

PENGARUH TEMPERATUR EKSTRUSI TERHADAP SIFAT FISIS, KIMIWI DAN KEKUATAN TARIK FILAMEN *ULTRA HIGH MOLECULAR WEIGHT POLYETHYLENE* (UHMWPE)

Candra Irawan^{1,a}, Budi Arifvianto^{1,2,b}, Muslim Mahardika^{1,2,c}

¹Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada
Jl. Grafika 2 Yogyakarta 55281, Indonesia

²Centre for Innovation of Medical Equipment and Devices (CIMEDs), Fakultas Teknik,
Universitas Gadjah Mada
Jl. Teknik Utara, Yogyakarta 55281, Indonesia

Email: ^acandrainirawanemail@gmail.com, ^bbudi.arif@ugm.ac.id, ^cmuslim_mahardika@ugm.ac.id

Abstrak

Fused deposition modelling (FDM) saat ini menjadi teknik *3D printing* yang populer untuk material polimer. Teknik ini menggunakan filamen polimer yang dilebur dan dideposisikan lapis demi lapis sehingga menjadi objek 3-dimensi. Meski demikian, jenis polimer yang bisa digunakan sebagai bahan baku proses FDM ini masih terbatas. Pada saat ini, belum ada filamen dari material *ultra high molecular weight polyethylene* (UHMWPE) yang tersedia di pasar. Oleh karenanya, studi awal untuk membuat filamen UHMWPE perlu dilakukan. Dalam penelitian ini, pengaruh temperatur proses ekstrusi filamen terhadap sifat fisis, kimiawi dan kekuatan tarik filamen UHMWPE dipelajari melalui serangkaian eksperimen. Proses ekstrusi UHMWPE dilakukan dengan menambahkan *polyethylene glycol* (PEG) dan *paraffin oil* (PO) untuk meningkatkan sifat mampu-proses material UHMWPE. Temperatur proses divariasikan pada temperatur 160 °C, 170 °C dan 180 °C. Hasil pengamatan dengan mikroskop elektron menunjukkan proses ekstrusi jenis polimer ini berlangsung dengan stabil. Karakterisasi dengan *differential scanning calorimetry* (DSC) menunjukkan terjadinya penurunan derajat kristalinitas filamen seiring dengan menurunnya temperatur ekstrusi. Hasil karakterisasi dengan *Fourier-transform infrared spectroscopy* (FTIR) menunjukkan tidak adanya perubahan komposisi kimia pada filamen akibat perubahan temperature ekstrusi. Sementara itu, kekuatan tarik filamen UHMWPE turun seiring dengan penurunan temperatur ekstrusi. Kekuatan tarik filamen UHMWPE tertinggi dihasilkan oleh proses ekstrusi dengan temperatur 180 °C, yakni mencapai 22,52 MPa.

Kata Kunci: UHMWPE, ekstrusi, filamen, 3D printing, temperatur

Abstract

Currently, *fused deposition modeling* (FDM) has become a popular *3D printing* technique for the fabrication of polymeric parts. In this technique, a polymer filament is melted and deposited layer-by-layer to form 3-dimensional objects. However, there are still limited number of polymer types that has been successfully used as a raw material for the FDM process. Up to now, there is still no filament made from *ultra high molecular weight polyethylene* (UHMWPE) available in the market. Therefore, a preliminary study concerning the fabrication of such UHMWPE filament needs to be conducted. In this study, the influence of extrusion temperature used in the fabrication of UHMWPE filament on the physical, chemical, and tensile strength of such filament was studied. The extrusion process was carried out by adding *polyethylene glycol* (PEG) and *paraffin oil* (PO) to improve the processability of UHMWPE material and with temperatures of 160 °C, 170 °C, and 180 °C. The result of examination by using electron microscope revealed that extrusion process of this polymer was running stable. The characterization by using *differential scanning calorimetry* (DSC) indicated a decrease in the degree of filament crystallinity as the extrusion temperature decreased. The characterization by using *Fourier-transform infrared spectroscopy* (FTIR) indicated no changes in the chemical compositions over the filament products with the increasing extrusion temperature applied. Meanwhile, it is also indicated from this study that the maximum tensile strength decreased as the extrusion temperature got lower. In this case, the highest maximum tensile strength could be achieved by the UHMWPE filament extruded with temperature of 180 °C, i.e., with an average tensile strength of 22.52 MPa.

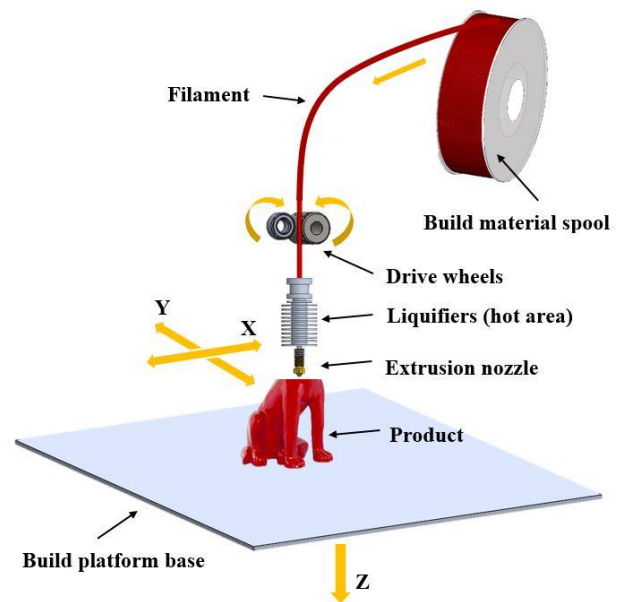
Keywords: UHMWPE, extrusion, filament, 3D printing, temperature

I. PENDAHULUAN

Additive manufacturing atau *3D printing* adalah proses pembuatan sebuah objek dari desain digital melalui penambahan material lapis demi lapis. Teknologi ini memungkinkan dibuatnya sebuah objek tanpa menyisakan material yang tidak digunakan atau terbuang, misalnya tatal atau *chips*. Kelebihan ini menjadikan teknik *3D printing* lebih ekonomis dari segi penggunaan material. Selain itu, teknik ini mampu membuat objek dengan bentuk yang kompleks tanpa harus membuat cetakan terlebih dahulu. Teknik *3D printing* juga mampu membuat bentukan internal suatu objek yang sulit dicapai dengan proses konvensional. Dengan kemampuan tersebut, proses pembuatan objek menjadi lebih mudah dan lebih cepat. Istilah *3D printing* lebih banyak dikenal di kalangan masyarakat awam dikarenakan prinsip kerja dari proses *additive manufacture* ini dipandang merupakan analogi 3D dari *printer* 2D yang umum dijumpai (Bourell, 2016).

