

Prestasi Bahan Polimer Komposit Dicitak menggunakan Pemodelan Pemendapan Bersatu: Suatu Ulasan Ringkas

(Performance of Printed Composite Polymer Materials using Unified Deposition Modeling: A Brief Review)

NISA NAIMA KHALID, NABILAH AFIQAH MOHD RADZUAN*, ABU BAKAR SULONG & FARHANA MOHD FOUZDI

Precision Research Group, Department of Mechanical & Manufacturing Engineering, Faculty Engineering & Built Environment, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 UKM Bangi, Selangor Darul Ehsan, Malaysia

Diserahkan: 2 Julai 2021/Diterima: 7 Oktober 2021

ABSTRAK

Penambahan kandungan pengisi polimer komposit dapat meningkatkan kekonduksian elektrik dan terma yang baik, serta mempunyai kekuatan tegangan dan modulus yang tinggi telah memperluaskan aplikasi dalam industri peranti elektronik. Walau bagaimanapun, penambahan kandungan pengisi yang kurang daripada 20 bt.% akan mengakibatkan ketidaksempurnaan dalam penyebaran serta terdapat gumpalan pengisi ke dalam komposit. Ulasan kajian ini adalah untuk mengenal pasti pengaruh penambahan kandungan pengisi bagi bahan konduktif polimer komposit menggunakan percetakan 3D terhadap sifat elektrik, terma dan mekanikal. Ulasan ini merangkumi penggunaan bahan konduktif polimer komposit yang dibentuk melalui kaedah Pemodelan Pemendapan Bersatu (FDM) yang merupakan salah satu daripada percetakan 3D. Proses percetakan 3D yang dilapisi oleh lapisan demi lapisan akan menghasilkan struktur objek yang kompleks serta proses pembuatan yang cepat telah memberi sumbangan kepada penghasilan konduktif polimer komposit. Kekonduksian elektrik dapat ditingkatkan dengan penambahan kandungan pengisi sehingga 50 bt.%. Selain itu, penambahan kandungan pengisi yang dapat menawarkan permukaan yang lebih berkesan antara permukaan pengisi dan matriks telah meningkatkan suhu penghabluran (T_c) dan suhu puncak penghabluran (T_p) dalam sifat terma serta nilai kekuatan tegangan dan modulus dalam sifat mekanikal. Penambahan kandungan pengisi polimer komposit sehingga 50 bt.% dapat meningkatkan kesesuaian bahan untuk digunakan pada peranti elektronik.

Kata kunci: Polimer komposit; pemodelan pemendapan bersepadu; sifat mekanikal; sifat terma

ABSTRACT

The addition of filler content into polymer composite can improve electrical and thermal conductivity, while the resulting high tensile strength and modulus values have expanded its application in the electronic device industry. However, the addition of a filler less than 20 wt.% resulted in imperfections in the dispersion and agglomeration of filler within the composite. The aim of this study was to identify the influence of the addition of filler content into composite polymer conductive materials using 3D printing to determine the electrical, thermal, and mechanical properties. The scope of this study covers the use of composite polymer materials using Fused Deposition Modeling (FDM) method in 3D printing. The layer-by-layer element of the 3D printing process produces complex object structures and its rapid manufacturing processes contributes significantly to the production of conductive polymer composite. The study found that electrical conductivity can be improved with the addition of filler content. In addition, the addition of filler content offers a more effective surface between the filler surface and the matrix increased the crystallisation temperature (T_c) and crystallisation peak temperature (T_p) in terms of the thermal properties, as well as the tensile strength and modulus values in terms of the mechanical properties. The approach provided in this review study was that the addition of filler content of up to 50 wt.% in polymer composite can improve the suitability of the material to be used in electronic devices.

Keywords: Conductive polymer composites; filler content; 3D printing

PENDAHULUAN

Salah satu cabang sains dan teknologi pada masa kini adalah dengan penciptaan peranti elektronik yang

beroperasi dengan adanya kitaran elektron atau sebarang partikel yang bercaj elektrik (Hoerber et al. 2014; Saleh 2019). Peranti elektronik umumnya digunakan dalam

pelbagai aplikasi sebagai punca grid kuasa, alat bagi sistem pengangkutan serta khusus dalam komponen elektrik dalam kehidupan seharian (He et al. 2020). Kajian lepas melaporkan bahawa penggunaan bahan (konduktif polimer komposit) yang tinggi adalah penting dalam peranti elektronik kerana bahan bersifat konduktif apabila aliran arus elektrik menghasilkan medan magnet, arus sentiasa mengalir melalui bahan konduktif (Ruan et al. 2020; Saleh 2019). Namun begitu, bahan konduktif seperti logam dalam kajian lepas dengan sifat kekonduksian yang tinggi (200-300 S/cm) serta rintangan mekanikal yang kuat (>25 MPa) mempunyai kelemahan seperti kakisan (perlu kurang daripada $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) telah menyebabkan penyelidik mengkaji bahan alternatif lain untuk digunakan (Borba Marchetto et al. 2019; Gong et al. 2020; Wasti & Adhikari 2020). Kajian oleh Sabri et al. (2012) yang menggunakan bahan aluminium 6061 membuktikan apabila kekonduksian elektrik bahan berkurang menjadi 1-2 S/m dengan kehadiran kakisan pada sampel semasa proses berlaku. Oleh itu, bahan alternatif yang berunsur karbon iaitu grafit, grafin, tiub nanokarbon, serta komposit yang mempunyai sifat rintangan tinggi terhadap kakisan menjadi perhatian dalam penyelidikan (Nurul & Mariatti 2013). Kajian lepas menunjukkan penggunaan bahan polimer komposit seperti polipropilena diperkuat gentian karbon, epoksi diperkuat karbon hitam, dan epoksi diperkuat gentian karbon, mempunyai sifat rintangan kakisan yang baik, kekuatan dan ketegangan yang tinggi serta produk yang ringan (ketumpatan kurang $2.5\text{g}/\text{cm}^3$) telah menjadi alternatif sebagai bahan konduktif (Lima et al. 2020; Rajak et al. 2019; Sabri et al. 2012). Kajian ini dibuktikan daripada kajian lepas apabila penambahan karbon gentian nano ke dalam polipropilena/tiub nanokarbon berbilang dinding bagi polimer komposit telah meningkatkan rintangan kakisan (Agarwal et al. 2020; Verma et al. 2015).

Di samping itu, kekonduksian bahan turut dilihat berdasarkan sifat terma. Kekonduksian elektrik pada konduktif terma dikatakan bergantung antara permukaan pengisi dan matriks polimer komposit apabila tenaga haba akan dipindahkan di sepanjang jalur dan rangkaian konduksi terma (Al-Saleh & Sundararaj 2009; Hu et al. 2020; Taherian et al. 2013). Nisbah permukaan pengisi-matriks yang lebih tinggi (AR:40-100) menunjukkan keberkesanan yang lebih tinggi kepada kekonduksian terma dengan peningkatan sekitar 20% (Sreenivas et al. 2020). Oleh itu, pengurusan terma elektronik bagi polimer komposit dilihat berdasarkan penambahan pengisi yang sesuai untuk meningkatkan kekonduksian terma bagi

seluruh bahan komposit dalam membentuk jaringan penelusan bagi pengangkutan terma (Borba Marchetto et al. 2019). Namun begitu, kajian lepas menunjukkan dengan penambahan pengisi yang lebih tinggi (melebihi 50 bt.%) telah menyebabkan penurunan dalam kekonduksian terma yang disebabkan oleh lekatan yang lemah dengan penyebaran dan pengedaran pengisi yang kurang baik (Nurul & Mariatti 2013). Teori perkolasi diguna pakai dalam aplikasi peranti elektronik untuk menerangkan kebarangkalian pengisi konduktif dalam polimer untuk membentuk jalur aliran elektron yang bersambung. Penambahan pengisi kepada matriks polimer membawa kekonduksian apabila entiti pengisi dihubungkan antara satu sama lain (Cesano et al. 2016; Saleh 2019; Zare & Rhee 2020).

