

Stabilisasi Densitas Filamen dari Komposit LLDPE-Karbon Mikro melalui Rancang Bangun Kanal *Spider Leg*

Aminudin Zuhri¹, Iman Setyadi¹, Agus Edy Pramono^{1*}, dan Dianta Mustofa Kamal^{1*}

¹ Magister Terapan Rekayasa Teknologi Manufaktur, Politeknik Negeri Jakarta, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Jakarta, Jl. Prof. G. A. Siwabessy, Kampus UI, Depok, 16425

*Corresponding author: agus.edypramono@mesin.pnj.ac.id

Artikel info: Diterima: 24 Juli 2023 | Disetujui: 08 Agustus 2023 | Tersedia online: 31 Agustus 2023
DOI: 10.32722/jmt.v4i2.5867

Abstrak

Proses Melt Blending telah berhasil dikembangkan untuk membuat filamen 3DP dari bahan polimer. Percobaan dilakukan dengan mesin ekstrusi single screw kapasitas laboratorium. Modifikasi dilakukan dengan perancangan spider leg channel. Tools tersebut digunakan untuk mendapatkan campuran yang lebih homogen dalam fasa liquid di dalam ruang Extruder Head. Selain itu juga untuk mendapatkan tingkat kompresi selama pembentukan filamen di ruang nozzle. Percobaan dilakukan dengan menggunakan variasi filler pada komposit polimer karbon, yaitu komposit polimer karbon mikro dan komposit polimer grafit. Kedua variasi dibuat dengan komposisi berat yang sama 50:50. Untuk ukuran partikel karbon mikro digunakan mesh #200. Material polimer Linear Low Density Polyethylene/LLDPE digunakan sebagai matriks dengan ukuran mesh #40. Pada komposit polimer karbon mikro, diperoleh densitas yang relatif stabil pada temperatur setting untuk extruder head 110°C. Untuk komposit polimer grafit pembentukan filamen dengan kepadatan seragam belum berhasil diperoleh pada temperatur 110°C. Dalam kondisi kepadatan tersebut, konduktifitas listrik komposit dengan filler karbon mikro dan grafit menunjukkan fenomena perubahan yang mirip. Nilai konduktifitas listrik maksimal diperoleh pada area kanal spider leg dari extruder head. Karbon mikro sebagai filler lebih sensitif terhadap pemanasan dibandingkan dengan grafit, dan penggunaan mesin ekstrusi single screw hanya dapat dicapai dengan penambahan tools berupa extruder head.

Kata-kata kunci: Mesin Ekstrusi; Karbon Mikro; Karbon Konduktif; Komposit Polimer

Abstract

The Melt Blending process has been successfully developed to produce 3DP filaments from polymers. The experiments were conducted using a laboratory-scale single screw extrusion machine. Modification was implemented through the design of a spider leg channel, which was utilized to achieve a more homogenous compound in the liquid phase inside the Extruder Head. Additionally, it aimed to obtain a level of compression during filament formation in the nozzle. The experiments involved using different fillers in the polymer composite, namely microcarbon and graphite. Both variations were prepared with an equal loading of 50:50. Microcarbon particles #200 mesh were used as fillers, while Linear Low-Density Polyethylene/LLDPE was used as the matrix material with #40 mesh. Stable density at 110°C for microcarbon polymer composite, but not for graphite polymer composite. However the electrical conductivity of the composites exhibited similar phenomena, the maximum electrical conductivity composite was obtained in the area of the spider leg channel. Microcarbon filler showed greater sensitivity to heating compared to

graphite, and the use of a single screw extrusion machine could only be accomplished by incorporating the extruder head tool.

Keywords: Extrusion Machine; Microcarbon; Conductive Carbon; Polymer Composite

1. PENDAHULUAN

Walaupun 3DP telah menjadi topik riset yang hangat selama satu dekade atau lebih, umumnya riset cenderung lebih fokus dalam teknik pembuatan filamen dan *printing* dari bijih plastiknya [1]. Material karbon, karena memiliki stabilitas kimia yang baik dan struktur nano yang adaptif, telah secara luas digunakan dalam 3DP untuk bermacam aplikasi yang berbeda[2]. Struktur nano dari karbon dan *allotropenya* telah banyak diteliti untuk diolah menjadi filamen 3DP sebagai oksida, komposit, maupun dalam bentuk hibridnya (sebagai filler)[1]–[3].

Artikel ini mengulas aplikasi material karbon dalam bentuk komposit polimer sebagai filamen yang akan menjadi bahan baku dalam proses 3DP atau biasa disebut sebagai *Fused Filament Fabrication/FFF*. Proses fabrikasi untuk membuat filamen dengan teknik *rolling* sederhana telah berhasil dilakukan[4], namun fabrikasi filamen dengan teknik *Melt Blending* lebih banyak digunakan oleh para peneliti.

Melt Blending merupakan sebuah metode yang telah lama digunakan untuk proses produksi komposit nano. Proses *melt blending* dilakukan melalui *compounding* lelehan polimer dengan sejumlah material aditif nano melalui gerakan rotasi dan geser untuk mencapai kadar tertentu yang diinginkan[5]. Proses ini dilakukan dengan menggunakan mesin ekstrusi, baik jenis mesin *twin screw*, maupun *injection screw*[6]–[8].

