

Pengaruh variasi *undercut maddock mixer* pada mesin ekstrusi filamen cetak 3d dari bahan plastik daur ulang

Imam Muhsin Natsir¹, Djoko Kuswanto², Achmad Syaifudin¹

¹Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember

²Departemen Desain Produk Industri, Fakultas Desain Kreatif dan Bisnis Digital, Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Jl. Raya ITS, Keputih, Kecamatan Sukolilo, Surabaya, Jawa Timur 60111

Email korespondensi: saifudin@me.its.ac.id

Abstrak

Proses ekstrusi filamen cetak tiga dimensi (3D printer filament) dari bahan plastik daur ulang memiliki berbagai tantangan dalam upaya menghasilkan filamen yang berkualitas. Salah satu faktor penting yang berpengaruh terhadap kualitas filamen adalah toleransi variasi diameter berada dalam batasan $\pm 0,05$ mm. Untuk dapat menghasilkan filamen dengan toleransi tersebut, diperlukan konsistensi proses ekstrusi yang baik. Komponen mesin ekstrusi yang paling berpengaruh terhadap proses ini adalah bagian screw. Pada kajian ini, dilakukan modifikasi desain screw dari mesin ekstrusi filamen untuk mengatasi fluktuasi diameter filamen. Material polimer dari bahan plastik daur ulang yang digunakan pada proses produksi filamen ini adalah polipropilena (PP). Mula-mula dilakukan pengamatan terhadap suhu, arus listrik motor penggerak, kecepatan putaran screw pada proses produksi filamen untuk mengetahui fluktuasi sistemik akibat fenomena surging. Pengukuran diameter filamen dilakukan secara langsung menggunakan jangka sorong dan pengamatan secara makro juga dilakukan untuk mencapai cacat yang muncul. Untuk mengatasi fluktuasi filamen akibat ketidaksempurnaan proses mixing, diberikan penambahan Maddock mixer pada screw dengan memodifikasi kedalaman undercut dari Maddock mixer. Variasi kedalaman undercut adalah 0,1 mm (0,04D), 0,5 mm (0,02D), dan 1,2 mm (0,47D). Kajian ini menunjukkan bahwa modifikasi kedalaman undercut pada Maddock mixer tidak mengakibatkan perbaikan kualitas diameter filamen yang dihasilkan. Sementara itu, variasi kedalaman undercut dari Maddock mixer mempengaruhi kapasitas ekstrusi pada mesin.

Kata kunci: ekstrusi, filamen, screw, surging, maddock mixer, undercut.

Abstract

The extrusion process of 3D printer filament from recycled plastics has various challenges to produce quality filaments. One of the important factors affecting the filament quality is the diameter tolerance of the extruded filament, which should be within the range of ± 0.05 mm. To achieve that quality, good consistency of the extrusion process is required. The most influential component of the extrusion machine is the screw. In this study, the screw was modified to overcome the fluctuation problem in filament diameter. The material used was polypropylene (PP) that comes from recycled plastics. The temperature, electric current of the motor, and screw rotation speed were observed to determine systemic fluctuations due to the surging phenomenon. The filament diameter was measured directly using a vernier caliper and observed to seek defects in macro-scale. To overcome filament fluctuations due to imperfection in the mixing process, the screw was modified by adding a Maddock mixer. Furthermore, the undercut depth of Maddock mixer had been varied into three different depth level, i.e. 0.1 mm (0.04D), 0.5 mm (0.02D), and 1.2 mm (0.47D). This research showed that the modification of undercut depth on the Maddock mixer did not improve the quality of filament diameter produced. Meanwhile, the undercut depth variations on the Maddock mixer affected the capacity of extrusion.

Keywords: extrusion, filament, screw, surging, maddock mixer, undercut.