Dalam perkembangannya, salah satu jenis *3D printing* yang populer digunakan adalah *fused deposition modelling* (FDM). Pada prinsipnya, teknik ini dilakukan dengan melelehkan material polimer berbentuk kawat kemudian diekstrusi melalui *nozzle*. Gerakan relatif antara *nozzle* dan meja akan membentuk lapisan-lapisan hingga mencapai bentuk akhir produk dalam bentuk 3-dimensi. Gambar 1 merupakan skema proses *3D printing* FDM.

Dengan berbagai kelebihannya, *3D printing* banyak dimanfaatkan untuk berbagai bidang salah satunya adalah *rapid prototyping*. *Rapid prototyping* dapat didefinisikan sebagai sebuah proses pembuatan model berskala secara cepat sebagai validasi bentuk desain. Saat ini, para arsitek dan *designer* memanfaatkan teknologi ini untuk membuat purwarupa (*prototype*) karena prosesnya cepat dan mudah namun tetap memiliki nilai fungsi dan estetika. Selain itu, *rapid prototyping* banyak digunakan didalam industri manufaktur. Gaget (2019) menyebutkan bahwa hasil survei yang dilakukan pada 2018 melaporkan adanya 93% responden memandang *3D printer* sebagai teknologi yang memudahkan dalam proses perancangan produk. Selain itu, sebanyak 46% perusahaan memanfaatkan *3D printer* untuk penelitian dan pengembangan produknya.



Gambar 1. Skema proses *3D printing* FDM

Untuk keperluan biomedis, ilmuwan biomaterial memanfaatkan kemampuan *3D printing* untuk mencetak produk-produk biomedis seperti sendi dan tulang buatan yang memiliki bentuk kompleks (Kalsoom dkk., 2016). Salah satu tantangan yang ditemui dalam menggunakan teknik *3D printing* untuk produk biomedis adalah ketiadaan bahan baku material tertentu yang akan dicetak dengan teknik ini, misalnya *ultra-high molecular weight polyethylene* (UHMWPE) yang banyak digunakan sebagai material polimer untuk sendi tiruan (Kurtz, 2016).

UHMWPE adalah polimer unik dengan sifat fisik dan mekanik yang luar biasa. Diantara sifat-sifatnya ini yang paling penting adalah ketahanan benturan, ketahanan abrasi, kemampuan pelumasan dan non-reaktif terhadap bahan kimia. UHMWPE memiliki berat molekul yang sangat tinggi yaitu diatas $1,5 \times 10^6$ g/mol (Kurtz, 2016). Dengan berat molekul yang tinggi mengakibatkan UHMWPE memiliki nilai viskositas yang tinggi dan *flowability* yang rendah. Ketika dipanaskan hingga melewati titik lelehnya, UHMWPE hanya akan bersifat lentur seperti karet dan tidak mencair. Oleh karenanya, sejauh ini UHMWPE dianggap sulit untuk diproses melalui ekstrusi.

Fang dan Cao (2011) menyebutkan bahwa proses ekstrusi UHMWPE yang dilakukan pada *temperature window* menghasilkan tekanan proses yang rendah dan stabil. *Temperature window* merupakan interval suhu yang sempit, dimana terjadi fenomena penurunan hambatan aliran selama pengamatan *rheology* (sifat mampu alir)

UHMWPE. Pada interval suhu yang sempit ini hambatan aliran leleh yang terjadi pada titik minimum sehingga *temperature window* dapat dijadikan acuan sebagai temperatur proses ekstrusi UHMWPE (Waddon dan Keller, 1990). *Temperature window* UHMWPE menurut Fang dan Cao adalah 153-160 °C (yakni sekitar 10 °C di atas titik lebur material) atau lebih tinggi apabila *molecular weight* semakin tinggi. Meski dengan memanfaatkan *temperature window* tekanan proses menjadi rendah, proses ekstrusi UHMWPE *single screw* tetap sulit dilakukan tanpa adanya *plasticizer* dan pelumas. Modifikasi mesin ekstrusi *single screw* dengan menggunakan rotor eksentris dapat dilakukan untuk membantu memproses UHMWPE tanpa menggunakan *plasticizer* atau pelumas (Zhang dan Liang, 2018).

Selain parameter proses, bahan tambahan pada UHMWPE juga dapat mempengaruhi hasil ekstrusi polimer ini. Sebagai contoh, sifat ketahanan aus UHMWPE dapat ditingkatkan dengan menambahkan 1 wt% *carbon nanofiller* pada UHMWPE. Di sisi lain, sifat mampu proses (*processability*) UHMWPE dapat ditingkatkan dengan menambahkan 2 wt% *paraffin oil* (Yousef dkk., 2017). Penambahan <10 wt% *collagen* pada UHMWPE dapat berperan sebagai *plastisizer* sehingga meningkatkan sifat mampu proses material tersebut walaupun di sisi lain zat kimia ini menurunkan sifat mekanis UHMWPE (Senra dan Marques, 2020). Penambahan 5 phr (*per hundred resin*) PEG (UHMWPE/PEG) dapat meningkatkan sifat mampu proses, tetapi menurunkan sifat mekanis UHMWPE. Studi yang dilakukan oleh Li dkk. (2019) menunjukkan bahwa dengan ditamapkannya HDPE (UHMWPE/PEG/HDPE) sifat mampu proses dan mekanis UHMWPE menjadi lebih baik (Li dkk., 2019). Hasil pengukuran *melt flow index* (MFI) menunjukkan 50 wt% HDPE dapat menaikkan nilai *processability* UHMWPE dengan hasil ekstrusi konstan. Selain itu, PEG tidak dapat menyatu langsung dengan UHMWPE walaupun dapat berperan sebagai pelumas internal (Ramli dkk., 2016).