Mesin ekstrusi tipe *single screw* sangat umum digunakan untuk proses produksi filamen dari material polimer tunggal dalam bentuk granular atau daur ulang seperti *Acrylonitrile Butadiene Styrene/ABS*, *High Density Polyethylene/HDPE*, *Low Density Polyethylene/LDPE* maupun jenis polimer yang lain[9]. Pembuatan filamen komposit polimer karbon dapat dilakukan dengan mesin ekstrusi jenis tipe *single screw* dengan metode *Dilution*. Beberapa *masterbatch* komersial yang mengandung *nanotube*/komposit polimer dapat digunakan sebagai *starter* dalam pelarut polimer murni[10]. Sehingga kadar karbon yang diperoleh dalam filamen lebih rendah dari *masterbatch* yang digunakan. Penambahan beberapa aditif ke dalam polimer tunggal diketahui dapat mempengaruhi aliran fluida pada proses ekstrusi[11], memperbaiki viskositas atau justru menghambat aliran. Karbon sebagai *filler* dengan persen berat lebih dari 15%, berpengaruh terhadap viskositas karena fenomena akumulasi karbon dalam matriks polimer[12].

Proses *blending* aliran fluida komposit dapat diproses dengan dua tahap seperti pada teknik *starve feeding*. Dalam teknik ini butiran polimer yang masih berbentuk padat larut dalam fluida melalui proses disipasi panas. Pertukaran panas terjadi sepanjang ruangan ekstrusi sampai larut sempurna di dalam zona *metering*[13]. *Extruder Head* dalam proses ekstrusi dapat berperan sebagai katalisator *blending* dengan pengaturan temperatur yang tepat[14], diharapkan tidak terjadi *over heating* saat melewati *extruder head*. Selain itu proses *blending* juga dibantu dengan desain *spider leg*[15], dimana proses *blending* terjadi pada fase liquid dari bahan polimer pembentuk matriks. Dengan memanfaatkan faktor geometri yang didesain untuk memperoleh filamen dengan diameter 1.5 mm (*circular rod*).

Artikel ini mengulas percobaan pembuatan komposit polimer dengan kadar karbon tinggi hingga 50% fraksi berat komposit yang tidak dijumpai pada artikel dalam jurnal referensi. Percobaan dapat dilakukan dengan menggunakan mesin ekstrusi *single screw* sederhana dengan merancang *extruder head* yang dilengkapi dengan kanal *spider leg*. Untuk mengamati fenomena *rheology* komposit dengan *filler* karbon mikro, percobaan juga dilakukan dengan menggunakan *filler* grafit sebagai pembanding.

2. METODE PENELITIAN

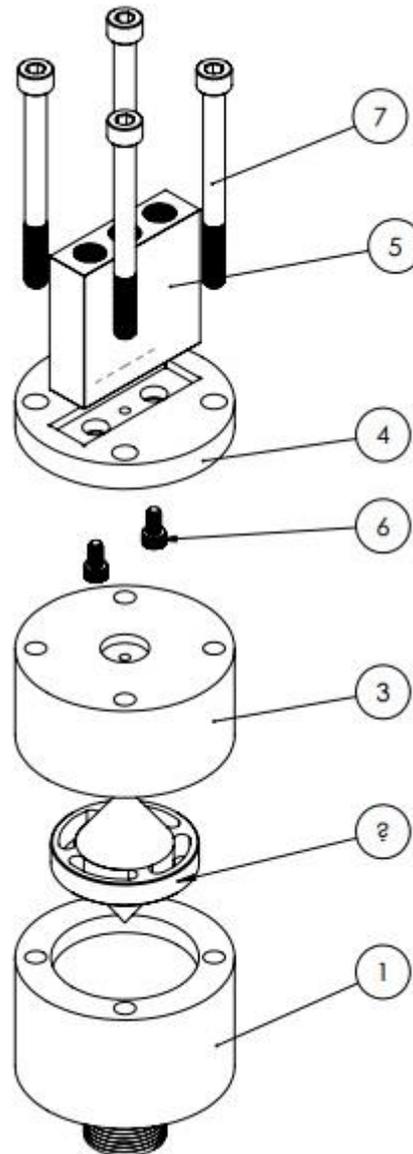
Karbon Mikro

Material karbon yang digunakan sebagai *filler* dalam penelitian berbentuk serbuk dengan mesh #200 atau karbon mikro. 1.5 kg sekam padi bersih diolah di dalam sebuah tabung proses, kemudian dimasukkan ke dalam tungku dengan sistem otomasi pemanasan 2°C per menit. Pemanasan terus ditingkatkan sampai tercapai temperatur 950°C.

Setelah pemanasan tercapai mesin secara otomatis menghentikan proses pemanasan setelah *holding time* 4 jam. Proses pendinginan terjadi dengan alami sampai diperoleh temperatur tungku yang sama dengan temperatur ruang kerja. Serpihan karbon dikeluarkan dari tabung proses untuk kemudian dilakukan proses *milling* dan *sieving* agar diperoleh butiran karbon yang dibutuhkan.

Bijih Plastik LLDPE

Bijih plastik yang digunakan dalam penelitian adalah jenis polimer LLDPE warna dasar putih dengan merk dagang ETILINAS LL3840UA ukuran mesh #40. Dengan densitas relatif terhadap air 0.91 – 0.98 g/cm³.



