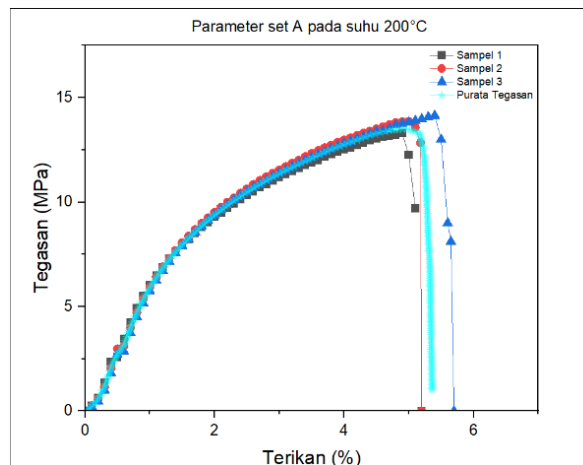
untuk melihat kesan suhu tinggi yang berbeza terhadap sampel dengan suhu pencetakan yang berbeza. Rajah 1 menunjukkan hasil ujian ketegangan pada suhu 190°C yang dijalankan pada sampel set A.



RAJAH 1. Hasil ujian tegangan sampel set A pada suhu 190°C.

Hasil daripada ujian tegangan pada suhu tinggi yang dilakukan menunjukkan bahawa pada suhu 190°C, purata tegasan yang dianalisis daripada hasil ujian tegasan yang

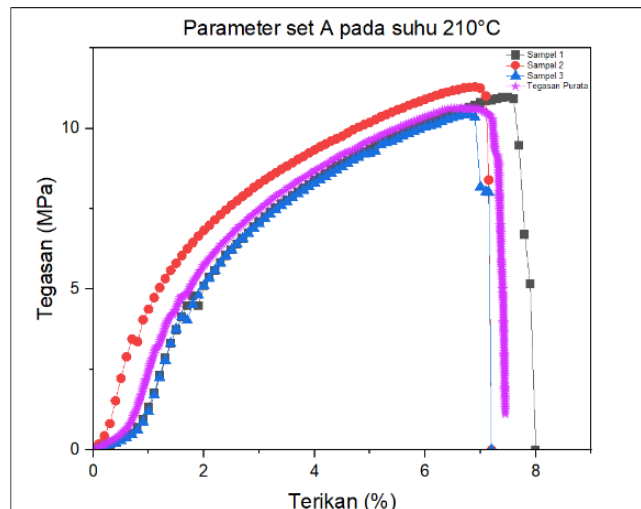
dilakukan terhadap 3 sampel set A ialah 15.8 MPa. Seterusnya. Rajah 2 di bawah menunjukkan keputusan ujian tegangan pada suhu 200°C.



RAJAH 2. Hasil ujian tegangan sampel set A pada suhu 200°C.

Daripada analisis yang dilakukan terhadap keputusan yang diperolehi melalui ujian tegangan pada suhu 200°C, purata tegasan maksimum yang didapati adalah 13.5 MPa. Seterusnya, keputusan ujian tegasan pada suhu 210°C untuk sampel dengan suhu pencetakan 270°C diringkaskan seperti dalam Rajah 3.

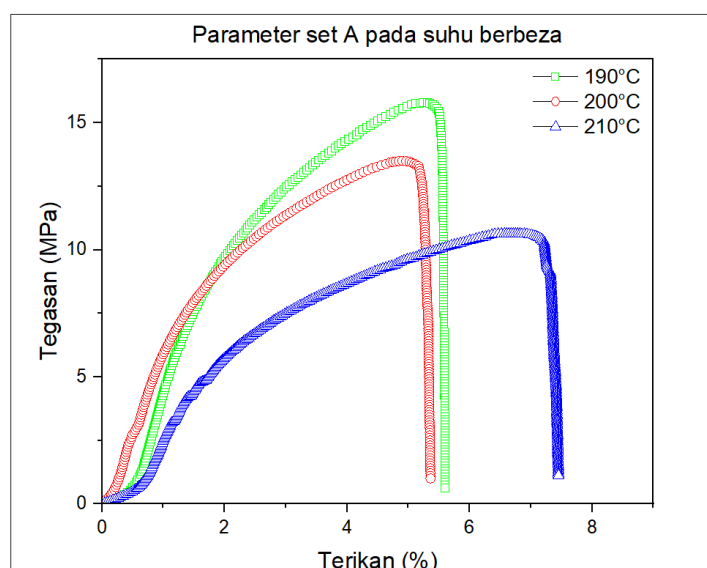
Bagi ujian tegangan pada suhu 210°C, tegangan maksimum bagi sampel set A yang dianalisis ialah 10.6 MPa. Kemudian, setiap purata tegasan yang dianalisis ini dibandingkan di dalam satu rajah untuk melihat kesan suhu kepada sifat tegangan sampel dengan suhu pencetakan 270°C.