UHMWPE banyak dimanfaatkan sebagai bahan dari produk biomedis. Oleh sebab itu bahan campuran produk UHMWPE juga harus dipastikan keamanannya secara medis. Veronese dan Pasut (2005) menyebut bahwa PEG merupakan polimer yang tidak beracun dan mendapatkan persetujuan Badan Pengawas Obat dan Makanan Amerika Serikat (*Food and Drug Administration*.) Selain itu, penambahan PEG tidak menghasilkan mitigasi yang signifikan terhadap respon benda asing. Dengan mempertimbangkan respon benda asing tersebut

dapat diambil kesimpulan bahwa PEG aman digunakan sebagai material produk biomedis (Lee dkk., 2017).

Paraffin oil (PO) dimasukkan sebagai bahan tidak aktif untuk penggunaan di bidang farmasi oleh FDA (Gruber dkk., 2020). Di Inggris, selain telah diterima untuk aplikasi di bahan makanan tertentu, *paraffin* juga digunakan dalam obat-obatan nonparenteral (bukan obat yang disuntikkan) berlisensi di Inggris dan dimasukkan dalam daftar bahan bukan obat yang dapat diterima di Kanada (Rowe dkk., 2009).

Dalam penelitian ini, dilakukan eksperimen untuk menentukan pengaruh temperatur proses ekstrusi terhadap sifat fisis, kimiawi dan mekanis filamen UHMWPE yang dibuat dari campuran tatal polimer ini dengan PEG dan PO. Proses pembuatan filamen UHMWPE dilakukan menggunakan mesin ekstrusi filamen *single screw*.

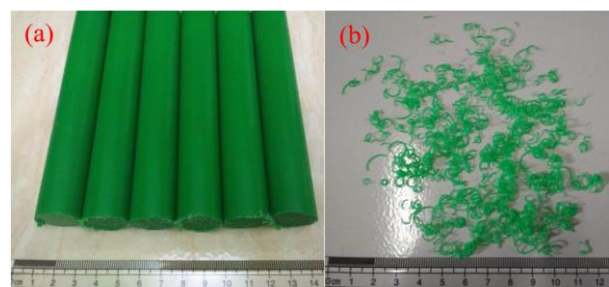
II. METODE

Bahan

Bahan baku yang digunakan pada pembuatan filamen UHMWPE ini adalah *rod* UHMWPE dengan diameter 22 mm, *polyethylene glycol* (PEG) cair dengan *molecular weight* 400 g/mol dan *paraffin oil* (PO) dengan massa jenis 0,845-0,905 g/ml. Karakterisasi bahan baku *rod* UHMWPE dilakukan menggunakan uji *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) dan *Differential Scanning Calorimetry* (DSC).

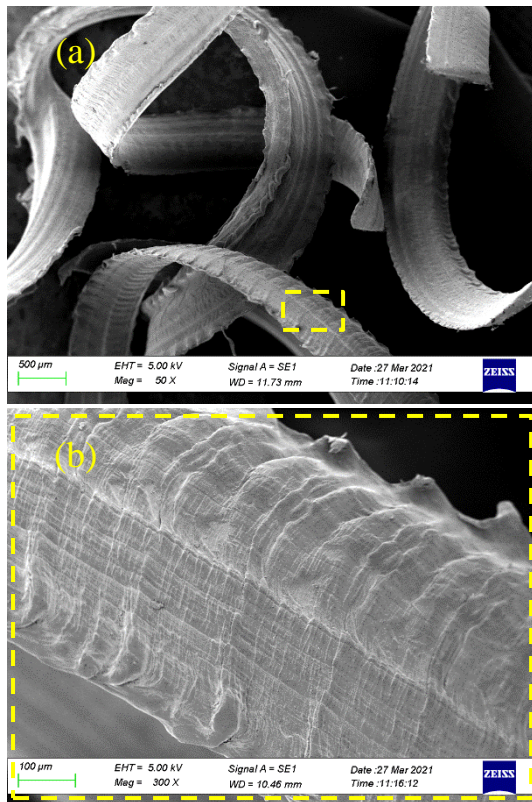
Preparasi Bahan Baku

Sebelum dapat digunakan untuk pembuatan filamen, bahan *rod* UHMWPE diolah terlebih dahulu sehingga diperoleh bentuk tatal (*scrap*) dengan menggunakan mesin bubut CNC (Emco T-242, Austria). Teknik pembubutan yang dilakukan menggunakan pergerakan *facing* dengan kedalaman pemotongan 0,5 mm. Tatal hasil pembubutan yang masih panjang kemudian dipotong-potong menggunakan proses *shearing* sehingga diperoleh panjang ± 10 mm. Gambar 2 merupakan *rod* UHMWPE (a) sebelum dan (b) sesudah dibubut.



Gambar 2. (a) *Rod* UHMWPE dan (b) tatal UHMWPE sesudah proses bubut

Untuk memastikan kebersihannya, tatal UHMWPE disterilkan dengan uap dalam panci pemanas elektrik bertekanan pada temperatur ± 115 °C selama 30 menit. Gambar 3 adalah visualisasi mikroskopis (a) tatal dan (b) permukaannya setelah proses sterilisasi. Sebagaimana terlihat pada gambar tersebut, tatal yang dihasilkan cukup bersih dan tidak terdapat kontaminasi benda asing akibat proses pembubutan.



Gambar 3. (a) Tatal UHMWPE dan (b) permukaannya

Ekstrusi Filamen UHMWPE

Proses ekstrusi dilakukan dengan campuran tatal UHMWPE, PEG dan *paraffin oil* (PO) dengan fraksi massa masing-masing material: 80 wt% UHMWPE, 20 wt% PEG dan 2 phr PO, sehingga diperoleh massa total sebesar 50 g. Bahan-bahan tersebut kemudian dicampur dengan menggunakan *planetary ball mill* BKBM-V0.4 (Biobase, China) dengan kecepatan putar 500 rpm selama 30 menit. Selanjutnya, *preheating* dilakukan dengan menggunakan oven listrik pada suhu 100 °C selama 30 menit dan langsung dimasukkan ke dalam *hopper* mesin ekstrusi, sehingga temperatur hasil *preheating* tidak menurun drastis. Lubang *dies* mesin ekstrusi yang digunakan berdiameter 1,75 mm. Proses ekstrusi dilakukan pada kecepatan putar *screw* 11 rpm. Adapun temperatur proses ekstrusi diatur pada suhu 160, 170 dan 180 °C. Tabel 1

merupakan variasi pembuatan filamen UHMWPE pada penelitian ini.