Gambar 1 Daftar Komponen *Extruder Head*; 1. Part A 2. Spider Leg 3. Part B 4. Joint 5. Part C 6. Hex Screw M4x15mm 7. Hex Screw M8x90mm

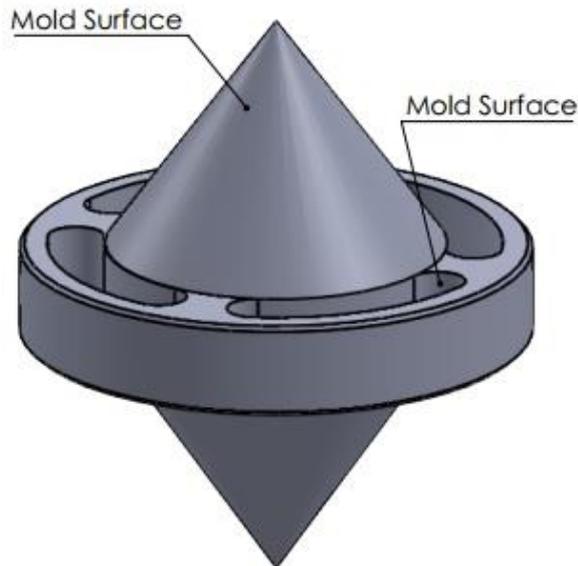
Desain Spider Leg Channel

Desain *tools* dibuat dengan prinsip kerja *extruder head* yang umum digunakan dalam proses pembuatan pipa atau *tubing*[16]. Proses pembuatan disimulasikan dengan gambar konsep menggunakan *software* desain *SOLIDWORK/SW* (Gambar 1). Untuk desain *spider leg* dapat dilihat pada gambar 2 berikut ini.

Mesin Ekstrusi

Proses *melt Blending* dilakukan dengan menggunakan mesin ekstrusi *single screw* yang didesain untuk proses pembuatan filamen 3DP dari material bijih plastik dan material daur ulangnya. Zona pemanasan dibagi menjadi 3 area mengikuti pembagian zona pada proses *melt Blending* dengan rasio *L/D Screw* sebesar 19[17]. Pengaturan temperatur setiap zona dilakukan dengan *thermocontroller* yang telah dilengkapi dengan

thermocouple jenis bimetal, disambungkan dengan *heater band* ukuran $\text{Ø}34 \times 80 \text{mm}$ 130watt. Sistem transmisi penggerak didesain dengan *coupling* tipe *sliding* menggunakan *belt* untuk mengamankan motor (Motor AC 2HP) saat beban kerja torsi *overload*.



Gambar 2 Desain Spider Leg

Uji Densitas Komposit

Pengujian densitas dilakukan dengan standard ASTM D792 [18]–[21].

Uji Konduktivitas Elektrik

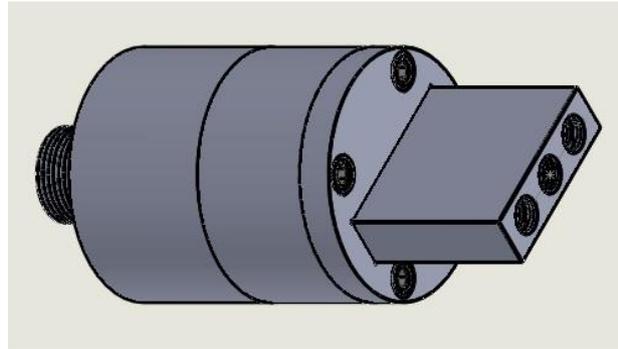
Pengujian konduktivitas listrik dengan metode *two point probe* dilakukan dengan menggunakan *multitester* Krisbow. Pengukuran dilakukan dengan tekanan *clamping* terhadap spesimen 75 N untuk memperbaiki tahanan kontak dari alat yang digunakan. Tekanan diukur dengan sensor *load cell* yang dikontrol dengan *arduino uno* terkalibrasi.

Fabrikasi Extruder Head

Spider leg difabrikasi dengan menggunakan mesin konvensional dari material AS45C. Kemudian dilakukan proses *polishing* pada permukaan yang akan dilewati oleh material komposit. *Extruder Head* pada bagian *Part A*, *Part B*, dan *Joint* dibuat dari material *Mild Steel ST50*. *Part C* yang merupakan *nozzle* untuk pembentuk filamen difabrikasi dari material SS400. Rakitan *tools* dapat dilihat pada ilustrasi berikut (Gambar 3).

Pembuatan Spesimen dengan Extruder Head

Filamen 3DP dibuat dengan komposisi %wt polimer : %wt karbon mikro 50:50. Variasi material sebagai pembanding dipilih grafit dengan komposisi berdasarkan berat yang sama. Pencampuran dilakukan secara langsung sebelum dimasukkan ke dalam *hopper*. Pemanasan mesin dilakukan sampai temperatur untuk masing-masing zona tercapai, dalam kondisi motor rotasi. *Setting* zona secara berurutan adalah 200°C (*Zone 1*), 150°C (*Zone 2*), 150°C (*Zone 3*), 110°C (*Extruder Head*). Material campuran dimasukkan ke dalam *hopper* sedikit demi sedikit (metode *Starve Feeding*) untuk mengurangi gesekan pada area *hopper* yang dapat mengganggu proses *feeding* ke dalam *screw*. Untuk kebutuhan eksperimen tersebut di atas, luaran dari *extruder head* dicetak dengan menggunakan mesin *hot compaction* yang digunakan pada pra-penelitian dengan tujuan untuk konfirmasi proses *melt blending* pada satu set variasi temperatur yang ditentukan.