Selain itu, konduktif polimer komposit menunjukkan kekonduksian elektrik yang tinggi dengan penambahan pengisi pada bahagian mekanik bahan. Namun begitu, kajian lepas mendapati dengan penambahan pengisi yang tinggi dalam bahan komposit akan mewujudkan lubang yang besar (lekatan antara muka yang lemah antara gentian dan matriks) seterusnya menyebabkan keliangan yang besar dapat disebarkan dengan penambahan pengisi yang lebih tinggi (Costa et al. 2006; Sang et al. 2019). Tambahan lagi, penambahan pengisi daripada kajian lepas menunjukkan kewujudan rongga dalam lapisan yang akan mempengaruhi kekuatan ikatan sampel bercetak disebabkan oleh kurangnya lekatan antara muka di antara dua lapisan (Chen et al. 2020; El-Safty 2018; Tambrallimath et al. 2019). Kajian lepas menggunakan bahan tiub nanokarbon/propilena membuktikan apabila rongga yang berlaku pada sempadan pengisi dan matriks telah memberi kesan terhadap pengurangan tekanan yang dipindahkan kepada fasa matriks, seterusnya mengurangkan tahap orientasi matriks yang bergantung kepada kadar regangan (Hine et al. 2005).

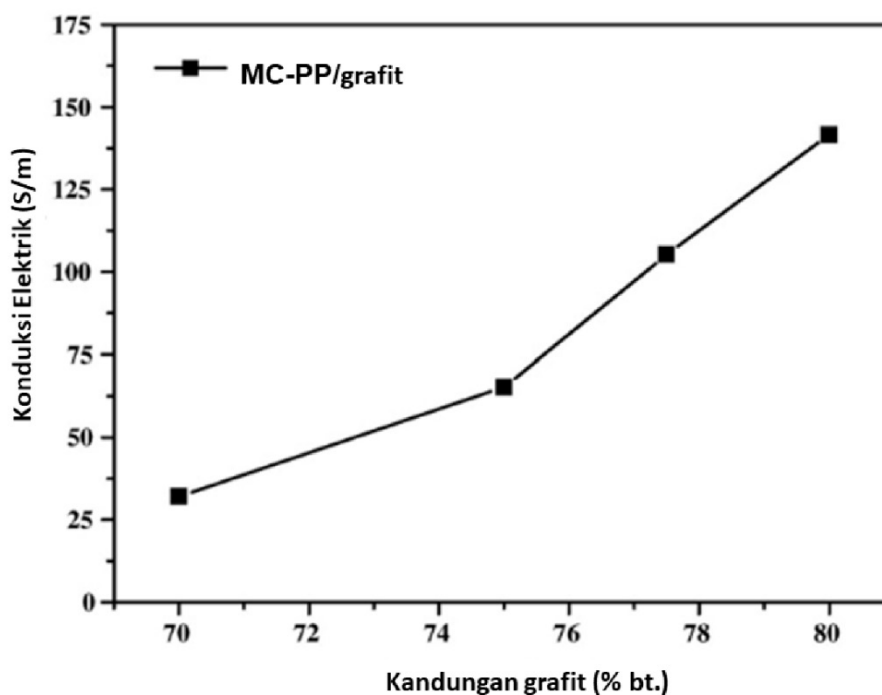
Proses bagi pembuatan dan pengeluaran peranti elektronik menjadi sukar apabila memerlukan teknik pemasangan dan sambungan dengan jumlah yang tinggi (Espera et al. 2019; Hoerber et al. 2014; Lall et al. 2016). Selain itu, kesukaran dalam membentuk struktur kompleks serta skop reka bentuk yang tidak terhad dalam peranti elektronik di samping dapat menjimatkan kos turut menjadi penghalang kepada pengeluaran elektronik (Hoerber et al. 2014; Ye et al. 2019; Zeng et al. 2020). Penyelidikan lepas mendapati teknologi baru menggunakan percetakan 3D dapat menghasilkan struktur objek dengan cepat dalam aplikasi melalui proses percetakan 3D yang merangkumi proses daripada sistem

data model 3D (CAD) dan dilapisi dengan lapisan demi lapisan untuk menghasilkan produk yang kompleks seperti yang dirancang (Blanco 2020; Ingrassia et al. 2017; Jankovics & Barari 2019; Weiss et al. 2015). Orientasi pada proses percetakan 3D berlaku apabila orientasi percetakan lapisan akan dicetak pada dua arah iaitu melintang (0°) dan menegak (90°) dengan arah pemuat. Kajian lepas menunjukkan percetakan pada orientasi yang berbeza mempunyai perbezaan dalam kekuatan tegangan dan modulus apabila orientasi percetakan akan memberi kesan kepada pertindihan filamen yang mengawal kandungan keliangan, ketinggian lapisan serta urutan lapisan yang dicetak pada dua lapisan (Abdalla et al. 2007). Oleh itu, kandungan pengisi dalam bahan polimer komposit adalah sangat penting untuk kekonduksian bahan bagi pengaliran elektrik dengan sempurna. Oleh kerana peranti elektrik menawarkan struktur yang kompleks untuk dibina, maka penyelidikan ini mengkaji kesan penambahan kandungan pengisi konduktif polimer komposit menggunakan percetakan 3D yang dapat mempengaruhi sifat elektrik, terma dan mekanikal.

SIFAT ELEKTRIK DAN TERMA BAGI BAHAN POLIMER KOMPOSIT

Kekonduksian elektrik meningkat dengan penambahan 3 peratus berat (bt.%) gentian karbon berbilang dinding ke dalam akrilonitril butadiena stirena (ABS) jika dibandingkan dengan ABS tulen apabila gentian karbon

diorientasikan dalam arah 0 dan 90° (McLouth et al. 2017; Sezer & Eren 2019). Kajian lain mengenai sifat elektrik bagi bahan grafit komposit turut membuktikan apabila komposit dicirikan mengikut perkolasi, kekonduksian elektrik dapat ditingkatkan dengan penambahan pengisi sebanyak 1.91 bt.%. Penambahan bahan pengisi grafit dapat meningkatkan kekonduksian elektrik dengan nilai maksimum sebanyak 500 S/m (Alemour et al. 2018; Tambrallimath et al. 2019). Namun, pertambahan nilai pengisi adalah terhad bergantung kepada nilai ambang perkolasi dengan kandungan kritikal berada di tahap optimum bagi membentuk pengisi pengalir yang berterusan serta berhubung antara satu sama lain lantas memberikan kekonduksian elektrik kepada bahan komposit (Mu et al. 2017; Zhou et al. 2006). Di samping itu, kajian lain dengan menggunakan 15 bt.% gentian karbon juga dilihat berupaya meningkatkan kekonduksian elektrik kepada 102 S/cm iaitu menghampiri nilai ambang perkolasi (Unterweger et al. 2020). Peningkatan kekonduksian elektrik ini dikaitkan apabila penambahan pengisi ke dalam polimer matriks telah memberi jalinan zarah untuk membentuk rangkaian konduktif yang luar biasa (Sharma et al. 2016; Zaghoul et al. 2017). Rajah 1 menunjukkan penambahan kekonduksian elektrik meningkat dengan peningkatan kandungan grafit antara julat 70 hingga 80 bt.% ke dalam penghabluran sederhana-polipropilena/grafit (MC-PP/grafit) (Liao et al. 2008). Peningkatan



RAJAH 1. Kesan penambahan kandungan grafit kepada kekonduksian elektrik (Liao et al. 2008)

kandungan grafit melebihi 77 bt.% telah meningkatkan kekonduksian melebihi 100 S cm^{-1} . Peningkatan kekonduksian elektrik memberi kesan yang baik apabila ia dapat mewujudkan jalan konduktif elektrik yang lebih banyak untuk menyediakan aliran pembawa arus (Nurul & Mariatti 2013).