Tabel 1. Variasi pembuatan filamen UHMWPE

No.	UHMWPE (wt%)	PEG (wt%)	PO (phr)	Screw (rpm)	Temp. (°C)
1	80	20	2	11	160
2					170
3					180

Karakterisasi Filamen UHMWPE

Karakterisasi sifat-sifat fisis dan kimiawi filamen UHMWPE hasil ekstrusi dilakukan dengan menggunakan DSC dan FTIR. Pengujian DSC dilakukan pada mesin DSC-60 Plus (Shimadzu, Jepang) untuk tatal dan filamen UHMWPE hasil ekstrusi. Pengujian ini menggunakan 4 mg sampel yang disegel rapat pada sebuah tempat khusus teraliri gas nitrogen dengan laju 10 ml/min serta dijalankan pada rentang temperatur 30 s.d. 300 °C. Laju pemanasan yang diterapkan dalam pengujian DSC ini sebesar 10 °C/menit. Dari hasil uji DSC ini, dapat diperoleh derajat kristalinitas UHMWPE (%X) melalui persamaan (1):

$$\%X = \frac{\Delta H_{endotherm}}{\Delta H_f} \times 100\% \dots (1)$$

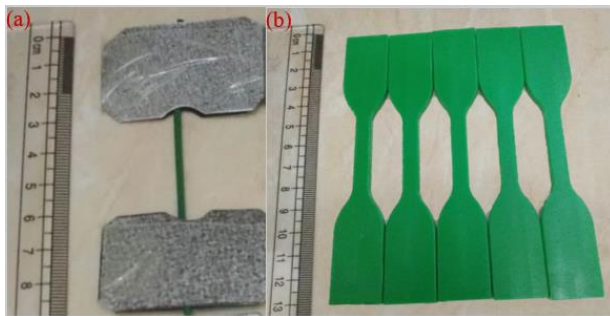
dimana $\Delta H_{endotherm}$ adalah kalor endotermik (J/g) dan ΔH_f adalah kalor fusi dari UHMWPE murni (289 J/g) menurut literatur (Kurtz, 2016). Derajat kristalinitas dijadikan parameter perubahan sifat fisis dari filamen yang dihasilkan.

Pengujian FTIR dilakukan untuk mendapatkan informasi mengenai ikatan kimia dan molekul yang menyusun filamen UHMWPE hasil ekstrusi. Pengujian dilakukan menggunakan mesin Nicolet iS10 (*Thermo Scientific*, Amerika Serikat) dengan pelet KBr dan *detector* Deuterated TriGlycine Sulfate (DTGS). Pengujian ini menggunakan rentang bilangan gelombang antara 400 sampai 4.000 cm^{-1} . Filamen dianalisis dalam mode ATR (*Attenuated total reflection*) dan hasil spektra dinormalisasi untuk dapat dianalisa dengan jejak FTIR UHMWPE. Sifat campuran ikatan-ikatan senyawa penyusun dari UHMWPE, PEG dan PO dijadikan parameter perubahan sifat kimia dari filamen yang dihasilkan.

Morfologi filamen UHMWPE diamati dengan menggunakan *scanning electron microscope* (Zeiss EVO 10, Jerman). Sebelum pengamatan dilakukan, sampel dilapisi dengan material *gold paladium* terlebih dahulu.

Pengujian mekanis filamen UHMWPE

Pengujian tarik filamen UHMWPE dilakukan dengan menggunakan lima buah sampel dan mengikuti standar ASTM D3379-75 seperti terlihat pada Gambar 4(a). Pengujian dilakukan pada kecepatan penarikan 50 mm/min dengan beban maksimum 200 N. Sebagai pembandingan, uji tarik juga dilakukan pada bahan baku *rod* UHMWPE murni yang dibentuk sesuai dengan ukuran standar dalam ASTM D638-14 tipe-IV seperti terlihat pada Gambar 4(b). Nilai *ultimate tensile strength* hasil uji tarik dijadikan parameter perubahan sifat kekuatan tarik dari filamen yang dihasilkan.



Gambar 4. Sampel uji tarik (a) filamen UHMWPE sesuai standar ASTM D3379-75 dan (b) UHMWPE murni sesuai standar ASTM D638-14 tipe-IV

Metode analisis yang digunakan dalam penelitian ini adalah statistik sederhana untuk mendapatkan nilai rerata dan standar deviasi, sehingga pengaruh variabel *independent* (parameter proses dan komposisi UHMWPE/PEG) terhadap variabel *dependent* (hasil pengujian) dapat ditentukan.

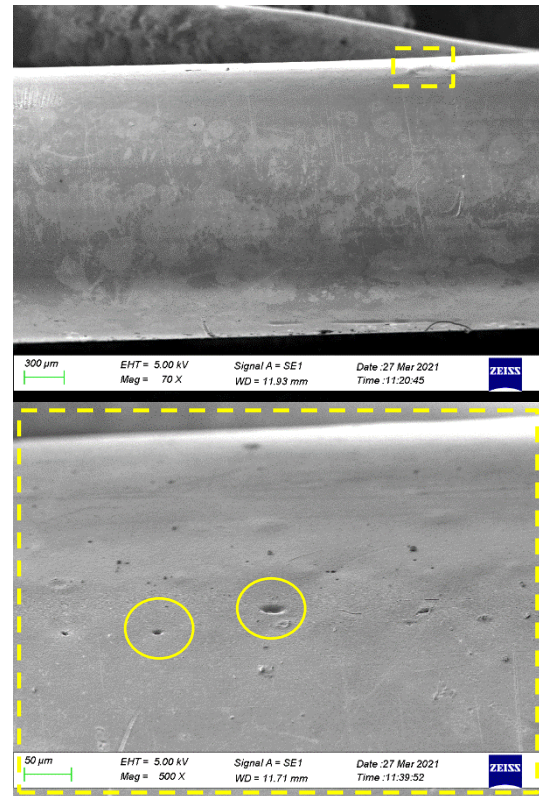
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Permukaan filamen UHMWPE