Gambar 3 Extruder Head Assembly

3. PEMBAHASAN

Dari percobaan yang dilakukan tanpa menggunakan *extruder head*, diketahui bahwa material komposit yang keluar melewati *nozzle* diameter 1.5mm masih tidak stabil. Pada saat awal operasi (t_0) filamen dapat terbentuk, namun seiring waktu operasi (t_i) terjadi letupan. Diduga masih terdapat turbulensi karena sifat komposit yang sensitif terhadap pemanasan. Hal ini dapat dikonfirmasi ketika temperatur pada zona 1 dan zona 3 diturunkan (190°C dan 160°C) perputaran *screw* berkurang sampai akhirnya berhenti. Untuk keamanan dari motor, mesin dimatikan tanpa mematikan *heater*. Dalam kondisi mesin mati, material komposit masih dapat keluar dari *nozzle* dalam bentuk lelehan. Diduga terjadi karena pemanasan yang terus berjalan, karena lelehan terjadi secara perlahan. Dari kondisi tersebut dapat dikonfirmasi bahwa pada temperatur 160°C saja, material komposit juga sensitif terhadap perubahan temperatur pada (t_i).

Dengan data dari percobaan tersebut di atas, dilakukan percobaan dengan menggunakan *extruder head* yang telah didesain. Pada desain yang ditunjukkan pada Gambar 3, merupakan desain awal untuk membuktikan dugaan terjadinya *pressure loss* pada area *nozzle*. Sehingga dimensi *nozzle* masih dibuat lebih besar, yaitu dengan diameter 4mm. Percobaan dilakukan dengan menggunakan material *filler* karbon mikro terlebih dahulu. Proses pemanasan dengan *setting* zona 1 200°C , zona 2 160°C , zona 3 170°C , dan *extruder head* 100°C .

Dengan pengaturan pemanasan tersebut di atas, masih dijumpai letupan saat material komposit keluar dari *nozzle* (4mm). Lelehan material tidak dapat membentuk filamen, dengan rata-rata dimensi yang lebih besar dari ukuran *nozzle*. Selain itu, material komposit yang keluar dari *nozzle* terlihat poros setelah proses pendinginan. Pengujian kualitatif menunjukkan tidak ada konduktifitas yang mengalir dari sirkuit uji. Pengaturan temperatur dilakukan pada *extruder head*, turun 10°C ke pengaturan 90°C . Pada pengaturan tersebut, diperoleh filamen dengan dimensi mendekati dimensi *nozzle* 4mm. Namun, filamen yang pertama kali keluar dari *nozzle* tidak lolos uji kualitatif konduktifitas. Jika dilihat dari penampakan filamen, lebih mirip kepada filamen LLDPE dengan pigmen warna hitam. Percobaan tetap dilanjutkan sampai beberapa lama, sehingga dihasilkan filamen yang cukup panjang. Hasil filamen yang diperoleh dengan pengaturan temperatur *extruder head* 90°C terdapat variasi filamen yang terbentuk. Variasi ini jika dihubungkan dengan komposisi *filler* mikro karbon, akan berbanding terbalik terhadap variabel waktu (variabel ini tidak diukur). Dimana jumlah karbon mikro terlihat semakin banyak seiring bertambahnya waktu proses ekstrusi. Kesimpulan ini dihubungkan dengan hipotesis semakin tinggi komposisi *filler* semakin konduktif komposit yang akan diperoleh.



Gambar 4 Campuran Komposit pada Ruang Extruder Head

Untuk mengetahui dugaan tersebut, dilakukan pengujian kualitatif dengan sirkuit uji sepanjang filamen yang telah dihasilkan. Nyala terang dari pengujian cenderung meningkat dengan pengukuran sampel dari awal pembentukan sampai akhir percobaan.

Untuk mengetahui fenomena fluida pada ruang *extruder head*, dilakukan pembongkaran *extruder head* pada temperatur ruang. Proses ini dilakukan dengan mendinginkan *extruder head* setelah percobaan selesai, tanpa melakukan proses *purging* dengan bahan polimer pembersih (polimer jenis *Low Density Polyethylene/LDPE*). Gambar 4 dapat menunjukkan kondisi pada ruang *extruder head*. Proses pemadatan terjadi setelah material komposit mendekati area *nozzle*. Dapat dikenali dari bentuk pola seperti akar pada permukaan yang menempel pada ruang *extruder head*.

Pada percobaan dengan menggunakan *filler* dari bahan grafit proses juga dilakukan dengan pengaturan awal seperti pada percobaan dengan menggunakan karbon mikro (zona 1 200°C, zona 2 160°C, zona 3 170°C, dan *extruder head* 100°C). Namun, material komposit tidak dapat keluar melewati *nozzle* 4mm. Kondisi ini tetap terjadi meskipun material campuran terus ditambahkan, dan kebocoran terjadi pada sambungan-sambungan *extruder head* setelah proses berjalan sekitar 15 menit.