1. Pendahuluan

Pada beberapa dekade terakhir, sampah plastik telah menjadi permasalahan serius karena limbahnya yang berbahaya dan tidak dapat diuraikan dalam waktu singkat [1, 2]. Untuk mengurangi limbah plastik, produk berbahan plastik dapat didaur ulang menjadi bentuk filamen sebagai bahan utama teknologi cetak 3 dimensi (3D) [3]. Studi terhadap daur ulang plastik menjadi filamen cetak 3D telah banyak dilakukan, diantaranya oleh Raza dan Singh [9]. Mereka mendaur ulang plastik yang terbuat dari *Polylactic*

Acid (PLA), karena *bio-degradable* dan merupakan polimer transparan yang berasal dari sumber daya terbarukan. Material PLA ini didaur ulang menjadi filamen dengan ketebalan tertentu untuk digunakan kembali sebagai bahan filamen cetak 3D. Bahan material PLA dihancurkan menggunakan *shredder* menjadi potongan berukuran kecil, kemudian dimasukkan ke dalam mesin *extruder*. Mesin *extruder* melanjutkan proses dengan variasi temperatur dan kecepatan ekstrusi untuk mendapatkan dimensi filamen yang diinginkan. Hasil pengujian

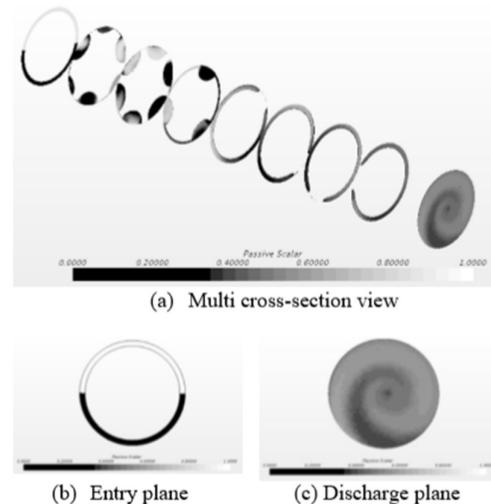
menunjukkan bahwa variasi kecepatan ekstrusi dan temperatur memberikan pengaruh yang signifikan pada ketebalan filamen [9].

Sementara itu, untuk mendapatkan hasil ekstrusi yang lebih baik, Herianto dkk. telah melakukan optimasi proses ekstrusi dalam proses daur ulang filamen plastik (*polypropylene*) dengan mengaplikasikan parameter berupa kecepatan *spooler* 4 rpm, kecepatan ekstrusi 40 rpm, dan temperatur ekstrusi 200°C. Proses ekstrusi dianalisis menggunakan metode Taguchi dan ANOVA, yang mana hasilnya menunjukkan bahwa proses ekstrusi dengan menerapkan parameter-parameter tersebut mampu memproduksi rata-rata diameter filamen sebesar 1,6 mm [10]. Cara perbaikan lain ditempuh oleh Sun dkk., yakni dengan melakukan optimasi desain *Maddock mixer* [11]. Studi mereka menggunakan desain *Maddock mixer* tipe *straight flute* untuk dioptimasi, kemudian dibandingkan dengan tipe *spiral flute*. Variasi desain *Maddock mixer* dirancang dengan kedalaman *flute* yang besar, sehingga mampu menciptakan *flute* yang akan menyebabkan resin stagnan dan terdegradasi, seperti ditunjukkan dalam Gambar 1. Desain *Mad-dock mixer* tersebut telah dioptimasi sehingga mampu menghasilkan proses *mixing* yang baik. Dalam studi tersebut, simulasi juga dilakukan untuk menguji performa *Maddock mixer* yang dirancang dengan menggunakan metode *passive scalar tracking* seperti ditunjukkan pada Gambar 2.

| | | | |
|---|----------------|------------------|----------|
|  | Mixer 1 | Flute depth (mm) | 12.32 |
| | | Flute width (mm) | 24.64 |
| | | Flute lead (mm) | Straight |
| | | Undercut (mm) | 0.46 |
|  | Mixer 2 | Flute depth (mm) | 11.02 |
| | | Flute width (mm) | 22.23 |
| | | Flute lead (mm) | 345 |
| | | Undercut (mm) | 0.46 |
|  | Mixer 3 | Flute depth (mm) | 11.02 |
| | | Flute width (mm) | 22.23 |
| | | Flute lead (mm) | 345 |
| | | Undercut (mm) | 0.76 |
|  | Mixer 4 | Flute depth (mm) | 12.83 |
| | | Flute width (mm) | 22.23 |
| | | Flute lead (mm) | 345 |
| | | Undercut (mm) | 0.46 |