Kajian diteruskan dengan perbincangan melalui sifat terma kerana aliran arus elektrik melalui bahan konduktif menghasilkan tenaga haba agar ia dapat dikaji melalui sifat terma. Peranti dengan reka bentuk terma yang baik bukan sahaja dapat menyejukkan komponen dalam peranti elektronik, malah ia juga dapat memberi jaminan dan penggunaan yang selamat dan selesa (Gong et al. 2020). Pemodelan Pemendapan Bersatu (FDM) dalam Percetakan 3D menjadi satu inovatif untuk membina bahagian berfungsi dengan sifat terma yang baik dalam menggunakan bahan komposit (Bai et al. 2015; Ganesh Sarvankar & Yewale 2019; Weiss et al. 2015). Penggunaan polimer komposit daripada kajian lepas menunjukkan penambahan 1.0 bt.% tiub nanokarbon berbilang dinding (MWNT) ke polipropilena (PP) membawa kepada peningkatan suhu penghabluran (T_c) sebanyak $126.58 \text{ }^\circ\text{C}$ dan suhu puncak penghabluran (T_p) pada $121.37 \text{ }^\circ\text{C}$ jika dibandingkan dengan polipropilena tulen dengan suhu penghabluran sebanyak $120.82 \text{ }^\circ\text{C}$ dan suhu puncak penghabluran pada $109.22 \text{ }^\circ\text{C}$ (Bao & Tjong 2008). Kajian lain juga membuktikan penambahan 5 bt.% gentian nanokarbon ke dalam polipropilena meningkatkan T_c dan T_p dengan 133.75 dan $129.90 \text{ }^\circ\text{C}$ berbanding sampel yang menggunakan polipropilena tulen dengan nilai T_c dan T_p pada 115.14 dan $108.07 \text{ }^\circ\text{C}$ (Sui et al. 2007). Peningkatan T_c dan T_p ini dikaitkan dengan komposisi bahan iaitu dengan penambahan kandungan karbon ke dalam polipropilena/karbon komposit sebagai bahan yang diperkuat dalam matriks komposit apabila ia dikatakan dapat menawarkan permukaan yang lebih berkesan untuk penumpukan rantai polimer semasa penghabluran (Logakis et al. 2010; Penumakala et al. 2020; Zhou et al. 2006).

Selain itu, sifat terma bagi polimer komposit juga dapat diuji dengan mengukur pengembangan haba menggunakan ukuran bahan segi empat tepat dengan panjang sekitar 60 mm dan luas keratan rentas sebanyak $5 \times 2 \text{ mm}^2$. Hasil daripada kajian lepas mendapati pengembangan haba menggunakan poliamida menghasilkan polimer pengecutan sebanyak $13800 \text{ } \mu\text{m/m}$ (Weiss et al. 2015). Pengecutan terma akan menghasilkan isi padu yang rendah dan ini dapat disesuaikan dengan aplikasi dalam elektronik yang memerlukan peranti yang ringan. Kajian oleh Choi et al.

(2016) mendapati pengecutan menurun menggunakan bahan akrilonitril butadiena stirena (ABS) serta suhu platform yang lebih tinggi pada $110 \text{ }^\circ\text{C}$, seterusnya dapat menghalang kegagalan reka bentuk (kesalahan reka bentuk sebanyak 3.44%). Percetakan 3D dibandingkan menggunakan suhu platform pada $50 \text{ }^\circ\text{C}$ dengan kesalahan reka bentuk sebanyak 93.7% dan mengalami kegagalan lekatan antara lapisan (Choi et al. 2016; Sanei & Popescu 2020). Kajian lepas mendapati kesalahan reka bentuk dapat dihindari dengan mengambil kira nilai toleransi geometri pada bahagian dicetak dengan mengukur nilai minimum dan maksimumnya. Selain itu, penjarangan (*alignment*) pada paksi x, y dan z perlu diambil kira (Lieneke et al. 2016). Di samping itu, kestabilan terma juga dapat ditingkatkan melalui pemilihan bahan yang sesuai. Hasil daripada kajian lepas melaporkan dengan penggunaan bahan seperti poliamida mempunyai nilai kestabilan yang tinggi setelah dicetak melalui percetakan 3D ($T_m = 198.8 \text{ }^\circ\text{C}$) berbanding bahan polimida yang belum dicetak ($T_m = 197.9 \text{ }^\circ\text{C}$) (Blok et al. 2018; Saeed et al. 2020). Jadual 1 menunjukkan penggunaan bahan poliamida melalui pelbagai proses dalam percetakan 3D bagi sifat terma. Analisis daripada sifat elektrik dan terma menunjukkan penambahan kandungan pengisi ke dalam polimer komposit dan pengembangan haba memainkan peranan penting dalam menentukan kekonduksian dan kestabilan terma yang baik. Selain daripada sifat terma yang baik, penambahan bahan polimer komposit juga dikaji melalui sifat mekanikal untuk mengetahui kekuatan tegangan, ketahanan dan ketumpatan bagi sesuatu komposit.

SIFAT MEKANIK POLIMER KOMPOSIT BERCETAK 3D

Pengaruh penambahan pengisi bagi sifat mekanik bahan polimer komposit dilihat melalui penambahan tiub nanokarbon dalam matriks polipropilena yang mana pertambahan pengisi tiub nanokarbon sehingga 3.31 bt.% telah menyebabkan penurunan dalam kekuatan tegangan. Perihal ini disebabkan oleh ketidaksempurnaan dalam penyebaran dan gumpalan pengisi tiub nanokarbon pada kandungan yang lebih tinggi seperti ditunjukkan dalam Rajah 2(a) - 2(c) (Angelopoulos et al. 2019; Oksman et al. 2009; Patti et al. 2015). Perihal ini disokong oleh kajian lain yang menunjukkan penambahan gentian karbon ke dalam poliamida diperkuat gentian karbon komposit yang lebih tinggi daripada 3.31 bt.% telah menyebabkan kebanyakan gentian akan tertarik keluar. Gentian pengisi ini tertarik keluar daripada matriks poliamida semasa ujian tegangan dilakukan seperti yang dibuktikan dalam JADUAL 1. Analisis sifat terma daripada TGA dan DSC bagi