Pada Gambar 5 terlihat permukaan filamen UHMWPE yang dihasilkan dari proses ekstrusi. Secara kasat mata, permukaan filamen terlihat rata dan tidak bergelombang. Hal ini mengindikasikan proses ekstrusi berlangsung dengan tekanan yang stabil. Selain itu, permukaan yang rata juga mengindikasikan bahan-bahan pada filamen telah tercampur secara homogen. Meski demikian, di beberapa lokasi pada permukaan filamen terdapat pori-pori yang berukuran puluhan mikrometer. Lubang-lubang tersebut mengindikasikan adanya porositas akibat udara yang terperangkap di dalam filamen. Udara tersebut dimungkinkan berasal dari (1) penguapan bahan-bahan filamen (UHMWPE, PEG dan PO) saat dipanaskan, atau (2) air yang masih menempel pada tatal setelah proses sterilisasi

uap. Semakin banyak porositas akan berakibat pada turunnya kekuatan suatu material (Arifvianto dkk., 2017).

Selain itu, lubang-lubang tersebut dapat pula dikarenakan terjadinya penyusutan (*shrinkage*). Hal ini dikarenakan UHMWPE termasuk material dengan sifat mampu susut yang signifikan saat proses pembekuan atau solidifikasi (Dontsov dkk., 2020). Penyusutan pada filamen UHMWPE dapat disebabkan oleh proses solidifikasi yang tidak merata saat filamen keluar dari mesin ekstrusi.



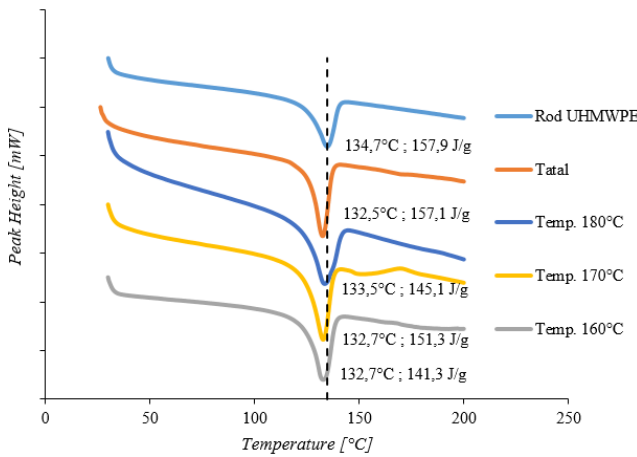
Gambar 5. Bentuk permukaan filamen UHMWPE hasil ekstrusi

Hasil Karakterisasi dengan DSC

Karakterisasi dengan menggunakan DSC dilakukan untuk mengetahui jumlah panas yang dibutuhkan untuk mencapai titik leleh. Titik leleh menggambarkan perubahan fase dari padat ke cairan tanpa mengalami perubahan komposisi. Gambar 6 adalah grafik yang diperoleh dari pengujian DSC yang dilakukan pada *rod* UHMWPE murni, tatal dan filamen.

Pada hasil uji DSC terdapat nilai kalor endotermik material yang dapat dijadikan acuan untuk menghitung nilai derajat kristalinitas UHMWPE, sebagaimana yang dilakukan oleh Alam dkk., (2019) yang membandingkan nilai derajat kristalinitas UHMWPE hasil uji DSC dan XRD (*X-ray diffraction*). Dari kedua pengujian tersebut

derajat kristalinitas yang didapatkan hampir sama, hanya terdapat selisih $\pm 1\%$.

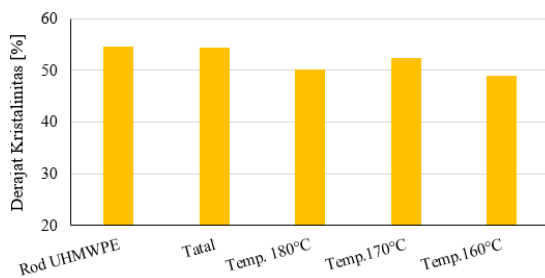


Gambar 6. Hasil DSC *rod* UHMWPE, tatal dan filamen

Sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2, hasil DSC *rod* UHMWPE ini menunjukkan puncak titik leleh terjadi pada suhu 134,7 °C dan kalor endotermik sebesar 157,9 J/g. Dengan menggunakan persamaan (1), derajat kristalinitas yang diperoleh pada UHMWPE hasil ekstrusi adalah sekitar 54,6%. Hal ini selaras dengan dua ciri umum dari jejak DSC dari UHMWPE, yakni bahwa puncak titik leleh material ini berada pada temperature sekitar 137 °C dan derajat kristalinitas berada di sekitar 50% (Kurtz, 2016). Hasil pengujian DSC dari tatal dan filamen UHMWPE menunjukkan terjadinya penurunan puncak titik leleh.

Tabel 2. Hasil uji DSC

Spesimen	Titik leleh (°C)	Heat endotherm (J/g)	Derajat kristalinitas (%)
Rod	134,7	157,9	54,6
Tatal	132,5	157,1	54,4
Filamen 180 °C	133,5	145,1	50,2
Filamen 170 °C	132,7	151,3	52,3
Filamen 160 °C	132,7	141,3	48,9



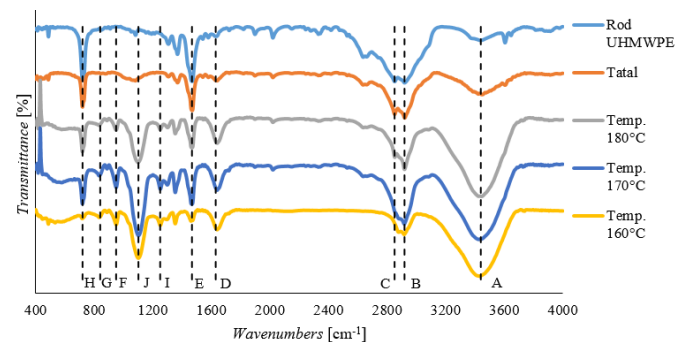
Gambar 7. Derajat kristalinitas *rod* UHMWPE, tatal dan filamen

Penurunan titik leleh filamen pada Tabel II berbanding lurus dengan penurunan temperatur ekstrusi. Namun, titik leleh filamen dapat dikatakan stabil karena bila dibandingkan dengan titik leleh *rod* UHMWPE penurunan yang terjadi masih di bawah 2%.