Pengaturan temperatur pada *extruder head* kemudian ditingkatkan 50°C sampai pada temperatur 150°C. Selama terjadi peningkatan temperatur *screw* dalam keadaan berputar. Filamen mulai terbentuk pada *nozzle* setelah temperatur mencapai 140°C, dan seiring bertambahnya temperatur sampai 150°C. Hasil filamen yang terbentuk menunjukkan variasi dimensi, karena semakin tinggi temperatur yang dapat dicapai filamen mengalami deformasi ketika ditarik. Semakin mendekati temperatur *setting* 150°C, semakin mudah terjadi deformasi. Sampai kemudian filamen tidak dapat terbentuk pada *nozzle*, karena komposit meleleh.

Untuk mengetahui persamaan nilai konduktifitas dengan komposit pembanding (dengan *filler* karbon mikro) dilakukan uji kualitatif. Hasil pengujian juga menunjukkan bahwa terdapat variasi konduktifitas sepanjang filamen. Namun, area yang tidak terdeteksi konduktifitasnya tidak separah pada variasi *filler* karbon mikro. Selain itu, terdapat area konduktifitas yang berkurang sepanjang filamen yang dihasilkan setelah tercapai konduktifitas maksimalnya.

Dengan membandingkan hasil filamen dari kedua variasi *filler*, kepadatan filamen pada komposit karbon mikro lebih baik dari komposit grafit. Pada komposit dengan *filler* karbon mikro terdapat kondisi dimana polimer dari komposit terpisah dari *fillernya* membentuk filamen polimer berwarna hitam. Seolah-olah karbon mikro tertahan di dalam ruang torpedo karena perbedaan reologi material yang terlalu tinggi antara polimer dan karbon mikro. Hal ini tidak dijumpai pada komposit dengan *filler* grafit. Karena perbedaan perlakuan saat pengaturan temperatur *extruder head* (*adjusting* temperatur berkebalikan), diduga reologi (terbaik untuk proses ekstrusi) komposit pada kedua variasi *filler* akan tercapai pada temperatur yang berbeda. Dengan komposit polimer karbon mikro dapat tercapai pada temperatur yang lebih rendah dibandingkan dengan komposit polimer grafit. Energi pemanasan yang lebih besar diperlukan untuk proses ekstrusi pada komposit polimer grafit.

Dengan dua percobaan yang telah dilakukan dapat diperoleh kesimpulan awal bahwa proses pendinginan saat pembentukan filamen dibutuhkan untuk mendapatkan filamen dengan kepadatan yang baik. Pembentukan filamen dapat terjadi pada temperatur rekristalisasi polimer dasar yang digunakan, tetapi masih dipengaruhi jenis *filler* yang digunakan. Dalam hal ini, polimer karbon mikro dapat terjadi rekristalisasi pada temperatur rendah dari rentang temperatur dari material LLDPE.

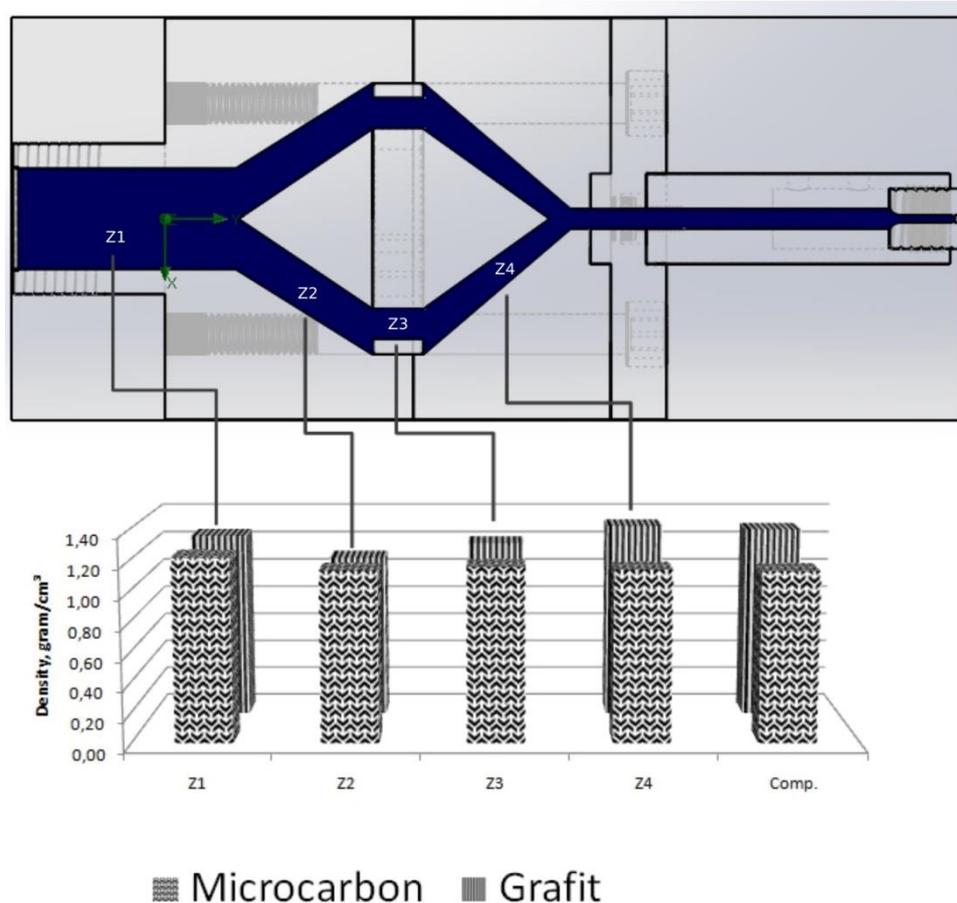
Pengamatan Densitas pada Area Extruder Head