RAJAH 3. Hasil ujian tegangan sampel set A pada suhu 210°C.

Tegangan purata yang dianalisis daripada setiap ujian tegangan yang dilakukan terhadap sampel set A pada suhu tinggi yang berbeza dan dibandingkan dalam satu Rajah 4. Daripada rajah yang dilakukan, sampel menunjukkan kemerosotan daripada segi sifat tegangan mereka. Pada suhu 190°C, sampel set A menunjukkan tegasan maksimum yang tertinggi dibandingkan dengan tegasan maksimum

pada suhu 200°C dan 210°C. Ini adalah kerana, apabila suhu ujian meningkat, kerapuhan sampel meningkat. Menurut kajian, sifat mekanikal polimer akan berubah secara ketara dengan peningkatan suhu (Nakajima et al. 2020). Bermula daripada suhu 50°C, polimer akan mula menunjukkan sifat rapuh apabila diuji dengan ujian tegangan suhu tinggi (dos Reis, 2012).

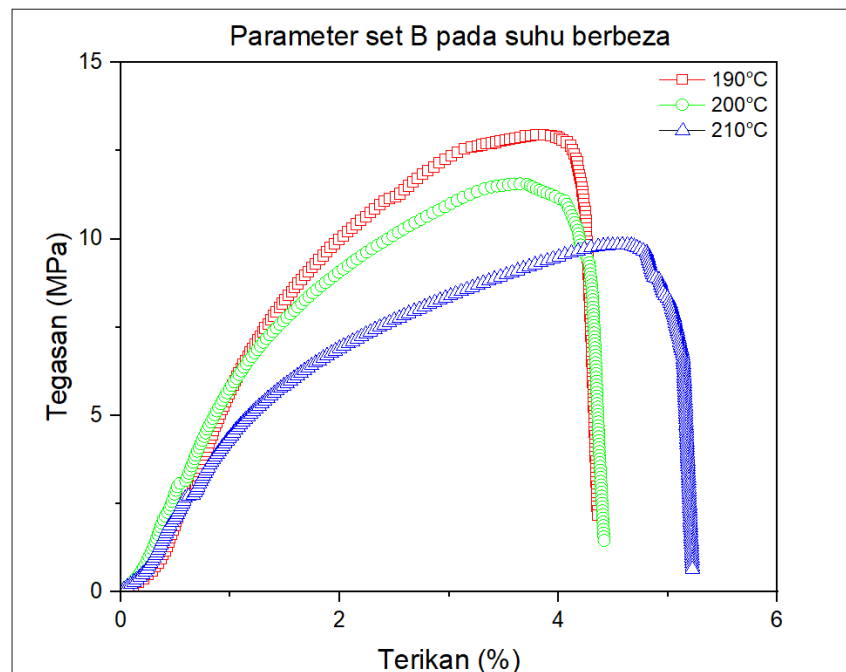


RAJAH 4. Hasil ujian tegangan pada suhu 190°C, 200°C, dan 210°C bagi sampel set A.

Seterusnya, ujian tegangan pada suhu 190°C dilakukan kepada 3 sampel yang mempunyai suhu pencetakan pada 190°C iaitu sampel set B. Keputusan ujian yang dilakukan diringkaskan dalam graf seperti Rajah 5.

Purata tegasan maksimum yang diperolehi daripada analisis keputusan ujian tegangan pada suhu 190°C ialah 13 MPa. Seterusnya, 3 sampel set B dilakukan ujian tegangan pada suhu 200°C dan keputusan ujian 3 sampel ini dianalisis seperti dalam Rajah 5. Rajah 5 menunjukkan purata tegasan maksimum yang diperolehi ialah 11.6 MPa.