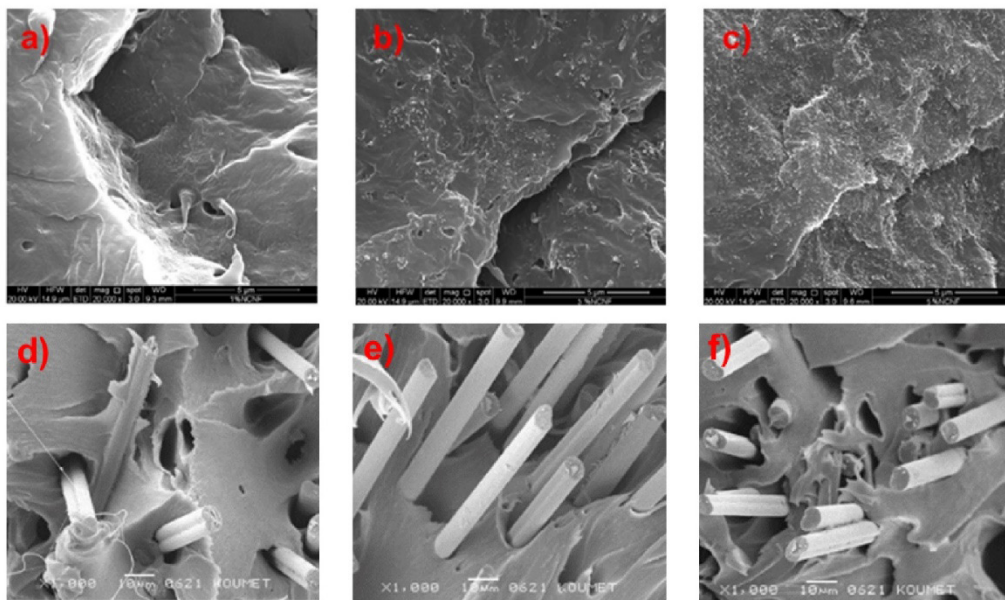
poliamida menggunakan pelbagai proses

Bahan	Proses	Suhu penghabluran, T_c (°C)	Suhu peralihan kaca, T_g (°C)	Suhu lebur, T_m (°C)	Rujukan
Poliamida-12	Selinter laser selektif (SLS)	147.4	-	173.0	Cai et al. (2021)
Poliamida-12/ poliamida 12 berisi manik kaca	Multi Jet Fusion bed fusion	146	44	186	
Poliamida-12/ tiub nanokarbon	Selinter laser selektif (SLS)	-	58.5	184.0	O' Connor & Dowling (2020)
Poliamida-6/ gentian karbon	Penyemperitan skru berkembar	-	52.7	-	
Poliamida-6/ gentian karbon pendek	Acuan suntikan	-	58.7	227.2	Bai et al. (2015)
Poliamida-6/ gentian karbon panjang	Penyemperitan skru berkembar	10	70	220	
Poliamida/ gentian karbon	Pemodelan Pemendapan Bersatu (FDM)	183.1	52.3	232.9	Hendlmeier et al. (2020)
Poliamida-6/ manik kaca/ styrene/ kopolimer anhidrida maleik	Penyemperitan skru berkembar	134.57	-	-	
Poliamida 6/ polistirena	Acuan suntikan	-	-	225	Karsli & Aytac (2013)
Poliamida/ gentian karbon berterusan	Percetakan 3D	38.4	-	198.8	
Poliamida-12/ manik kaca	Berbilang jet perlakuran	150	40	184	An et al. (2014)
Poliamida/ E-kaca	Fabrikasi lamina		75.8	230	
Poliamida-66/ gentian kaca/	Penyemperitan & Acuan suntikan	216.18	-	261.31	Lupone et al. (2020)
Poliamida/ Gentian karbon	Pemodelan Pemendapan Bersatu (FDM)	130	50	220	
Poliamida-66	Acuan suntikan	213.79	-	260.10	Zhang et al. (2015)
Poliamida-6/ gentian karbon/ aluminium oksida	Acuan suntikan	-	-	220.55	
Poliamida-12/ GB	Berbilang jet perlakuran	-	37.5	-	Tan et al. (2018)
Poliamida-66	Pemodelan Pemendapan Bersatu (FDM)	-	52	217	

Rajah 3(d)- 3(f) (Hemanth et al. 2014; Karsli & Aytac 2013). Hal ini disebabkan oleh permukaan gentian sehingga 8 bt.% tidak dilapisi sepenuhnya dengan matriks komposit (Karsli & Aytac 2013). Ini juga dapat dikaitkan dengan rekatan antara muka yang lemah antara matriks dan gentian apabila analisis lepas menggunakan sampel daripada permukaan yang patah hasil daripada ujian tegangan menggunakan bahan poliamida/gentian karbon komposit berdasarkan panjang gentian 1.2 cm dengan kandungan gentian yang berbeza (Karsli & Aytac 2013; Rassmann et al. 2010; Turaka & Vijaya Kumar Reddy 2019). Rekatan yang terjadi jelas menunjukkan kebergantungan antara kandungan gentian dan kekuatan tegangan apabila ia dikatakan dapat meningkatkan kekuatan tegangan dengan penambahan kandungan gentian yang maksimum pada 0 bt.% pengisi grafin ke dalam polipropilena/grafin komposit daripada kajian lepas (Garzón & Palza 2014; Idumah et al. 2019; Liang et al. 2016; Radzuan et al. 2021).

Namun begitu, kajian lain menunjukkan perbezaan dengan penambahan gentian karbon ke dalam

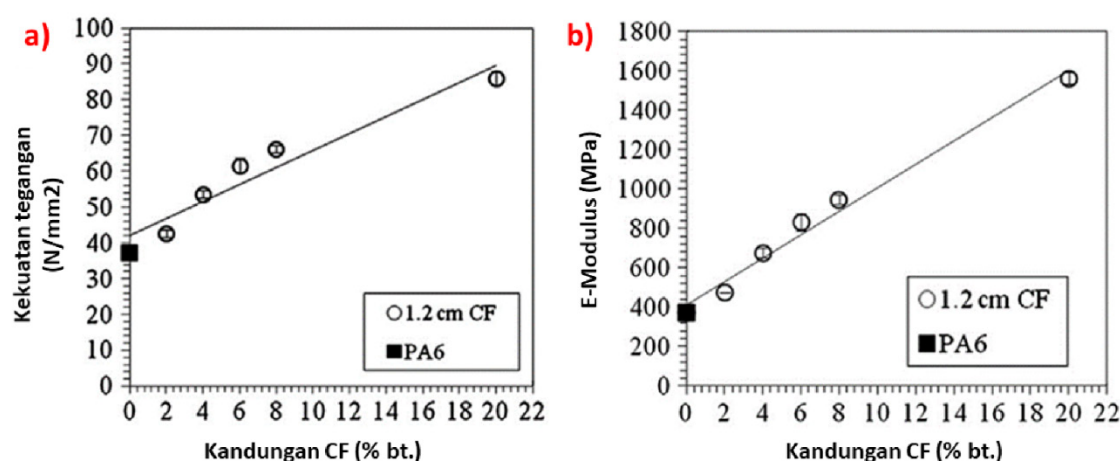
poliamida/gentian karbon (PA6/CF) komposit melalui ujian tegangan telah menunjukkan peningkatan dalam kekuatan tegangan dan nilai modulus apabila kandungan gentian bertambah sehingga 20 bt.%. Hal ini telah dibuktikan dengan kajian lepas apabila peningkatan kandungan gentian karbon (CF) dengan 20 bt.% serta panjang 1.2 cm diperkuat poliamida (PA6) telah meningkatkan kekuatan tegangan dan nilai modulus bagi komposit sebanyak 88 MPa dan 1600 MPa seperti Rajah 3 (Iragi et al. 2019; Karsli & Aytac 2013; Mortazavian et al. 2015). Penambahan gentian karbon bagi PA6/CF komposit daripada penyelidikan lepas sebanyak 20 bt.% mempunyai kekuatan tegangan dan nilai modulus tertinggi dengan kenaikan sebanyak 46 MPa kekuatan tegangan dan 1200 MPa modulus berbanding poliamida tulen. Kajian lain menunjukkan kecerondongan yang sama apabila penggunaan gentian karbon diperkuat poliamida mempunyai kekuatan tegangan yang tinggi pada 70.9 MPa dan modulus 3261 MPa jika dibandingkan dengan poliamida tulen iaitu kekuatan tegangan pada 51.8 MPa dan modulus pula pada 1073 MPa (Kausar 2020).



RAJAH 2. Imej mikrograf sebatian polipropilena (PP) yang mengandungi (a) 0.38, (b) 1.13 dan (c) 3.31 bt.% MWNT, imej mikrograf menunjukkan permukaan patah hasil ujian tegangan komposit poliamida/gentian karbon, (d) 1.2, (e) 1.2 dan (f) 1.2 cm-8 bt.% (Karsli & Aytac 2013; Patti et al. 2015)

Kajian oleh Abbass et al. (2020) mendapati dengan peningkatan kandungan gentian dapat mempengaruhi ketumpatan dan kekerasan dalam komposit. Kajian ini melaporkan nilai kekerasan meningkat apabila berlaku

penambahan dalam gentian daripada 50 bt.% dengan nilai kekerasan 45.2 kepada 64.2 bt.% dengan nilai kekerasan sebanyak 68.7. Tingkah laku yang terjadi ini dikaitkan apabila gentian merupakan bahan yang