Gambar 7 menunjukkan derajat kristalinitas material UHMWPE dalam bentuk *rod*, tatal maupun filamen. Sebagaimana ditunjukkan pada gambar tersebut, derajat kristalinitas filamen mengalami penurunan seiring dengan penurunan temperatur ekstrusi. Hal ini menunjukkan jumlah ikatan kristal yang terbentuk pada filamen semakin menurun dengan menurunnya temperatur ekstrusi. Turunnya jumlah ikatan kristal pada material filamen dapat mengakibatkan penurunan kekuatan ikatan antar molekul penyusun filamen. Hal ini dikarenakan fase kristalin kekuatan ikatan antar molekul yang jauh lebih tinggi bila dibandingkan dengan ikatan fase amorf (Balani dkk., 2015).

Uji *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR)

Dengan menganalisa puncak-puncak gelombang hasil FTIR dapat diketahui reaksi antara senyawa pada campuran UHMWPE/PEG/PO. Gambar 8 merupakan hasil uji FTIR dari *rod* UHMWPE, tatal dan filamen. Puncak gelombang hasil FTIR secara lengkap tertulis pada Tabel 3.



Gambar 8. Hasil FTIR *rod* UHMWPE, tatal dan filamen

Jejak FTIR UHMWPE terdeteksi pada puncak gelombang A sampai dengan H. Adapun jejak FTIR PEG terdeteksi pada puncak gelombang I dan J. Selain itu terdeteksi pula Jejak PO pada puncak gelombang H (720 cm^{-1}) yang merupakan deformasi grup CH_2 dalam *mineral oil* (Rawat dkk., 2020).

Spektrum campuran yang tumpang tindih antara komponen gelombang atau terdiri dari gabungan beberapa gelombang UHMWPE dan bahan tambahan menunjukkan tidak adanya reaksi yang terjadi antara polietilen dan bahan tambah pada spesimen campuran (Senra dan Marques, 2020).

Dalam literatur juga disebutkan bahwa apabila kedua senyawa memiliki sifat pencampuran yang baik maka gelombang hasil FTIR akan mengalami pergeseran (Yuniarto dkk., 2016). Di sisi lain, bertambahnya intensitas gelombang mengindikasikan bertambahnya ikatan pada senyawa tersebut (Li dkk., 2015).

Tabel 3. Puncak gelombang hasil uji FTIR

Titik	Gelombang (cm ⁻¹)	Deskripsi	Literatur
A	3439	-OH groups	(Mourad dkk., 2019) (Haddadi dkk., 2018) (Li dkk., 2019) (Nandiyanto dkk., 2019) (Rawat dkk., 2020) (Cheng dkk., 2017) (Zhang, 2019) (Sánchez dkk., 2017) (Senra dan Marques, 2020)
B	2918	Methylene - CH asymmetric stretch	
C	2850	Methylene - CH symmetric stretch	
D	1629	the -C=O- peak	
E	1467	Methylene - CH bending	
F	949	Unsaturated bonds, trans-vinylene groups	
G	840	Methylene -(CH ₂) _n -, deformation of CH ₂ groups in mineral oil	
H	720		
I	1250	C-O stretching of Alcohol	
J	1101	C-O-C of ether	

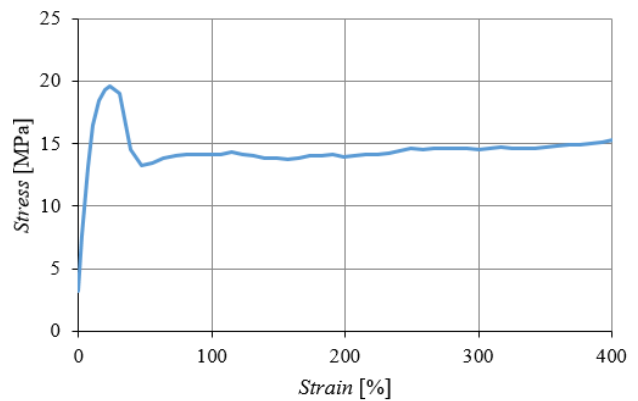
Sebagaimana juga terlihat pada Gambar 8, spektrum FTIR filamen UHMWPE/PEG/PO ini yang terjadi adalah perubahan intensitas gelombang. Hal ini mengindikasikan terjadinya penambahan atau pengurangan ikatan pada senyawa polimer. Seperti pada gelombang A (ikatan -OH) filamen, terjadi penambahan intensitas yang signifikan bila dibandingkan dengan gelombang A pada rod UHMWPE. Di sisi lain, terjadi penurunan intensitas pada gelombang H (ikatan -CH₂-) yang berbanding lurus dengan penurunan temperatur proses ekstrusi filamen.

Ikatan O-H memiliki rata-rata energi ikatan 464 kJ/mol, sementara itu energi ikatan C-H adalah 415 kJ/mol (Flowers dkk., 2019). Pada ikatan -CH₂- terdapat dua ikatan C-H sehingga energi ikatan -CH₂- sekitar 830 kJ/mol, jauh lebih besar

dibandingkan ikatan -OH. Oleh sebab itu, dengan bertambahnya ikatan -OH dan berkurangnya ikatan -CH₂- dapat mengakibatkan menurunnya kekuatan ikatan antar senyawa penyusun filamen.