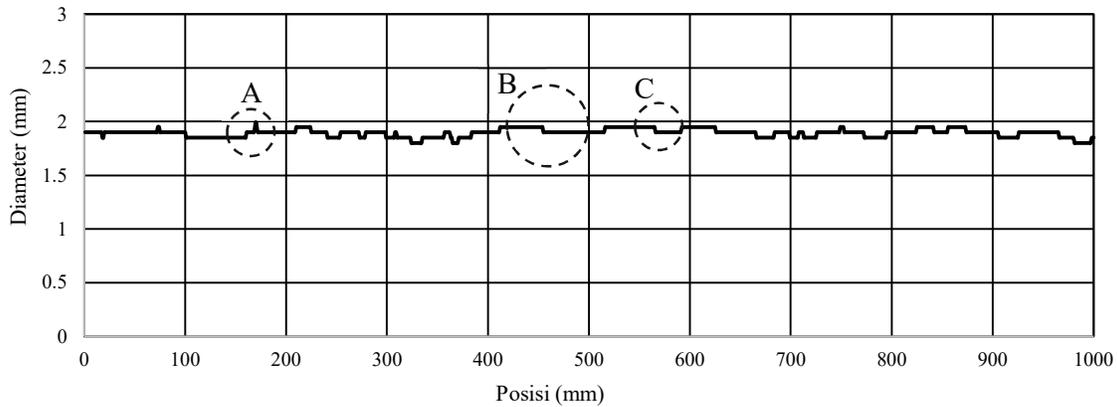
Gambar 1. Desain maddock mixer [11].

Filamen cetak 3D ini diproduksi dengan menggunakan mesin ekstruder. Proses produksi filamen pada umumnya dimulai dari proses pemanasan, ekstrusi, hingga pendinginan sehingga biji plastik berubah menjadi filamen yang diinginkan. Diameter filamen tidak tergantung pada besar diameter *nozzle extruder*, melainkan tergantung pada proses pendinginan setelah proses termoplastik. Sebelum filamen diekstrusi, biji-biji plastik perlu dipanaskan pada suhu 60 hingga 80°C untuk menghilangkan kelembaban. Setelah pemanasan mencapai suhu yang diinginkan, motor ekstrusi dinyalakan, sehingga *screw* berputar dan mendorong biji plastik keluar ekstruder [4].



Gambar 2. Metode passive scalar tracking [11].

Pada proses produksi filamen cetak 3D dari polipropilena (PP), sering terjadi fluktuasi diameter filamen. Inkonsistensi diameter filamen dapat terjadi karena fenomena *surging* dan faktor eksternal proses ekstrusi. *Surging* adalah fenomena berupa fluktuasi nilai tekanan leleh dan debit pada ekstruder dengan periode 1 detik hingga 60 menit. Fenomena *surging* sendiri terjadi karena variasi *feedstock*, kontrol mesin, geometri *screw*, suhu mesin, ketidaksempurnaan pelelehan, ketidaksesuaian pelelehan dan pemompaan [5, 6]. Peneliti lain mengungkapkan bahwa *surging* disebabkan oleh kondisi tidak *steady* yang merupakan kombinasi antara proses mekanis, termodinamis dan hidrodinamis [7]. Sementara faktor eksternal yang dapat menyebabkan fluktuasi diameter filamen antara lain fluktuasi kecepatan penarik (*filament puller*) dan fluktuasi media pendingin [8]. Pada proses produksi filamen dari plastik daur ulang dengan mesin Extruder D29, saat ini masih mengalami kendala *surging*. Fenomena ini dapat dideteksi dengan memantau besarnya tekanan leleh pada ujung *screw* di dalam cetakan menggunakan *transducer* tekanan berkecepatan tinggi. Selain itu, fenomena ini bisa juga dideteksi dengan mengukur besaran fluktuasi *extrudate* atau produk secara langsung. Fenomena *surging* pada proses produksi dengan mesin Extruder

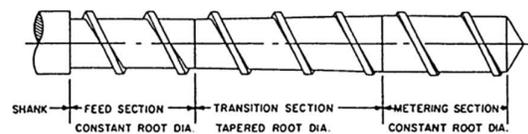


Gambar 3. Fluktuasi diameter pada sampel filamen Extruder D29 [5].