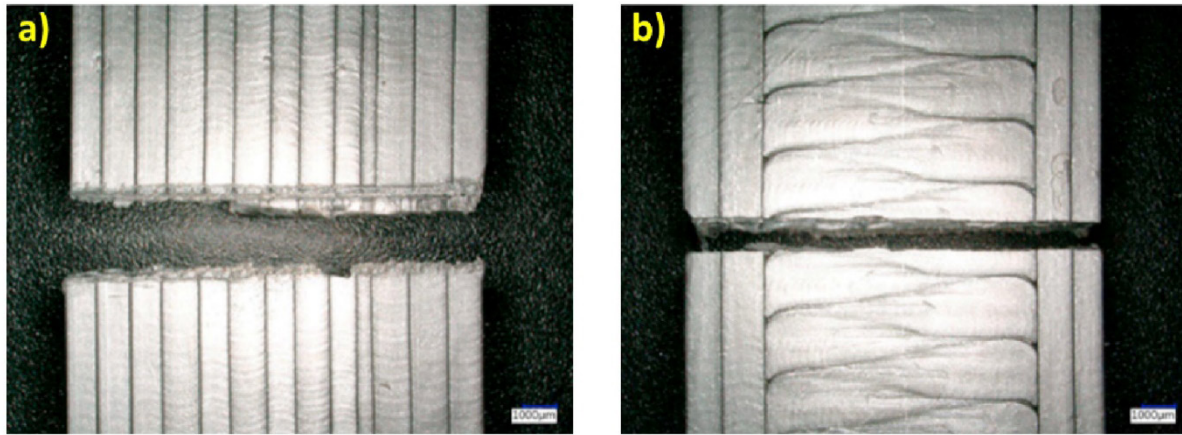
RAJAH 3. Pengaruh kandungan gentian karbon terhadap (a) kekuatan tegangan, dan (b) modulus (Karsli & Aytac 2013)

lebih keras berbanding bahan asas matriks. Oleh itu, penambahan kandungan gentian akan meningkatkan nilai kekerasan sesuatu komposit (Abbass et al. 2020; Bai et al. 2015; Taherian et al. 2013). Selain itu, ketumpatan bagi sesuatu bahan juga dapat ditingkatkan melalui penambahan gentian ke dalam bahan komposit. Kajian lepas menggunakan bahan gentian E-kaca pendek dalam komposit gentian E-kaca pendek/poliamida tuang menunjukkan ketumpatan komposit ditingkatkan daripada 1.15 g/cm^3 dengan gentian 5.5% isi padu gentian dengan penambahan kandungan gentian E-kaca pendek sebanyak 54.9% isi padu gentian yang mencapai nilai ketumpatan dengan 1.73 g/cm^3 (Çuvalci et al. 2014). Peningkatan ketumpatan berkadar dengan penambahan kandungan gentian akan mempengaruhi komposit berat disebabkan oleh ketumpatan secara langsung berkait rapat dengan berat komposit (Razali et al. 2019).

Tambahan lagi, orientasi percetakan juga memainkan peranan yang penting dalam percetakan 3D kerana ia dapat mempengaruhi ketepatan percetakan dan sifat mekanik pada sampel bercetak. Kajian lepas melaporkan kekuatan orientasi gentian pada sudut 90° jauh lebih rendah daripada kekuatan sampel pada orientasi 0° (Saeed et al. 2020). Kajian ini dibuktikan apabila orientasi pada sudut 0° (arah orientasi yang selari dengan arah bebanan) mempunyai nilai modulus dan ketahanan yang tinggi pada 130.24 dan 1.387 MPa berbanding pada orientasi 90° dengan nilai modulus pada 7.57 MPa dan ketahanan pada 0.030 MPa (Abdalla et al. 2007; Barkoula et al. 2008; Sharma et al. 2009). Arah orientasi 0° pada ujian tegangan menunjukkan sampel yang berorientasi pada arah-x lebih kuat berbanding

dengan arah-y (orientasi 90°) apabila gentian pada arah-y mengalami tekanan pada arah pemuatan ketika ujian tegangan menyebabkan penurunan kekuatan komposit (Lumpe et al. 2019; Lupone et al. 2020; Matsuzaki et al. 2016). Rajah 4 menunjukkan sampel patah hasil ujian tegangan pada orientasi 0° menunjukkan retakan berlaku secara berserenjang dengan arah orientasi manakala pada orientasi 90° retakan berlaku dengan berorientasikan sudut. Oleh itu, kekuatan komposit dalam percetakan 3D dipengaruhi kuat dengan orientasi percetakan yang pada arah-x (0°) berbanding orientasi percetakan pada arah-y (90°). Perbezaan nilai modulus dan ketahanan pada orientasi 0° dan 90° dikaitkan dengan keliangan yang terdapat pada sampel yang dicetak. Liang besar yang wujud pada orientasi 90° cenderung muncul di antara kawasan terikat di lapisan bersebelahan cenderung mempunyai ikatan yang lebih lemah, menyebabkan sifat mekanik lebih rendah (kurang 20-30%) berbanding pada orientasi 0° (Wang et al. 2019). Hal ini kerana, kegagalan antara lapisan cenderung untuk berlaku apabila sudut percetakan atau orientasi besar dibentuk pada orientasi 90° (Gebisa & Lemu 2019; Letcher 2016; Yao et al. 2020).

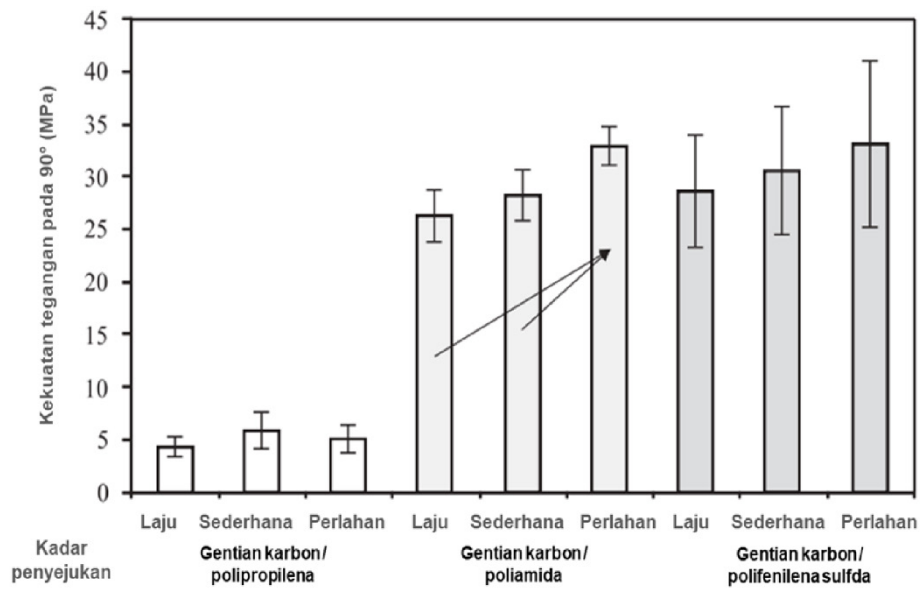
Penggunaan gentian karbon diperkuat poliamida daripada kajian lepas menunjukkan kekuatan tegangan pada 90° yang tinggi dengan kadar penyejukan perlahan pada 35 MPa (Sandler et al. 2004; Taketa et al. 2020; Tao et al. 2017). Kadar penyejukan perlahan ini akan membawa darjah penghabluran ke tahap lebih tinggi seterusnya memberi kesan pada sifat mekanik komposit. Rajah 5 jelas menunjukkan ketiga-tiga bahan menggunakan matriks daripada polipropilena,



RAJAH 4. Imej mikroskop bagi bahan asli asid polilaktik yang dicetak pada orientasi berbeza iaitu (a) 0, dan (b) 90° (Khosravani & Reinicke 2020)

poliamida dan polifenilena sulfida mempunyai kekuatan tegangan yang tinggi (30-35 MPa) pada kadar penyejukan perlahan. Peningkatan kekuatan tegangan sebanyak 5% dengan kadar penyejukan dapat dikaitkan dengan peningkatan tahap penghabluran (Parlevliet et al. 2006). Tambahan pula, didapati modulus matriks dipengaruhi oleh tahap pengkristalan dan matriks menjadi lebih

kaku setelah komposit disejukan dengan lebih lama (Taketa et al. 2020). Kajian lain membuktikan apabila tahap pengkristalan dan kadar penghabluran titik lebur rendah PA6 pada 189 °C berkurang dengan peningkatan suhu daripada 120 sehingga 180 °C. Selain itu, suhu penghabluran yang diukur menggunakan DSC (sebagai suhu puncak eksotermik semasa penghabluran) juga dikatakan menurun setanding dengan kadar penyejukan.