Satu variasi temperatur digunakan untuk membuat spesimen pada area *extruder head* dan kompaksi. Temperatur pada barrel dan *extruder head* diatur pada zona 1 200°C, zona 2 150°C, zona 3 150°C, dan *extruder head* 110°C. Proses kompaksi dilakukan pada temperatur 130°C dengan tekanan 100 bar. Pemotongan spesimen dilakukan sebanyak 3 iterasi pada masing-masing zona yang diamati. Hasil pengukuran densitas ditunjukkan pada Grafik berikut (Gambar 5).

Sesuai dengan bentuk geometri ruang dari *extruder head*, terjadi perubahan densitas pada masing-masing zona yang ditandai dengan kodifikasi Zn. Pada area Z2 untuk kedua jenis *filler* yang digunakan, densitas berkurang ketika memasuki ruang Z2. Pada penggunaan grafit sebagai *filler*, penurunan cukup drastis (dari 1,25 gram/cm³ menjadi 1,1 gram/cm³). Peningkatan densitas mulai terjadi saat komposit mencapai area Z3 yang merupakan *channel* dengan desain *spider leg* (sekitar 10%).

Fenomena yang berbeda dapat ditemui pada area Z4. Pada percobaan dengan *filler* dari bahan karbon mikro densitas sedikit mengalami penurunan. Setelah material komposit keluar dari *nozzle* dan dicetak dengan metode kompaksi masih terjadi penurunan densitas meskipun tidak cukup signifikan (dari 1,16 gram/cm³ menjadi 1,15 gram/cm³). Dari desain *extruder head*, diharapkan tidak terjadi perubahan densitas

pada area Z4 sehingga campuran komposit dapat dipertahankan komposisinya saat keluar dari *nozzle*. Baik dengan proses lanjut menggunakan metode kompaksi maupun dengan *drawing* untuk membentuk filamen.



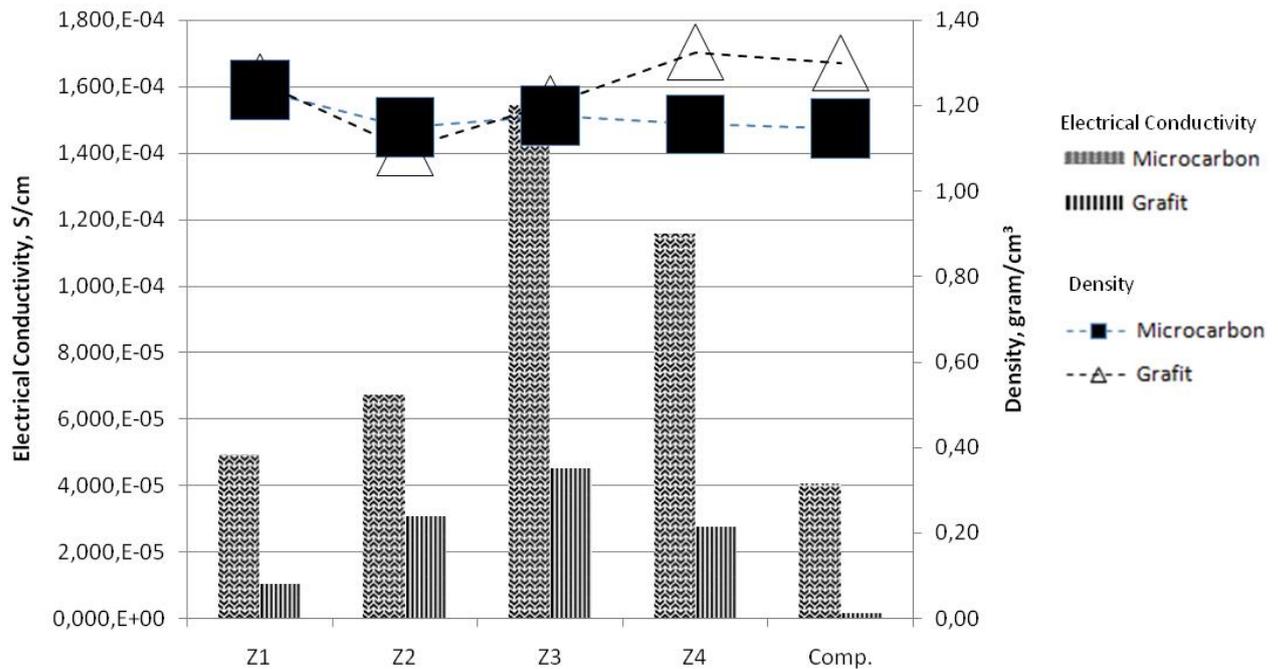
Gambar 5 Grafik Pengukuran Densitas pada Komposit dengan *Filler* Karbon mikro dan Grafit

Pada pemakaian material *filler* dari grafit, masih terjadi peningkatan nilai densitas pada area Z4. Hal ini dapat terjadi karena proses pencampuran material pembentuk komposit tidak stabil. Peningkatan fraksi grafit di dalam komposit diduga menjadi faktor penyebab peningkatan densitas. Material polimer yang memiliki viskositas lebih rendah dapat dengan mudah melewati *nozzle*, sementara grafit tertahan karena resistansinya terhadap dinding *extruder head*.