D29 dapat diketahui melalui evaluasi fluktuasi diameter filamen seperti pada Gambar 3, yang mana menunjukkan diameter sampel filamen sepanjang 1 meter yang dihasilkan oleh Extruder D29. Terlihat bahwa filamen yang diproduksi Extruder D29 mengalami dua jenis fluktuasi diameter. Fluktuasi pertama merupakan fluktuasi diameter bersifat mikro dengan range $\pm 0,1$ mm dan terjadi sepanjang filamen (ditunjukkan oleh lingkaran B dan C). Sementara itu, fluktuasi kedua merupakan fluktuasi diameter yang bersifat lokal (titik) berupa benjolan dengan diameter mencapai 2 mm (ditunjukkan oleh lingkaran A) yang disebabkan karena kurangnya proses *dispersive mixing* pada ekstruder [8]. Untuk dapat menghasilkan filamen dengan kualitas yang baik, desain Extruder D29 ini masih membutuhkan beberapa perbaikan. Tujuan dari kajian ini adalah memodifikasi *screw*, sebagai komponen utama proses ekstrusi, guna mencapai kesempurnaan proses ekstrusi. Studi eksperimen lebih lanjut dibutuhkan guna membuktikan dampak dari modifikasi *screw* yang dilakukan.

2. Metode

Extruder screw merupakan komponen utama pada sebuah mesin ekstrusi. Dimensi *screw* sangat berpengaruh terhadap kualitas proses ekstrusi. Secara geometris, komponen *screw* dari mesin ekstrusi dapat digambarkan pada Gambar 4, yang mana memiliki tiga bagian yaitu *feed*, *compression/transition* dan *metering*. Bagian *feed* dan *metering* berbentuk *shaft* berpilin dengan diameter konstan. Sementara, bagian *compression* memiliki *shaft* yang berbentuk *taper* (membesar). *Screw* pada ekstruder memiliki tiga fungsi utama, yaitu *conveying*, *melting* dan *compressing*. Sebanyak 70% proses *melting* disebabkan oleh gesekan *screw extruder* dengan material polimer.



Gambar 4. Pembagian zona pada screw [12].

Pada mesin ekstrusi yang diteliti, jenis *extruder screw* yang digunakan adalah Extruder D29. Extruder D29 adalah mesin ekstrusi dengan tipe *conventional single screw extruder*. Diameter *screw* pada Extruder D29 sebesar 29 mm, dengan panjang sebesar 496 mm. Secara umum spesifikasi *extruder* D29 dapat dilihat pada Tabel 1.

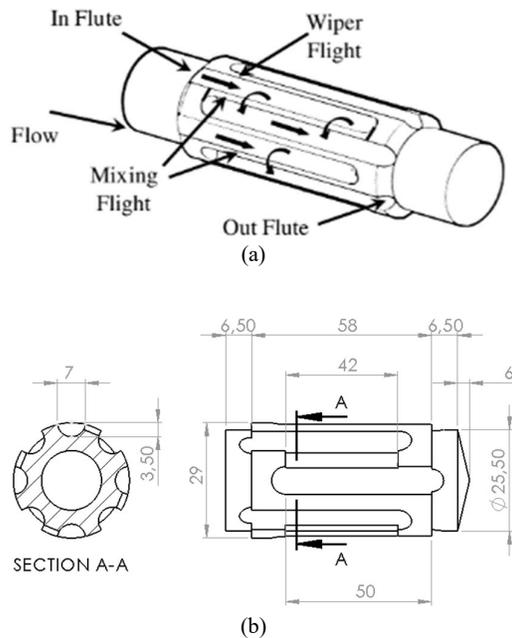
Tabel 1. Spesifikasi *Extruder* D29

| Parameter | Nilai |
|--|----------------|
| <i>Motor power</i> | 0,5 HP |
| <i>Max. Motor speed</i> | 1375 rpm |
| <i>Gearbox ratio</i> | 20 : 1 |
| <i>Screw diameter (D)</i> | 29 mm |
| <i>Feed sec. diameter</i> | 16 mm |
| <i>Metering sec. diameter</i> | 25,5 mm |
| <i>Screw length (L)</i> | 496 mm (17 D) |
| <i>Feed sec. length</i> | 190 mm (6,5 D) |
| <i>Compression sec. length</i> | 151 mm (5,2 D) |
| <i>Metering sec. length</i> | 151 mm (5,2 D) |
| <i>Helix angle (ϕ)</i> | 9,35° |
| <i>Pitch length (p)</i> | 15 mm |
| <i>Lead (l)</i> | 15 mm |
| <i>Flight width (W_f)</i> | 3 mm (0,1 D) |
| <i>Channel depth (feed sec.) (H_f)</i> | 6,5 mm |
| <i>Channel depth (meter sec.) (H_m)</i> | 1,75 mm |
| <i>Compression ratio (R_c)</i> | 3,7 : 1 |