RAJAH 5. Kekuatan tegangan 90° CF/PA6 pada tiga kadar penyejukan yang berbeza (Taketa et al. 2020)

KESIMPULAN

Pendekatan inovatif menggunakan polimer komposit sebagai bahan konduktif polimer komposit bagi aplikasi elektronik melalui percetakan 3D dibandingkan melalui sifat elektrik, terma dan mekanik. Hasil ulasan mendapati kekonduksian elektrik dan terma yang baik dapat ditingkatkan sebanyak 10% hingga 20% dengan penambahan pengisi sebanyak 50 bt.% bahan polimer komposit bagi sifat elektrik dan terma. Selain itu, sifat mekanik bahan turut meningkatkan nilai tegangan dan modulus sebanyak 10% melalui penambahan kandungan polimer komposit. Namun, pertambahan nilai pengisi adalah terhad bergantung kepada nilai ambang perkolasi, yang mana nilai kandungan pengisi perlu berada di tahap optimum bagi membolehkan bahan komposit berfungsi sebagai komposit polimer pengalir. Ia selari dengan teori perkolasi yang mana, sifat mekanik suatu bahan komposit adalah menurun apabila nilai kekonduksian elektrik meningkat. Hal ini dapat dikaitkan serta diguna pakai dalam penghasilan bahan komposit berprestasi tinggi menggunakan pemodelan pemendapan bersatu (FDM) dengan memastikan faktor seperti ikatan antara muka serta susunan pencetakan antara bahan komposit adalah sempurna iaitu berada pada urutan galas beban yang sama bagi setiap bahan komposit dicetak. Dengan memastikan faktor ini dicapai, prestasi bahan komposit polimer yang dicetak menggunakan FDM dapat disesuaikan sifat mekanik dan sifat elektrik mengikut keperluan aplikasi.

PENGHARGAAN

Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada Pusat Penyelidikan dan Pengurusan Instrumentasi (CRIM), Universiti Kebangsaan Malaysia atas sokongan kewangan mereka untuk menyelesaikan kajian ini dengan nombor geran GGPM/2020/002 dan FRGS/1/2020/TK0/UKM/02/18.

RUJUKAN

- Abbass, O.A., Salih, A.I. & Al Hurmuzy, O.M. 2020. Study of the mechanical and physical properties of bio-composite material based on wheat starch and wheat straw fibers. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP. 012075. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/745/1/012075>
- Abdalla, F.H., Mutasher, S.A., Khalid, Y.A., Sapuan, S.M., Hamouda, A.M.S., Sahari, B.B. & Hamdan, M.M. 2007. Design and fabrication of low cost filament winding machine. *Materials & Design* 28(1): 234-239.
- Agarwal, H., Pandey, R. & Bhat, S.D. 2020. Improved polymer electrolyte fuel cell performance with membrane electrode assemblies using modified metallic plate: Comparative study on impact of various coatings. *International Journal of Hydrogen Energy* 45(37): 18731-18742.
- Al-Saleh, M.H. & Sundararaj, U. 2009. A review of vapor grown carbon nanofiber/polymer conductive composites. *Carbon* 47(1): 2-22.
- Al Abadi, H., Thai, H.T., Paton-Cole, V. & Patel, V.I. 2018. Elastic properties of 3D printed fibre-reinforced structures. *Composite Structures* 193: 8-18.
- Alemour, B., Yaacob, M.H., Lim, H.N. & Hassan, M.R. 2018. Review of electrical properties of graphene conductive composites. *International Journal of Nanoelectronics and Materials* 11(4): 371-398.
- An, H.J., Kim, J.S., Kim, K.Y., Lim, D.Y. & Kim, D.H. 2014. Mechanical and thermal properties of long carbon fiber-reinforced polyamide 6 composites. *Fibers and Polymers* 15(11): 2355-2359.
- Angelopoulos, P.M., Samouhos, M. & Taxiarchou, M., 2021. Functional fillers in composite filaments for fused filament fabrication; A review. *Materials Today: Proceedings* 37: 4031-4043.
- Bahrami, B., Ayatollahi, M.R., Sedighi, I., Pérez, M.A. & Garcia-Granada, A.A. 2020. The effect of in-plane layer orientation on mixed-mode I-II fracture behavior of 3D-printed poly-carbonate specimens. *Engineering Fracture Mechanics* 231: 107018.
- Bai, J., Goodridge, R.D., Yuan, S., Zhou, K., Chua, C.K. & Wei, J. 2015. Thermal influence of CNT on the polyamide 12 nanocomposite for selective laser sintering. *Molecules* 20(10): 19041-19050.
- Bao, S.P. & Tjong, S.C. 2008. Mechanical behaviors of polypropylene/carbon nanotube nanocomposites: The effects of loading rate and temperature. *Materials Science and Engineering A* 485(1-2): 508-516.
- Barkoula, N.M., Alcock, B., Cabrera, N.O. & Peijs, T. 2008. Fatigue properties of highly oriented polypropylene tapes and all-polypropylene composites. *Polymers and Polymer Composites* 16(2): 101-113.
- Blanco, I. 2020. The use of composite materials in 3D printing. *Journal of Composites Science* 4(2): 42.
- Blok, L.G., Longana, M.L., Yu, H. & Woods, B.K.S. 2018. An investigation into 3D printing of fibre reinforced thermoplastic composites. *Additive Manufacturing* 22(2010): 176-186.
- Borba Marchetto, D., Carneiro Moreira, D. & Ribatski, G. 2019. A review on polymer heat sinks for electronic cooling applications. In *Proceedings of the 17th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering*. ENCIT. pp. 25-28.
- Cai, C., Tey, W.S., Chen, J., Zhu, W., Liu, X., Liu, T., Zhao, L. & Zhou, K. 2021. Comparative study on 3D printing of polyamide 12 by selective laser sintering and multi jet fusion. *Journal of Materials Processing Technology* 288: 116882.