Purata tegasan maksimum yang didapati pada ujian tegangan pada suhu 200°C menunjukkan penurunan dibandingkan dengan keputusan ujian tegangan pada suhu 190°C. Sama seperti yang berlaku pada keputusan ujian tegangan suhu tinggi bagi sampel set A, sifat tegangan sampel set B menunjukkan kemerosotan dengan peningkatan suhu ujian tegangan. Rajah 5 menunjukkan analisis keputusan ujian tegangan buat sampel set B pada suhu 200°C. Kemudian, keputusan ujian tegangan pada suhu 210°C.



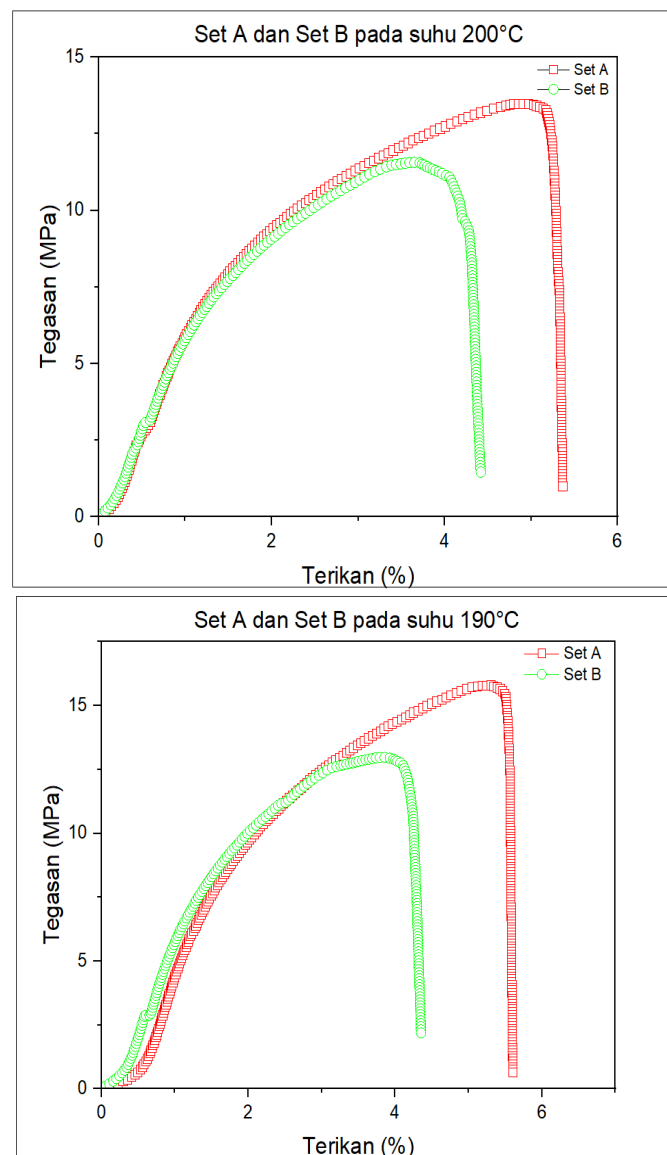
RAJAH 5. Hasil ujian tegangan pada suhu 190°C, 200°C, dan 210°C bagi sampel set B

pada ujian tegangan pada suhu 200°C. Analisis hasil ujian tegangan pada suhu 210°C bagi set B menunjukkan purata tegasan maksimum yang dikira ialah 9.8 MPa. Purata tegasan maksimum bagi ujian tegangan pada suhu 210°C juga menunjukkan penurunan yang ketara seperti yang terlihat pada ujian tegangan pada suhu 200°C. Seterusnya, purata tegasan maksimum yang dianalisis daripada ujian tegangan sampel set B pada 3 suhu berbeza ini dibandingkan dalam satu graf yang sama seperti dalam Rajah 5.

Purata tegasan maksimum bagi ketiga-tiga suhu ini menunjukkan penurunan apabila suhu ujian tegasan meningkat. Sama seperti yang didapati daripada ujian tegangan pada suhu tinggi yang dilakukan terhadap kesemua sampel dengan suhu pencetakan 270°C, peningkatan suhu ujian menunjukkan penurunan yang ketara bagi tegasan yang direkodkan oleh set B. Di dalam sebuah kajian yang dilakukan oleh (Tanaka et al. 2016b)

untuk mengkaji kesan suhu terhadap kekuatan ricih antara muka komposit poliamida diperkuat karbon fiber. Kajiannya mendapati bahawa apabila suhu meningkat kekuatan ricih antara muka komposit poliamida diperkuat gentian karbon juga berkurang (Cai et al. 2020; Khalid et al. 2022). Ini menunjukkan bahawa apabila suhu meningkat, ciri-ciri mekanikal poliamida bertetulang gentian karbon semakin merosot. Ini boleh dikaitkan dengan pengembangan poliamida yang menyebabkan berlakunya kemerosotan sifat mekanikal ini (Zhang et al. 2020).