Uji Tarik

Gambar 9 menunjukkan grafik tegangan-regangan hasil uji tarik filamen UHMWPE. Pada grafik ini terlihat terjadinya regangan yang tinggi pada daerah plastis. Hal ini mengindikasikan kemampuan material untuk menahan deformasi plastis yang sangat tinggi, sebagaimana juga terlihat pada Gambar 10 yang menunjukkan pemanjangan (*elongation*) dan fenomena *necking* hingga akhirnya filamen putus. Fenomena *necking* yang terjadi sebelum filamen mengalami kegagalan membuktikan bahwa filamen UHMWPE bersifat ulet. Pada Gambar 9, area yang terbentuk di bawah grafik yang luas menunjukkan bahwa material filamen UHMWPE hasil ekstrusi ini mampu menyerap energi yang tinggi sebelum patah.



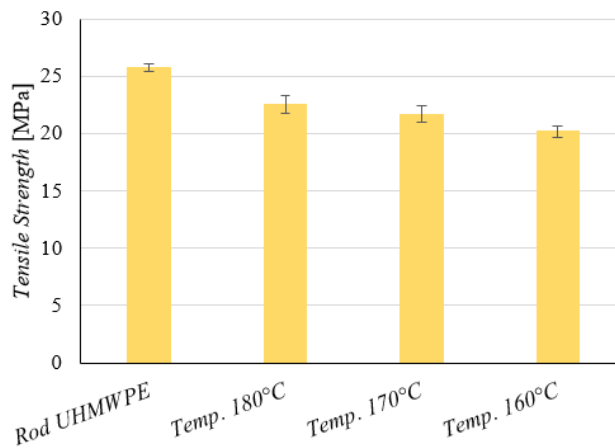
Gambar 9. Grafik tegangan-regangan filamen UHMWPE



Gambar 10. Bentuk patahan uji tarik filamen UHMWPE

Gambar 11 merupakan grafik *ultimate tensile strength* (kekuatan tarik maksimum) dari sampel rod dan filamen UHMWPE. Pada grafik tersebut terlihat terjadinya penurunan kekuatan tarik pada filamen bila dibandingkan dengan rod UHMWPE.

Penurunan kekuatan tarik yang terjadi berbanding lurus dengan penurunan temperatur proses ekstrusi filamen. Hasil ini mengkonfirmasi pembahasan hasil DSC dan FTIR sebelumnya.



Gambar 11. Kekuatan tarik *rod* UHMWPE dan filamen

Seperti yang telah disebutkan sebelumnya, filamen UHMWPE pada penelitian ini terbuat dari tatal *rod* UHMWPE. Oleh sebab itu, filamen yang dihasilkan menyerupai proses daur ulang (*recycle polyethylene*). Proses ini dapat menyebabkan degradasi dan penurunan ikatan polimer. Hal tersebut dapat menyebabkan terjadinya penurunan sifat mekanis *polyethylene* yang dihasilkan (Okubo dkk., 2021). Seperti yang terjadi pada filamen UHMWPE dalam penelitian ini, kekuatan tarik yang dihasilkan menjadi lebih rendah dari kekuatan tarik *rod* UHMWPE. Selain itu, dampak dari penambahan PEG juga dapat menyebabkan penurunan kekuatan tarik filamen (Li dkk., 2019). Meski demikian penambahan PEG tetap dilakukan untuk meningkatkan *processability* dari UHMWPE. Bila mengacu pada hasil *rod* UHMWPE maka penurunan kekuatan tarik pada filamen dengan temperatur proses 180, 170 dan 160 °C berturut-turut adalah 12,4% 15,6% dan 21,6%. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa kekuatan tarik filamen tertinggi dihasilkan dengan menggunakan temperatur ekstrusi 180 °C.

IV. PENUTUP

Kesimpulan

Pada penelitian ini filamen UHMWPE dengan bahan tambah PEG dan *paraffin oil* (PO) telah berhasil dibuat. Sifat fisis, kimiawi dan kekuatan tarik filamen yang dihasilkan telah ditentukan sebagai pengaruh variasi temperatur yang diterapkan dalam proses ekstrusi. Hasil pengamatan SEM menunjukkan proses ekstrusi berlangsung dengan

stabil. Derajat kristalinitas filamen UHMWPE mengalami peningkatan seiring dengan meningkatnya temperatur ekstrusi. Berdasarkan hasil uji FTIR tidak terjadi perubahan komposisi kimia pada filamen. Hasil pengujian mekanis menunjukkan bahwa kekuatan tarik filamen lebih rendah dibandingkan *rod* UHMWPE murni. Kekuatan tarik filamen UHMWPE yang tertinggi dapat diperoleh melalui proses ekstrusi dengan temperatur paling tinggi yaitu 180 °C, yang dapat menghasilkan filamen dengan dengan kekuatan tarik maksimum sebesar 22,52 MPa (atau 12,4% lebih rendah dibandingkan *rod* UHMWPE murni). Selain itu, diagram tegangan-regangan dan bentuk patahan uji tarik filamen menunjukkan bahwa filamen UHMWPE mempunyai sifat ulet.

V. DAFTAR PUSTAKA

- Alam, F., Choosri, M., Gupta, T. K., Varadarajan, K. M., Choi, D., & Kumar, S. (2019). Electrical, mechanical and thermal properties of graphene nanoplatelets reinforced UHMWPE nanocomposites. *Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology*, 241(February), 82–91.
- Arifvianto, B., Leeflang, M. A., & Zhou, J. (2017). Diametral compression behavior of biomedical titanium scaffolds with open, interconnected pores prepared with the space holder method. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 68(December 2016), 144–154.
- Balani, K., Verma, V., Agarwal, A., & Narayan, R. (2015). *BIOSURFACES: A Materials Science and Engineering Perspective*. Hoboken, New Jersey.: John Wiley & Sons, Inc.
- Bourell, D. L. (2016). Perspectives on Additive Manufacturing. *Annual Review of Materials Research*, 46(January), 1–18.
- Cheng, J., Yang, X., Dong, L., Yuan, Z., Wang, W., Wu, S., ... Wang, H. (2017). Effective nondestructive evaluations on UHMWPE/Recycled-PA6 blends using FTIR imaging and dynamic mechanical analysis. *Polymer Testing*, 59, 371–376.
- Dontsov, Y. V., Panin, S. V., Buslovich, D. G., & Berto, F. (2020). *Taguchi Optimization of Parameters for Feedstock Fabrication and FDM Manufacturing of Wear-Resistant UHMWPE-Based Composites*. 13(2718).
- Fang, L. M., Gao, P., & Cao, X. W. (2011). Temperature window effect and its application in extrusion of ultrahigh molecular weight