Dalam kajian ini, dipilih metode penambahan *Maddock mixer* dengan modifikasi variasi kedalaman *undercut*, untuk memperbaiki fluktuasi diameter filamen hasil ekstrusi. *Maddock mixer* merupakan salah satu jenis pencampur yang banyak digunakan pada *single screw extruder*. *Maddock mixer* pertama kali diciptakan oleh Gene LeRoy di pusat penelitian Union Carbide Corporation (UCC), Virginia Barat

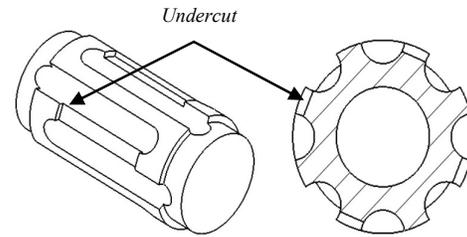
pada tahun 1969. Kemudian Bruce Maddock menyempurnakan desainnya pada tahun 1973 dan mengomersialkannya. *Maddock mixer* berbentuk saluran (*flute*) dalam arah aksial terhadap *screw* yang terdiri dari saluran masuk (*in flute*) dan saluran keluar (*out flute*). Kedua saluran tersebut dihubungkan melalui pemotongan dinding diantara keduanya yang biasa disebut *clearence/undercut*. Skema bagian *Maddock mixer* dapat dilihat pada Gambar 5.

Sun dkk. mengindikasikan bahwa parameter *maddock mixer* yang paling berpengaruh terhadap kualitas *mixing*, temperatur dan tekanan adalah kedalaman *undercut*. Semakin dalam *undercut* yang dibuat, maka temperatur pada bagian *metering* akan semakin rendah dan tekanannya semakin tinggi. Kajian oleh Sun dkk. juga menyatakan bahwa lebar dan kedalaman *flute* merupakan parameter yang saling berkaitan, dengan besar rasio yang disarankan adalah 0,5 [11].



Gambar 5. Geometri maddock mixer a) pandangan isometrik dan b) desain maddock mixer [11].

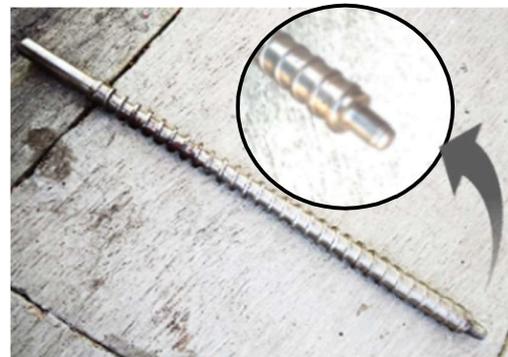
Gambar 5 juga menunjukkan desain *Maddock mixer* dengan tipe *straight flute* memiliki jumlah *flute* sebanyak 8 buah, kedalaman *flute* 3,5 mm (0,14D), lebar *flute* 7 mm (0,27D) dan panjang *mixer* 71 mm (2,8D). *Maddock mixer* ini memiliki variasi kedalaman *clearence/undercut*, yang deskripsinya dapat dimengerti dengan mudah melalui Gambar 6.



Gambar 6. Bagian undercut pada maddock mixer.

Gambar 6 menunjukkan pandangan tiga dimensi dari *Maddock mixer* dengan variasi kedalaman *clearence/undercut* yang terdiri dari 0,1 mm (0,4D), 0,5 mm (2D), dan 1,2 mm (4,7D). Tiga variasi nilai kedalaman undercut didapatkan melalui penggeseran dari nilai yang disarankan dalam kajian oleh Sun dkk. Penggeseran dapat dilakukan pada sekitar nilai yang disarankan oleh Sun dkk., baik diperkecil maupun diperbesar [11]. Dalam kajian ini, *Maddock mixer* yang digunakan memiliki dimensi yang lebih kecil dibandingkan dengan *Maddock mixer* pada kajian oleh Sun dkk. Oleh karena itu, variasi kedalaman undercut hanya berkisar antara 0,1-1,2 mm. Perbedaan selisih antara ketiga level kedalaman undercut disebabkan karena ketersediaan *tooling* pada proses pembuatan *Maddock mixer*. Geometri *Maddock Mixer* dan *screw* yang digunakan pada kajian ini dapat dilihat pada Gambar 7.