Seterusnya, keputusan ujian tegangan pada suhu tinggi set A dan set B dianalisis dengan membandingkan purata tegasan tinggi yang diperolehi pada suhu yang sama. Rajah 6(a) hingga Rajah 6(c) menunjukkan perbandingan purata tegasan maksimum yang dianalisis dari keputusan ujian tegangan pada suhu tinggi yang dilakukan kepada kesemua 18 sampel poliamida diperkuat gentian karbon.



RAJAH 6. Perbandingan purata tegasan sampel set A dan B pada suhu 190°C dan 200°C.

Menurut sebuah kajian yang dilakukan oleh (Belei et al. 2022), kesan suhu pencetakan 240°C hingga 280°C menunjukkan bahawa peningkatan suhu pencetakan memberikan kesan yang baik kepada sifat mekanikal sampel. Pada suhu pencetakan yang rendah, tiada kesan pensinteran yang ketara berlaku yang menyebabkan wujudnya jarak antara setiap lapisan pencetakan yang akhirnya menjejaskan prestasi mekanikal sampel yang dicetak (Paridah et al. 2009). Daripada hasil analisis ketiga-tiga rajah membandingkan purata tegasan sampel-sampel set A dan B yang dijalankan ujian tegangan pada suhu 190°C, 200°C, dan 210°C, menunjukkan sampel-sampel set A menunjukkan prestasi mekanikal dan sifat tegangan yang lebih baik daripada sampel-sampel set B. Kesemua sampel set A yang dicetak pada suhu 270°C mencatatkan purata tegasan maksimum yang lebih tinggi berbanding

sampel B yang dicetak pada suhu 230°C. Keputusan ini selaras dengan kajian yang telah dilakukan (Belei et al. 2022).

PENGIMBAS MIKROSKOP ELEKTRON

Seterusnya, struktur dalaman sampel yang dilakukan ujian tegangan pada suhu tinggi diperhatikan dengan menggunakan pengimbas mikroskop elektron. Pengimbas elektron mikroskop (SEM) mencipta gambar dengan menayang dan mengimbas aliran elektron terfokus merentasi permukaan. Elektron dalam rasuk berinteraksi dengan sampel, mencipta pelbagai isyarat yang boleh digunakan untuk mempelajari tentang topografi dan komposisi permukaan. Jadual 4 di bawah menunjukkan sampel set A dan B yang dijalankan ujian tegangan pada

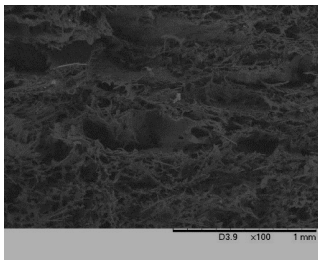
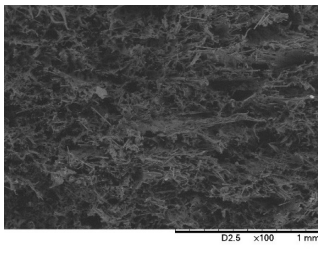
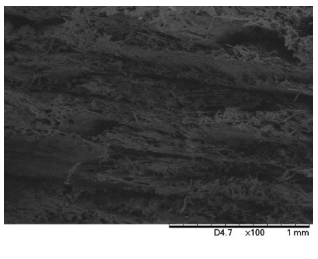
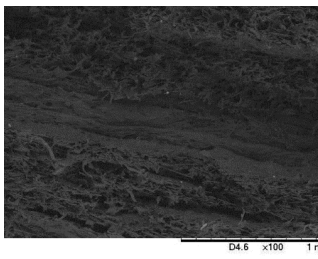
suhu 190°C di bawah pengimbas mikroskop elektron.