Jika fenomena tersebut terjadi karena grafit ditekan menuju area yang lebih jauh dari dinding *extruder head*, maka polimer dapat mengalir lebih cepat pada area yang dekat dinding *extruder head*. Pada sampel utuh komposit yang dikeluarkan dari *extruder head* dalam keadaan dingin, ditemukan banyak *void* pada area yang mendekati dinding *spider leg*. Diduga perbedaan temperatur terjadi pada kedua permukaan logam tersebut, karena perpindahan energi panas yang tidak dapat menjangkau permukaan *spider leg*. Kecepatan aliran polimer pada area yang dekat dengan kedua permukaan tersebut tidak seragam, sehingga pada permukaan ini komposisi grafit lebih banyak dibandingkan dengan permukaan yang lain. Untuk mengkonfirmasi dugaan tersebut, dapat diuji dari pengamatan konduktivitas listrik sampel yang dilakukan dengan metode *two point probe*.

Pengamatan Konduktivitas Listrik Sampel Uji

Pengamatan nilai konduktivitas listrik dari sampel komposit yang dijelaskan dengan Gambar 6 memiliki pola yang mirip untuk kedua jenis *filler* yang digunakan. Nilai konduktivitas naik dari sampel pada area Z1 menuju area Z2 dan mencapai maksimal pada area Z3. Setelah kenaikan nilai konduktivitas listrik maksimal kemudian turun, untuk sampel yang dibuat dengan cetak *hot compaction* cenderung rendah dibandingkan sampel yang lain.



Gambar 6 Grafik Relasi Konduktifitas Listrik dan Densitas

Pada penggunaan karbon mikro sebagai *filler*, nilai konduktifitas sebanding dengan nilai densitas yang diperoleh. Pada area Z3 saat densitas maksimal 1,18 gram/cm³ diperoleh, nilai konduktifitas listrik mencapai nilai maksimal 1,545,E-04 S/cm. Jika nilai densitas merupakan representasi kadar *filler* di dalam komposit, maka perbedaan densitas menunjukkan perbedaan kadar *filler* tersebut. Perbedaan densitas yang diukur berbeda seperseratus, namun nilai konduktifitas dapat naik atau turun cukup signifikan. Pada area Z3 dan Z4 merupakan area dengan hasil yang cukup baik, setelah material komposit melewati kanal *spider leg*. Fenomena tersebut berbeda dari pengamatan pada pemakaian *filler* grafit, pada area Z3 dan Z4 densitas cukup tinggi bahkan jika dibandingkan dengan sampel komposit karbon mikro. Akan tetapi peningkatan densitas tersebut tidak dibarengi dengan peningkatan nilai konduktifitas listrik.

Dalam proses perancangan kanal *spider leg* sebelum fabrikasi *extruder head*, telah dilakukan proses simulasi dengan perangkat lunak *Solidwork*. Pendekatan simulasi dilakukan dengan fluida *non-newtonian* jenis *slurry* yang menunjukkan densitas tetap selama proses ekstrusi. Material komposit karbon menunjukkan fenomena fluida *Newtonian*, sensitif terhadap panas pada saat diolah dengan mesin ekstrusi tanpa *extruder head*. Dapat diamati dengan cukup jelas pada komposit dengan *filler* grafit. Temperatur operasional yang sama saat proses ekstrusi menghasilkan fenomena yang berbeda, pada komposit dengan *filler* karbon mikro lebih mendekati karakter fluida *non-newtonian*. Hal ini sesuai dengan desain rancang bangun kanal *spider leg*. Percobaan lebih lanjut dengan menambahkan variabel temperatur proses dapat digunakan untuk konfirmasi fenomena yang terjadi pada eksperimen tersebut di atas.

4. KESIMPULAN

Pengaturan untuk mencapai temperatur rekristalisasi sangat penting pada proses terbentuknya filamen. Dengan penempatan *heater* pada area *extruder head* pada temperatur 110°C fenomena densitas pada area-area yang telah ditentukan dalam pengamatan diukur untuk mendapatkan relasi terhadap nilai konduktifitas listrik. Kerapatan maksimal diperoleh pada area kanal *spider leg* (kode area Z3), baik dengan pemakaian *filler* karbon mikro maupun grafit. Pengukuran nilai konduktifitas listrik juga menunjukkan nilai maksimal pada area tersebut. Untuk kedua jenis spesimen komposit, nilai konduktifitas listrik menunjukkan fenomena yang mirip, meskipun nilai densitas pada komposit dengan *filler* grafit cukup tinggi pada area Z4 yang menuju *nozzle*. Dari percobaan yang dilakukan tersebut di atas, diperlukan percobaan dengan variasi temperatur proses pada area *extruder head*. Penelitian lebih lanjut dibutuhkan untuk mengetahui fenomena ekstrusi terhadap *rheology* campuran komposit di dalam ruang *extruder head*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih atas Unit Pusat Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (UP3M) Politeknik Negeri Jakarta atas dukungan finansialnya pada penelitian ini dan Laboratorium Teknik Mesin Politeknik Negeri Jakarta atas dukungan fasilitas penelitian yang menunjang seluruh kegiatan ilmiah ini.