- polyethylene. *Express Polymer Letters*, 5(8), 674–684.
- Flowers, P., Theopold, K., Langley, R., J., E. N., & Robinson, W. R. (2019). *Atoms First 2e*. Houston, Texas: Openstax.
- Gaget, L. (2019). Answer the largest survey of the 3D printing industry! Diambil 29 September 2019, dari <https://www.sculpteo.com/blog/2019/02/12/answer-the-largest-survey-of-the-3d-printing-industry/>
- Gruber, H., Lindner, L., Arlt, S., Reichhold, A., Rauch, R., Weber, G., ... Hofbauer, H. (2020). A novel production route and process optimization of biomass-derived paraffin wax for pharmaceutical application. *Journal of Cleaner Production*, 275, 124135.
- Haddadi, S. A., Ahmad, A. R., Amini, M., & Kheradmand, A. (2018). In-situ preparation and characterization of ultra-high molecular weight polyethylene/diamond nanocomposites using Bi-supported Ziegler-Natta catalyst: Effect of nanodiamond silanization. *Materials Today Communications*, 14, 53–64.
- Kalsoom, U., Nesterenko, P. N., & Paull, B. (2016). Recent developments in 3D printable composite materials. *RSC Advances*, 6(65), 60355–60371.
- Khairuddin, Pramono, E., Utomo, S. B., Wulandari, V., Zahrotul, A. W., & Clegg, F. (2016). FTIR studies on the effect of concentration of polyethylene glycol on polymerization of Shellac. *Journal of Physics: Conference Series*, 776(1).
- Kurtz, S. M. (2016). *Ultra-High Molecular Weight Polyethylene in Total Joint Replacement and Medical Devices* (Third Edit). United States: Matthew Deans.
- Lee, H. C., Gaire, J., Currilin, S. W., McDermott, M. D., Park, K., & Otto, K. J. (2017). Foreign body response to intracortical microelectrodes is not altered with dip-coating of polyethylene glycol (PEG). *Frontiers in Neuroscience*, 11(SEP), 1–11.
- Li, W., Li, R., Li, C., Chen, Z.-R., & Zhang, L. (2015). Mechanical Properties of Surface-Modified Ultra-High Molecular Weight Polyethylene Fiber Reinforced Natural Rubber Composites. *Polymer Composites*.
- Li, Y., He, H., Ma, Y., Geng, Y., & Tan, J. (2019). Rheological and mechanical properties of ultrahigh molecular weight polyethylene/high density polyethylene/polyethylene glycol blends. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 2(1), 51–60.
- Mourad, A. H. I., Greish, Y. E., & Ayad, O. G. (2019). Processing and Mechanical Performance of Hydroxyapatite-UHMWPE Composites. *2019 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences, ASET 2019*, 1–5.
- Nandiyanto, A. B. D., Oktiani, R., & Ragadhita, R. (2019). How to read and interpret ftir spectroscopy of organic material. *Indonesian Journal of Science and Technology*, 4(1), 97–118.
- Okubo, H., Kaneyasu, H., Kimura, T., Phanthong, P., & Yao, S. (2021). *Effects of a Twin-Screw Extruder Equipped with a Molten Resin Reservoir on the Mechanical Properties and Microstructure of Recycled Waste Plastic Polyethylene Pellet Moldings*. 13(1058).
- Ramli, M. S., Wahab, M. S., Ahmad, M., & Bala, A. S. (2016). FDM preparation of bio-compatible UHMWPE polymer for artificial implant. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11(8), 5474–5480.
- Rawat, S. S., Harsha, A. P., Das, S., & Deepak, A. P. (2020). Effect of CuO and ZnO Nano-Additives on the Tribological Performance of Paraffin Oil-Based Lithium Grease. *Tribology Transactions*, 63(1), 90–100.
- Rowe, R. C., Sheskey, P. J., & Quinn, M. E. (2009). Handbook of Pharmaceutical Excipients. In *Revue des Nouvelles Technologies de l'Information* (Sixth). London: Pharmaceutical Press.
- Rufino Senra, M., & Vieira Marques, M. de F. (2020). Thermal and mechanical behavior of ultra-high molecular weight polyethylene/collagen blends. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 103(November 2019).
- Sánchez-Sánchez, X., Hernández-Avila, M., Elizalde, L. E., Martínez, O., Ferrer, I., & Elías-Zuñiga, A. (2017). Micro injection molding processing of UHMWPE using ultrasonic vibration energy. *Materials and Design*, 132, 1–12.
- Veronese, F. M., & Pasut, G. (2005). PEGylation, successful approach to drug delivery. *Drug Discovery Today*, 10(21), 1451–1458.
- Waddon, A. J., & Keller, A. (1990). A temperature window of extrudability and reduced flow resistance in high-molecular weight polyethylene; interpretation in terms of flow-induced mobile hexagonal phase. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 28(7), 1063–1073.
- Yousef, S., Visco, A., Galtieri, G., Nocita, D., &

- Espro, C. (2017). Wear behaviour of UHMWPE reinforced by carbon nanofiller and paraffin oil for joint replacement. *Materials Science and Engineering C*, 73, 234–244.
- Yuniarto, K., Purwanto, Y. A., Purwanto, S., Welt, B. A., Purwadaria, H. K., & Sunarti, T. C. (2016). Infrared and Raman studies on polylactide acid and polyethylene glycol-400 blend. *AIP Conference Proceedings*, 1725.
- Zhang, H., & Liang, Y. (2018). Extrusion Processing of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene. *Extrusion of Metals, Polymers and Food Products*.
- Zhang, L., Lu, C., Dong, P., Wang, K., & Zhang, Q. (2019). Realizing mechanically reinforced all-polyethylene material by dispersing UHMWPE via high-speed shear extrusion. *Polymer*, 180(July), 121711.