Hasil pengimbasan yang dilakukan pada 100x pembesaran terhadap sampel set A dan B menunjukkan pembahagian lapisan yang jelas pada hasil pengimbasan sampel set B. Manakala, pada rajah yang menunjukkan hasil pengimbasan yang dilakukan terhadap set A terdapat kesukaran untuk mengenalpasti pembahagian lapisan sampel tersebut. Ini menunjukkan kejeleketan antara lapisan yang baik, seterusnya menghasilkan prestasi mekanikal yang lebih baik (Belei et al. 2022). Justeru itu, sampel yang dicetak dengan suhu 270°C mempamerkan

prestasi mekanikal dan sifat tegangan yang lebih baik daripada sampel yang dicetak pada suhu 230°C (Dorado et al. 2021).

Selain itu, hasil pengimbasan set A yang dijalankan ujian tegangan pada suhu 190°C dan 200°C juga tidak menunjukkan perbezaan yang ketara. Ini menunjukkan suhu ujian tegangan tidak mengubah struktur sampel secara kekal, namun suhu pencetakan dan parameter pencetakan yang digunakan memberikan kesan kepada kekuatan antara lapisan sampel dan prestasi mekanikal sampel (Khosravani & Reinicke 2020; Radzuan et al. 2021).

JADUAL 4. Hasil Pemerhatian Pengimbas Mikroskop Elektron pada sampel set A dan B yang dilakukan ujian tegangan pada suhu 190°C dan 200°C pada pembesaran 100x.

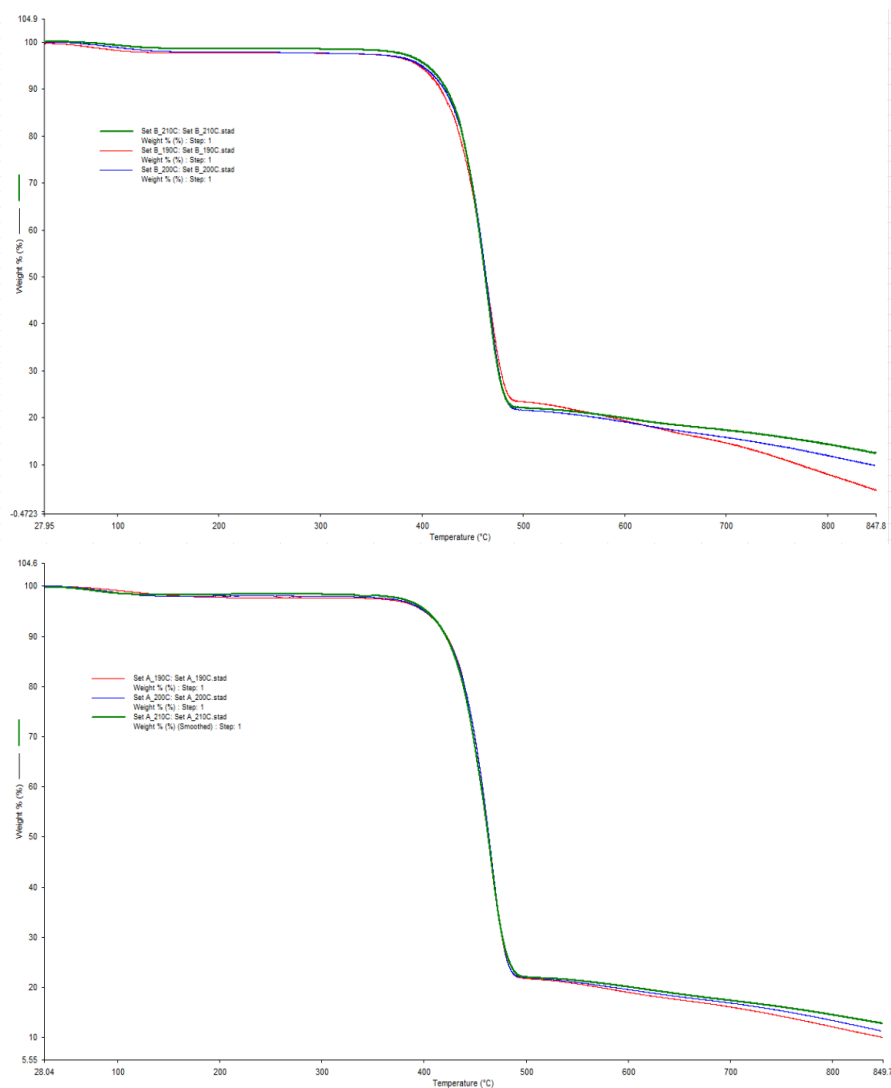
Sampel	Suhu	Hasil Pemerhatian	Sampel	Suhu	Hasil Pemerhatian
A	190°C		A	210°C	
B	190°C		B	210°C	

ANALISIS HABA

Penganalisis haba (DSC/TGA) boleh digunakan untuk menentukan pecahan berat gentian. Penemuan analisis TGA/DSC untuk sampel komposit PACF termasuk lengkung berat (peratus) berbanding suhu (°C) dan keputusan pembezaan berat (peratus/min) (Huang & Sheng, 2017; Li et al. 2014).