REFERENSI

1. S. Oberoi, V. B. Mohan, and D. Bhattacharyya, SAMPE Conference Proceedings (Charlotte, NC, 2019).
2. K. Fu, Y. Yao, J. Dai, and L. Hu, Progress in 3D Printing of Carbon Materials for Energy-Related Applications, *Adv. Mater.* 29, 1–20, (2017).
3. J. H. Kim *et al.*, 3D printing of reduced graphene oxide nanowires, *Adv. Mater.* 27, 157–161 (2015).
4. S. J. Leigh, R. J. Bradley, C. P. Purssell, D. R. Billson, and D. A. Hutchins, A Simple , Low-Cost Conductive Composite Material for 3D Printing of Electronic Sensors, *PLoS One* 7, 1–6, (2012).
5. S. Doagou-rad and A. Islam, Correlation of mechanical and electrical properties with processing variables in MWCNT reinforced thermoplastic nanocomposites, *J. Compos. Mater.* 52, (2018).
6. J.-C. Huang and C.-L. Wu, Processability, mechanical properties, and electrical conductivities of carbon black-filled ethylene-vinyl acetate copolymers, *Adv. Polym. Technol.* 19, 132, (2000).
7. T. Jin-hua, L. Guo-qin, C. Huang, and S. Lin-jian, Mechanical Properties and Thermal Behaviour of LLDPE/MWNTs Nanocomposites, *Mater. Res.* 15, 1050–1056, (2012).
8. H. Choi, M. S. Kim, D. Ahn, S. Y. Yeo, and S. Lee, Electrical percolation threshold of carbon black in a polymer matrix and its application to antistatic fibre, *Sci. Rep.* 9, 6338, (2019).
9. P. Ravichandran, C. Anbu, R. Poornachandran, M. Shenbagarajan, and K. S. Yaswahnthan, Design and development of 3d printer filament extruder for material reuse, *Int. J. Sci. Technol. Res.* 9, 3771–3775, (2020).
10. P. Pötschke *et al.*, Melt mixing as method to disperse carbon nanotubes into thermoplastic polymers, *Fullerenes Nanotub. Carbon Nanostructures.* 13, 211–224, (2005).
11. S. G. Hatzikiriakos, C. W. Stewart, and J. M. Dealy, Effect of Surface Coatings on Wall Slip of LLDPE, *Int. Polym. Process.* 8, 30–35, (1993).
12. D. J. Horst and C. A. Duvoisin, Fabrication of Conductive Filaments for 3D-printing : Polymer Nanocomposites, *Biointerface Res. Appl. Chem.* 10, 6577–6586, (2020).
13. K. Wilczynski, Krzysztof J. ; Nastaj, Andrzej; Lewandowski, Adrian; Wilczynski, A Composite Model for Starve Fed Single Screw Extrusion of Thermoplastics, *Polym. Eng. Sci.* 54, 2362–2374, (2014).
14. S. M. Al-Salem, N. M. Al-Dousari, G. Joseph Abraham, M. A. D'souza, O. A. Al-Qabandi, and W. Al-Zakri, Effect of Die Head Temperature at Compounding Stage on the Degradation of Linear Low Density Polyethylene/Plastic Film Waste Blends after Accelerated Weathering, *Int. J. Polym. Sci.* 8–11, (2016).
15. D. E. Kouzilos, Georgios N.; Markopoulos, Angelos P.; Manolakos, Manufacturing and Modeling of an Extrusion Die Spider Head for The Production of HDPE Tubes, *J. Manuf. Technol. Res.* 6, 1–15, (2015).
16. G. N. Kouzilos, G. V. Seretis, C. G. Provatidis, and D. E. Manolakos, Design of Polymer Extrusion Dies Using Finite Element Analysis, in *Intech Open*, (2018), pp. 181–195.
17. A. E. Pramono, S. Ruswanto, and N. Indyaningsih, Effect of pyrolysis sintering temperature on the electrical current delivery power of kaolin-carbon composites, *J. Ceram. Process. Res.* 23, 171–180, (2022).
18. A. E. Pramono, H. Rahman, P. M. Adhi, and N. Indyaningsih, Controlling the size and carbon composition to determine the electrical conductivity of the kaolin-carbon composite, *J. Ceram. Process. Res.* 23, 638–646, (2022).
19. B. Madsen and H. Lilholt, Physical and mechanical properties of unidirectional plant fibre composites-an evaluation of the influence of porosity, *Compos. Sci. Technol.* 63, 1265–1272, (2003).
20. Y. Saadati, J. F. Chatelain, G. Lebrun, and Y. Beauchamp, Comparison of density measurement methods for unidirectional flax-epoxy polymer composites, *Eur. Conf. Multifunct. Struct.* (2019).
21. Y. Yang *et al.*, High performance carbon-based planar perovskite solar cells by hot-pressing approach, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 210, 110517, (2020).
22. A. Djafar and M. A. Fatoni, Perancangan Mesin Single Screw Extruder Untuk Daur Ulang Plastik Ldpe Menjadi Filament Feed 3D Printing, *J. Ilm. Teknol. dan Rekayasa.* 26, 205–217, (2021).