- Cesano, F., Zaccone, M., Armentano, I., Cravanzola, S., Muscuso, L., Torre, L., Kenny, J.M., Monti, M. & Scarano, D. 2016. Relationship between morphology and electrical properties in PP/MWCNT composites: Processing-induced anisotropic percolation threshold. *Materials Chemistry and Physics* 180: 284-290.
- Chen, Y., Jansen, K., Zhang, H., Romero Rodriguez, C., Gan, Y., Çopuroğlu, O. & Schlangen, E. 2020. Effect of printing parameters on interlayer bond strength of 3D printed limestone-calcined clay-based cementitious materials: An experimental and numerical study. *Construction and Building Materials* 262: 120094.
- Choi, Y.H., Kim, C.M., Jeong, H.S. & Youn, J.H. 2016. Influence of bed temperature on heat shrinkage shape error in FDM additive manufacturing of the ABS-engineering plastic. *World Journal of Engineering and Technology* 4(3): 186-192.
- Costa, M.L., Rezende, M.C. & de Almeida, S.F.M. 2006. Effect of void content on the moisture absorption in polymeric composites. *Polymer - Plastics Technology and Engineering* 45(6): 691-698.
- Çuvalci, H., Erbay, K. & İpek, H. 2014. Investigation of the effect of glass fiber content on the mechanical properties of cast polyamide. *Arabian Journal for Science and Engineering* 39(12): 9049-9056.
- El-Safty, S. 2018. Effect of speed of loading on compressive strength and flexural strength of dental resin-composites. *Egyptian Dental Journal* 64(1): 625-633.
- Espera, A.H., Dizon, J.R.C., Chen, Q. & Advincula, R.C. 2019. 3D-printing and advanced manufacturing for electronics. *Progress in Additive Manufacturing* 4(3): 245-267.
- Ganesh Sarvankar, S. & Yewale, S.N. 2019. Additive manufacturing in automobile industry. *International Journal of Research in Aeronautical and Mechanical Engineering* 7(4): 1-10.
- Garzón, C. & Palza, H. 2014. Electrical behavior of polypropylene composites melt mixed with carbon-based particles: Effect of the kind of particle and annealing process. *Composites Science and Technology* 99: 117-123.
- Gebisa, A.W. & Lemu, H.G. 2019. Influence of 3D printing FDM process parameters on tensile property of ultem 9085. *Procedia Manufacturing* 30: 331-338.
- Gong, M., Zhang, L. & Wan, P. 2020. Polymer nanocomposite meshes for flexible electronic devices. *Progress in Polymer Science* 107: 101279.
- He, Z., Yan, Y. & Zhang, Z. 2020. Thermal management and temperature uniformity enhancement of electronic devices by micro heat sinks: A review. *Energy* 261: 119223.
- Hemanth, R., Sekar, M. & Suresha, B. 2014. Effects of fibers and fillers on mechanical properties of thermoplastic composites. *Indian Journal of Advances in Chemical Science* 2: 28-35.
- Hendlmeier, A., Simon, Ž., Chutani, A. & Henderson, L.C. 2020. Generating short carbon fiber polyamide-6 composites from continuous carbon fiber - A preliminary examination of surface treatment and sizing effects. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 138: 106058.
- Hine, P., Broome, V. & Ward, I. 2005. The incorporation of carbon nanofibres to enhance the properties of self reinforced, single polymer composites. *Polymer* 46(24): 10936-10944.
- Hoerber, J., Glasschroeder, J., Pfeffer, M., Schilp, J., Zach, M. & Franke, J. 2014. Approaches for additive manufacturing of 3D electronic applications. *Procedia CIRP* 17: 806-811.
- Hu, D., Liu, H. & Ma, W. 2020. Rational design of nanohybrids for highly thermally conductive polymer composites. *Composites Communications* 21: 100427.
- Idumah, C.I., Ogbu, J.E., Ndem, J.U. & Obiana, V. 2019. Influence of chemical modification of kenaf fiber on xGNP-PP nano-biocomposites. *SN Applied Sciences* 1(10): 1-11.
- Ingrassia, T., Nigrelli, V., Ricotta, V. & Tartamella, C. 2017. Process parameters influence in additive manufacturing. In *Advances on Mechanics, Design Engineering and Manufacturing*, edited by Eynard, B., Salvatore, V.N., Oliveri, M., Peris-Fajarnes, G. & Rizzuti, S. New York: Springer. pp. 261-270.
- Iragi, M., Pascual-González, C., Esnaola, A., Lopes, C.S. & Aretxabaleta, L. 2019. Ply and interlaminar behaviours of 3D printed continuous carbon fibre-reinforced thermoplastic laminates; effects of processing conditions and microstructure. *Additive Manufacturing* 30: 100884.
- Jankovics, D. & Barari, A. 2019. Customization of automotive structural components using additive manufacturing and topology optimization. *IFAC-PapersOnLine* 52(10): 212-217.
- Karsli, N.G. & Aytac, A. 2013. Tensile and thermomechanical properties of short carbon fiber reinforced polyamide 6 composites. *Composites Part B: Engineering* 51: 270-275.
- Kausar, A. 2020. Advances in carbon fiber reinforced polyamide-based composite materials. *Advances in Materials Science* 19(4): 67-82.
- 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.
- Lall, P., Dornala, K., Lowe, R. & Foley, J. 2016. Survivability assessment of electronics subjected to mechanical shocks up to 25,000g. In *Proceedings of the 15th InterSociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, ITherm 2016*. Iterm. pp. 507-518.
- Letcher, T. 2016. Imece2014-39379 material property testing of 3D-printed specimen. In *Proceedings of the ASME 2014 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. IMECE2014. pp. 1-8.
- Liang, J.Z., Du, Q., Tsui, G.C.P. & Tang, C.Y. 2016. Tensile properties of graphene nano-platelets reinforced polypropylene composites. *Composites Part B: Engineering* 95: 166-171.
- Liao, S.H., Yen, C.Y., Weng, C.C., Lin, Y.F., Ma, C.C.M., Yang, C.H., Tsai, M.C., Yen, M.Y., Hsiao, M.C., Lee, S.J., Xie, X.F. & Hsiao, Y.H. 2008. Preparation and properties of carbon nanotube/polypropylene nanocomposite bipolar plates for polymer electrolyte membrane fuel cells. *Journal of Power Sources* 185(2): 1225-1232.

- Lieneke, T., Denzer, V., Adam, G.A.O. & Zimmer, D. 2016. Dimensional tolerances for additive manufacturing: Experimental investigation for fused deposition modeling. *Procedia CIRP* 43: 286-291.
- Lima, D.D., Campo, K.N., Button, S.T. & Caram, R. 2020. 3D thixo-printing: A novel approach for additive manufacturing of biodegradable Mg-Zn alloys. *Materials and Design* 196: 109161.
- Logakis, E., Pandis, C., Kyritsis, A., Pissis, P., Miuik, M., Omastová, M. & Pionteck, J. 2010. Indirect methods for the determination of optimal processing conditions in conductive polypropylene/carbon nanotubes composites. *Chemical Physics Letters* 498(1-3): 125-128.
- Lumpe, T.S., Mueller, J. & Shea, K. 2019. Tensile properties of multi-material interfaces in 3D printed parts. *Materials and Design* 162: 1-9.
- Lupone, F., Padovano, E., Veca, A., Franceschetti, L. & Badini, C. 2020. Innovative processing route combining fused deposition modelling and laser writing for the manufacturing of multifunctional polyamide/carbon fiber composites. *Materials and Design* 193: 108869.
- Matsuzaki, R., Ueda, M., Namiki, M., Jeong, T.K., Asahara, H., Horiguchi, K., Nakamura, T., Todoroki, A. & Hirano, Y. 2016. Three-dimensional printing of continuous-fiber composites by in-nozzle impregnation. *Scientific Reports* 6(1): 1-7.
- McLouth, T.D., Severino, J.V., Adams, P.M., Patel, D.N. & Zaldivar, R.J. 2017. The impact of print orientation and raster pattern on fracture toughness in additively manufactured ABS. *Additive Manufacturing* 18: 103-109.
- Mortazavian, S., Fatemi, A. & Khosrovaneh, A. 2015. Effect of water absorption on tensile and fatigue behaviors of two short glass fiber reinforced thermoplastics. *SAE International Journal of Materials and Manufacturing* 8(2): 435-443.
- Mu, Q., Wang, L., Dunn, C.K., Kuang, X., Duan, F., Zhang, Z., Qi, H.J. & Wang, T. 2017. Digital light processing 3D printing of conductive complex structures. *Additive Manufacturing* 18: 74-83.
- Nurul, M.S. & Mariatti, M. 2013. Effect of thermal conductive fillers on the properties of polypropylene composites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials* 26(5): 627-639.
- O'Connor, H.J. & Dowling, D.P. 2020. Comparison between the properties of polyamide 12 and glass bead filled polyamide 12 using the multi jet fusion printing process. *Additive Manufacturing* 31: 100961.
- Oksman, K., Mathew, A.P., Långström, R., Nyström, B. & Joseph, K. 2009. The influence of fibre microstructure on fibre breakage and mechanical properties of natural fibre reinforced polypropylene. *Composites Science and Technology* 69(11-12): 1847-1853.
- Parlevliet, P.P., Bersee, H.E.N. & Beukers, A. 2006. residual stresses in thermoplastic composites-a study of the literature-part i: Formation of residual stresses. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 37(11): 1847-1857.
- Patti, A., Barretta, R., Marotti de Sciarra, F., Mensitieri, G., Menna, C. & Russo, P. 2015. Flexural properties of multi-wall carbon nanotube/polypropylene composites: Experimental investigation and nonlocal modeling. *Composite Structures* 131: 282-289.
- Penumakala, P.K., Santo, J. & Thomas, A. 2020. A critical review on the fused deposition modeling of thermoplastic polymer composites. *Composites Part B: Engineering* 201: 108336.
- Radzuan, N.A.M., Gunasegran, M. & Naima, N. 2021. The effect of graphene addition on the Young ' s modulus and tensile strength of kenaf fibre composites. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. p. 012006.
- Rajak, D.K., Pagar, D.D., Menezes, P.L. & Linul, E. 2019. Fiber-reinforced polymer composites: Manufacturing, properties, and applications. *Polymers* 11(10): 1667.
- Rassmann, S., Reid, R.G. & Paskaramoorthy, R. 2010. Effects of processing conditions on the mechanical and water absorption properties of resin transfer moulded kenaf fibre reinforced polyester composite laminates. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 41(11): 1612-1619.
- Razali, N., Aseri, N.A.S., Dalingam, S. & Kamarolzman, A.A. 2019. The effect of fibre loading on the physical and mechanical properties of pineapple leaf fibre-reinforced biodegradable composites. *Journal of Physics: Conference Series* 1349(1): 8.
- Ruan, K., Shi, X., Guo, Y. & Gu, J. 2020. Interfacial thermal resistance in thermally conductive polymer composites: A review. *Composites Communications* 22: 100518.
- Sabri, M.A.M., Sulong, A.B., Chin, F.K. & Sahari, J. 2012. Effect of corrosion on the electrical conductivity of metals and polymer composite. *Jurnal Teknologi* 59(2): 81-85.
- Saeed, K., McIlhagger, A., Harkin-Jones, E., Kelly, J. & Archer, E. 2020. Predication of the in-plane mechanical properties of continuous carbon fibre reinforced 3D printed polymer composites using classical laminated-plate theory. *Composite Structures* 259: 113226.
- Salah, E. 2019. 3D and 4D printed polymer composites for electronic applications. In *3D and 4D Printing of Polymer Nanocomposite Materials: Processes, Applications, and Challenges*, edited by Sadasivuni, K.K., Deshmukh, K. & Al-Maadeed, M.A.S.A. Amsterdam: Elsevier Inc. pp. 505-525.
- Sandler, J.K.W., Pegel, S., Cadek, M., Gojny, F., Van Es, M., Lohmar, J., Blau, W.J., Schulte, K., Windle, A.H. & Shaffer, M.S.P. 2004. A comparative study of melt spun polyamide-12 fibres reinforced with carbon nanotubes and nanofibres. *Polymer* 45(6): 2001-2015.
- Sanei, S.H.R. & Popescu, D. 2020. 3D-printed carbon fiber reinforced polymer composites: A systematic review. *Journal of Composites Science* 4(3): 98.
- Sang, L., Han, S., Li, Z., Yang, X. & Hou, W. 2019. Development of short basalt fiber reinforced polylactide composites and their feasible evaluation for 3D printing applications. *Composites Part B: Engineering* 164: 629-639.