Rajah 7(a) menunjukkan analisis haba (TGA/DSC) bagi sampel komposit PACF dengan suhu pencetakan 270°C. Apabila peningkatan suhu berlaku, berat bagi sampel komposit PACF dengan suhu pencetakan 270°C mula jatuh pada 391.93°C.

Rajah 7(b) menunjukkan analisis haba (TGA/DSC) bagi sampel komposit PACF dengan suhu pencetakan 230°C. Apabila peningkatan suhu berlaku, berat bagi sampel komposit PACF dengan suhu pencetakan 230°C mula jatuh pada 390.91°C. Selepas tahap itu, berat sampel bagi kedua-dua orientasi telah menurun sehingga sekitar 850°C. Puncu utama yang menyumbang kepada penurunan berat yang ketara di antara julat suhu tersebut ialah disebabkan oleh penguraian matrik PA (Azwa & Yousif, 2013; Wang et al. 2020). Di samping itu, berat bagi PA jatuh sehingga mencecah nilai 0 yang membuktikan bahawa matrik PA telah terurai sepenuhnya.



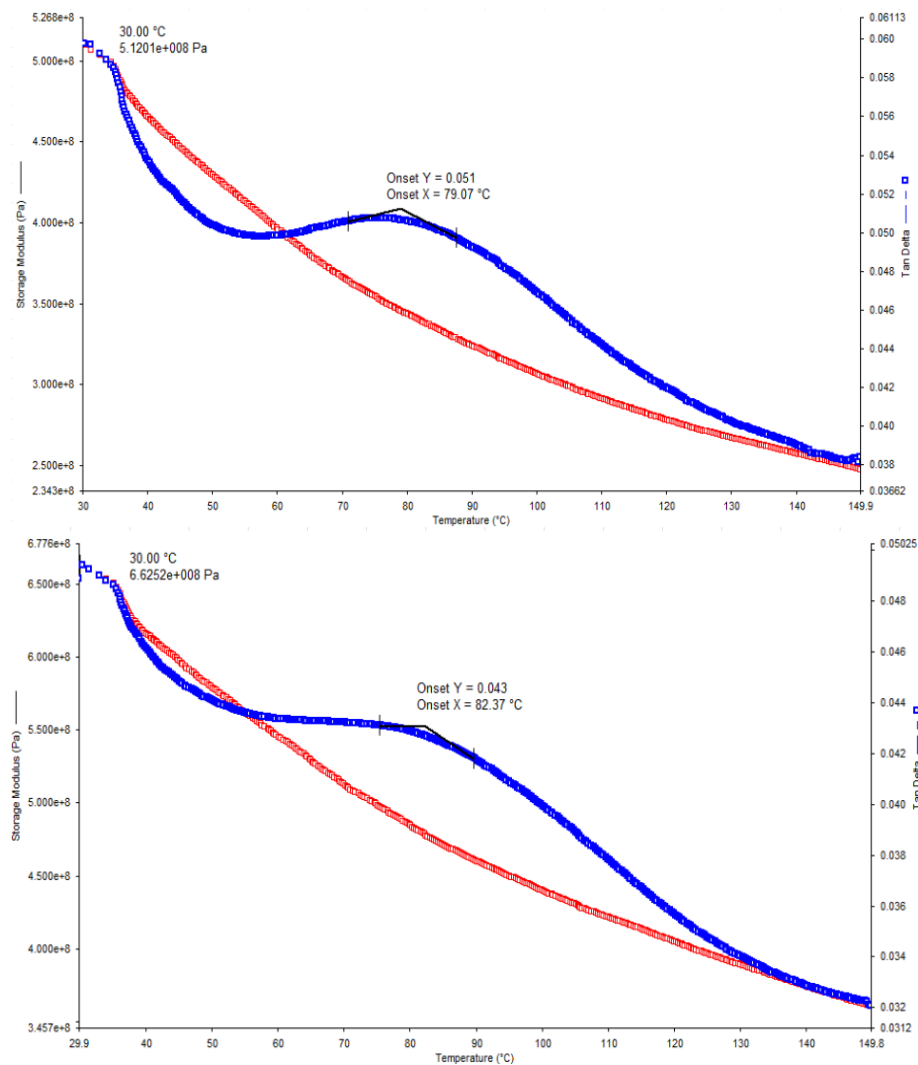
RAJAH 7. Analisis Haba (TGA/DSC) bagi sampel komposit PACF dengan suhu pencetakan 230°C dan 270°C.

ANALISIS MEKANIKAL DINAMIK

Analisis mekanik dinamik (DMA) memberikan nilai kekakuan dan redaman sampel yang dilaporkan melalui modulus storan (E') dan $\tan \delta$ ($\tan \delta$) komposit yang merupakan parameter dinamik yang dikaji bagi menggambarkan ikatan antara polimer dan gentian. Ianya dipengaruhi oleh panjang gentian yang bertindak sebagai penguat terhadap beban yang dikenakan (Saba et al. 2016). Melalui keputusan DMA jangkaan terhadap kesan masa dan perubahan suhu pada sifat komposit dapat dilakukan. Bagi nilai modulus storan atau modulus dinamik ianya adalah berkaitan dengan modulus Young komposit yang menggambarkan sifat kekakuan bagi menentukan kekerasan atau kerapuhan sesuatu sampel. Selain itu, ianya

juga dianggap sebagai keupayaan sampel untuk menyimpan tenaga apabila dikenakan daya bagi aplikasi sebenar Thiruchitrabalam et al. (2012). Sementara itu bagi nilai $\tan \delta$ pula, ianya adalah merujuk kepada nisbah antara modulus lesapan (loss modulus) terhadap modulus storan yang menentukan sifat elastik bahan di mana nilai yang rendah menunjukkan sifat elastik yang tinggi (Saba et al. 2016).

Rajah 16 menunjukkan di mana $\tan \delta$ bagi sampel tersebut meningkat bermula pada suhu 60°C, di mana sifat elastik bagi sampel tersebut mula menurun manakala bagi Rajah 8 $\tan \delta$ juga mula meningkat pada sekitar suhu 60°C. Ini menunjukkan sampel set A dan B mengalami penurunan sifat elastik pada titik yang hampir sama.



RAJAH 8. Keputusan ujian DMA pada sampel dengan suhu pencetakan 230°C dan 270°C.

KESIMPULAN

Melalui ujian-ujian yang telah dilakukan, ia dapat disimpulkan bahawa suhu memberikan kesan kepada prestasi mekanikal dan sifat tegangan sesuatu bahan. Tegangan maksimum pada suhu 190°C adalah tegangan tertinggi yang diperolehi oleh sampel kedua-dua set berbanding dengan tegangan maksimum yang diperolehi pada suhu 200°C dan 210°C. Ini menunjukkan prestasi mekanikal dan sifat tegangan sampel merosot.

Seterusnya, struktur sampel diperhatikan di bawah pengimbas mikroskop elektron didapati bahawa pembahagian antara lapisan bagi sampel dengan suhu pencetakan 230°C adalah lebih jelas berbanding sampel pada suhu 270°C. Apabila pembahagian antara sampel adalah jelas, itu menunjukkan bahawa kejeleketan antara lapisan adalah lemah dan menyebabkan kemerosotan prestasi mekanikal sampel.

Melalui uji kaji yang dijalankan, hasil keputusan TGA/ DSC mendapati berat sampel dengan suhu pencetakan 270°C jatuh mula pada suhu 391.93°C dan berat bagi sampel pada orientasi mendatar mula jatuh pada suhu 390.91°C. Bagi hasil analisis mekanikal dinamik pula, $\tan \delta$ bagi sampel bagi sampel dengan suhu pencetakan 270°C meningkat bermula pada suhu 60°C dan $\tan \delta$ bagi sampel dengan suhu pencetakan 230°C juga mula meningkat pada sekitar suhu 60°C.

PENGHARGAAN

Penyelidikan ini dibiayai oleh geran Kementerian Pengajian Tinggi (KPT), Malaysia di bawah dana Fundamental Research Grant Scheme (FRGS), nombor FRGS/1/2020/TK0/UKM/02/18 dan sebahagiannya oleh Kementerian Tinggi Pendidikan (KPT), Malaysia dan Pusat Pengurusan Penyelidikan dan Instrumentasi (CRIM), Universiti Kebangsaan Malaysia, nombor geran GUP-2020-002.