- Sezer, H.K. & Eren, O. 2019. FDM 3D printing of MWCNT re-inforced ABS nano-composite parts with enhanced mechanical and electrical properties. *Journal of Manufacturing Processes* 37: 339-347.
- Sharma, M., Rao, I.M. & Bijwe, J. 2009. Influence of orientation of long fibers in carbon fiber-polyetherimide composites on mechanical and tribological properties. *Wear* 267(5-8): 839-845.
- Sharma, S.K., Gupta, V., Tandon, R.P. & Sachdev, V.K. 2016. Synergic effect of graphene and MWCNT fillers on electromagnetic shielding properties of graphene-MWCNT/ABS nanocomposites. *RSC Advances* 6(22): 18257-18265.
- Sreenivas, H.T., Krishnamurthy, N. & Arpitha, G.R. 2020. A comprehensive review on light weight kenaf fiber for automobiles. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture* 3(4): 328-337.
- Sui, G., Zhong, W.H., Fuqua, M.A. & Ulven, C.A. 2007. Crystalline structure and properties of carbon nanofiber composites prepared by melt extrusion. *Macromolecular Chemistry and Physics* 208(17): 1928-1936.
- Taherian, R., Hadianfard, M.J. & Golikand, A.N. 2013. Manufacture of a polymer-based carbon nanocomposite as bipolar plate of proton exchange membrane fuel cells. *Materials & Design* 49: 242-251.
- Taketa, I., Kalinka, G., Gorbatiikh, L., Lomov, S.V. & Verpoest, I. 2020. Influence of cooling rate on the properties of carbon fiber unidirectional composites with polypropylene, polyamide 6, and polyphenylene sulfide matrices. *Advanced Composite Materials* 29(1): 101-113.
- Tambrallimath, V., Keshavamurthy, R.D.S., Koppad, P.G. & Kumar, G.S.P. 2019. Thermal behavior of PC-ABS based graphene filled polymer nanocomposite synthesized by FDM process. *Composites Communications* 15: 129-134.
- Tan, Y.L., Huang, C.H., Guo, Z.X. & Yu, J. 2018. Morphology and mechanical properties of polyamide 6/polystyrene blends prepared by diffusion and subsequent polymerization of styrene in polyamide 6 pellets. *Materials* 11(5): 776.
- Tao, Q., Pinter, G. & Krivec, T. 2017. Influence of cooling rate and annealing on the DSC Tg of an epoxy resin. *Microelectronics Reliability* 78: 396-400.
- Turaka, S. & Vijaya Kumar Reddy, K. 2019. Effect of hybrid MWCNTs/graphene on mechanical properties of reinforced unidirectional E-glass/epoxy composite. *Materials Today: Proceedings* 18: 1540-1547.
- Ueda, M., Kishimoto, S., Yamawaki, M., Matsuzaki, R., Todoroki, A., Hirano, Y. & Le Duigou, A. 2020. 3D compaction printing of a continuous carbon fiber reinforced thermoplastic. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 137: 105985.
- Unterweger, C., Mayrhofer, T., Piana, F., Duchoslav, J., Stifter, D., Poitzsch, C. & Fürst, C. 2020. Impact of fiber length and fiber content on the mechanical properties and electrical conductivity of short carbon fiber reinforced polypropylene composites. *Composites Science and Technology* 188: 107998.
- Verma, P., Saini, P. & Choudhary, V. 2015. Designing of carbon nanotube/polymer composites using melt recirculation approach: Effect of aspect ratio on mechanical, electrical and EMI shielding response. *Materials and Design* 88: 269-277.
- Wang, X., Zhao, L., Fuh, J.Y.H. & Lee, H.P. 2019. Effect of porosity on mechanical properties of 3D printed polymers: Experiments and micromechanical modeling based on X-ray computed tomography analysis. *Polymers* 11(7): 1154.
- Wasti, S. & Adhikari, S. 2020. Use of biomaterials for 3D printing by fused deposition modeling technique: A review. *Frontiers in Chemistry* 8: 315.
- Weiss, K.P., Bagrets, N., Lange, C., Goldacker, W. & Wohlgemuth, J. 2015. Thermal and mechanical properties of selected 3D printed thermoplastics in the cryogenic temperature regime. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. p. 012022.
- Yao, T., Ye, J., Deng, Z., Zhang, K., Ma, Y. & Ouyang, H. 2020. Tensile failure strength and separation angle of FDM 3D printing PLA material: Experimental and theoretical analyses. *Composites Part B: Engineering* 188: 107894.
- Ye, W., Lin, G., Wu, W., Geng, P., Hu, X., Gao, Z. & Zhao, J. 2019. Separated 3D printing of continuous carbon fiber reinforced thermoplastic polyimide. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 121: 457-464.
- Zaghloul, M.M.Y., Zaghloul, M.Y.M. & Zaghloul, M.M.Y. 2017. Experimental and modeling analysis of mechanical-electrical behaviors of polypropylene composites filled with graphite and MWCNT fillers. *Polymer Testing* 63: 467-474.
- Zare, Y. & Rhee, K.Y. 2020. Effects of carbon nanotubes and interphase properties on the interfacial conductivity and electrical conductivity of polymer nanocomposites. *Polymer International* 69(4): 413-422.
- Zeng, L., Li, P., Yao, Y., Niu, B., Niu, S. & Xu, B. 2020. Recent progresses of 3D printing technologies for structural energy storage devices. *Materials Today Nano* 12: 1-13.
- Zhang, M., Lu, S., Xu, E., He, M. & Yu, J. 2015. A new method for preparation of low melting point polyamide-6 (LPA6) and properties of compatibilized blends of LPA6/glass beads/styrene and maleic anhydride copolymer. *Science and Engineering of Composite Materials* 22(6): 599-606.
- Zhou, Z., Wang, S., Zhang, Y. & Zhang, Y. 2006. Effect of different carbon fillers on the properties of PP composites: Comparison of carbon black with multiwalled carbon nanotubes. *Journal of Applied Polymer Science* 102(5): 4823-4830.