PENGISYTIHARAN KEPENTINGAN BERSAING

Tiada.

RUJUKAN

- Annamalai, P. K., & Singh, R. P. 2011. Biopolymeric nanocomposites as environment benign materials. *Cellulose Fibers: Bio- and Nano-Polymer Composites*, 519–535. https://doi.org/10.1007/978-3-642-17370-7_20
- Azwa, Z. N., & Yousif, B. F. 2013. Characteristics of kenaf fibre/epoxy composites subjected to thermal degradation. *Polymer Degradation and Stability* 98: 2752–2759. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2013.10.008>
- Belei, C., Joeressen, J., & Amancio-Filho, S. T. 2022. Fused-filament fabrication of short carbon fiber-reinforced polyamide: Parameter optimization for improved performance under uniaxial tensile loading. *Polymers* 14(7). <https://doi.org/10.3390/polym14071292>
- Bernasconi, A., & Cosmi, F. 2011. Analysis of the dependence of the tensile behaviour of a short fibre reinforced polyamide upon fibre volume fraction, length and orientation. *Procedia Engineering* 10: 2129–2134. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.04.352>
- Cai, S., Wu, C., Yang, W., Liang, W., Yu, H., & Liu, L. 2020. Recent advance in surface modification for regulating cell adhesion and behaviors. *Nanotechnology Reviews* 9(1): 971–989. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2020-0076>
- Dorado, R., Pérez, F. J., Medina, G., & Guerrero, F. 2021. Experimental measuring of printing speed in FDM. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 1193(1): 012037. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1193/1/012037>
- dos Reis, J. M. L. 2012. Effect of temperature on the mechanical properties of polymer mortars. *Materials Research* 15(4): 645–649. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392012005000091>
- Huang, S., & Sheng, J. J. 2017. An innovative method to build a comprehensive kinetic model for air injection using TGA/DSC experiments. *Fuel* 210(August): 98–106. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.08.048>
- Jia, N., & Kagan, V. A. n.d. *Interpretations of Tensile Properties of Polyamide 6 and PET Based Thermoplastics Using ASTM and ISO Procedures*.
- 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. <https://doi.org/10.1515/rams-2022-0281>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.10.083>
- Li, B., Chen, G., Zhang, H., & Sheng, C. 2014. Development of non-isothermal TGA-DSC for kinetics analysis of low temperature coal oxidation prior to ignition. *Fuel* 118: 385–391. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.11.011>
- Nakajima, J., Fayazbakhsh, K., & Teshima, Y. 2020. Experimental study on tensile properties of 3D printed flexible kirigami specimens. *Additive Manufacturing* 32(October 2019): 101100. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101100>
- Paridah, M. T., Hafizah, a W. N., Zaidon, a, Azmi, I., Nor, M. Y. M., & Yuziah, M. Y. N. 2009. *Bonding Properties and Performance of Multi-layered Kenaf Board* 21(2): 113–122.
- 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. *Nanotechnology Reviews* 10(1): 1853–1872. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2021-0116>
- Tanaka, K., Hosoo, N., Katayama, T., Noguchi, Y., & Izui, K. 2016a. Effect of temperature on the fiber/matrix interfacial strength of carbon fiber reinforced polyamide model composites. *Mechanical Engineering Journal* 3(6): 16-00158-16-00158. <https://doi.org/10.1299/mej.16-00158>
- Tanaka, K., Hosoo, N., Katayama, T., Noguchi, Y., & Izui, K. 2016b. Effect of temperature on the fiber/matrix interfacial strength of carbon fiber reinforced polyamide model composites. *Mechanical Engineering Journal* 3(6): 16-00158-16-00158. <https://doi.org/10.1299/mej.16-00158>
- Wang, J., Xiang, J., Lin, H., Wang, K., Yao, S., Peng, Y., & Rao, Y. 2020. Effects of scanning strategy and printing temperature on the compressive behaviors of 3D printed polyamide-based composites. *Polymers* 12(8). <https://doi.org/10.3390/polym12081783>
- Zhang, X., Fan, W., & Liu, T. 2020. Fused deposition modeling 3D printing of polyamide-based composites and its applications. *Composites Communications* 21: 100413. <https://doi.org/10.1016/j.coco.2020.100413>