Screw hasil modifikasi pada Gambar 7(a) dipasang dalam eksperimen, kemudian data proses eksperimen dibandingkan dengan data proses sebelum dilakukan modifikasi. Selanjutnya dilakukan eksperimen pada *Maddock mixer* dengan variasi kedalaman *undercut* 0,1 mm, 0,5 mm dan 1,2 mm pada Gambar 7(b), kemudian hasil eksperimen dibandingkan dengan masing-masing variasi.

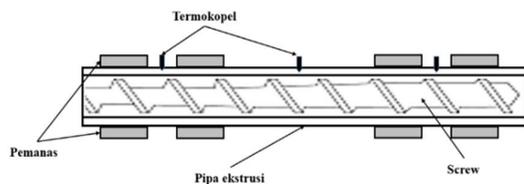


(a)



Gambar 7. (a) Spesimen screw dan (b) maddock mixer hasil modifikasi.

Pada kajian ini, langkah pertama yang dilakukan adalah melakukan pengamatan terhadap temperatur, arus listrik motor penggerak dan kecepatan putaran *screw* pada proses produksi filamen untuk mengetahui fluktuasi sistemik akibat fenomena *surging*. Pengambilan data temperatur pada proses ekstrusi dilakukan dengan memasang termokopel sepanjang pipa ekstrusi. Skema pemasangan termokopel pada kajian ini ditunjukkan pada Gambar 8 dan 9.



Gambar 8. Skema pengamatan temperatur ekstrusi.



Gambar 9. Pemasangan termokopel pada pipa ekstrusi.

Pemasangan termokopel pada pipa ekstrusi sedalam 2 mm dari permukaan pipa, sejumlah tiga titik sepanjang pipa ekstrusi. Tiga titik tersebut mewakili tiga bagian *screw* dari mesin ekstrusi yaitu *feed section*, *compression section* dan *metering section*, sehingga dapat diperoleh data temperatur yang mewakili ketiga bagian *screw* tersebut. Data temperatur kemudian disimpan menggunakan perangkat *data logger* seperti ditampilkan pada Gambar 10.

Sebelum digunakan, alat ukur yang dirancang terlebih dahulu dikalibrasi. Sedangkan periode pengambilan

data adalah selama 2,5 detik. Adapun pengambilan data kuat arus listrik motor dan kecepatan putaran *screw* dilakukan dengan observasi secara langsung melalui *inverter* yang terpasang pada motor.

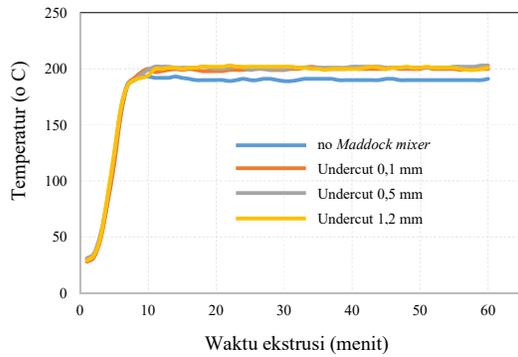


Gambar 10. Perangkat data logger.

Langkah berikutnya adalah pengamatan terhadap diameter filamen, dilakukan dengan cara pengukuran secara langsung menggunakan jangka sorong dan pengamatan secara makro untuk memeriksa cacat yang mungkin timbul. Data diameter filamen didapatkan melalui pengukuran secara langsung menggunakan jangka sorong dengan ketelitian 0,05 mm. Data diameter filamen diambil pada titik-titik sepanjang filamen dengan jumlah sampel sebanyak 5 buah pada setiap titik pengamatan berjarak 8 meter. Data filamen kemudian dipetakan dalam peta kendali (*control charts*) untuk memastikan data yang diambil berada dalam kontrol.

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil pengamatan terhadap temperatur ekstrusi pada proses ekstrusi sebelum dan setelah mengalami modifikasi dapat dilihat pada Gambar 11. Grafik tersebut merupakan hasil rata-rata temperatur pada tiga titik pengamatan yang dilakukan, yaitu bagian *feed*, bagian *compression/transition* dan bagian *metering*. Sumbu *x* pada grafik menunjukkan perubahan waktu disajikan dalam satuan menit, sementara sumbu *y* menunjukkan besarnya temperatur yang disajikan dalam satuan derajat *celcius* ($^{\circ}\text{C}$). Proses pemanasan mesin antara proses ekstrusi sebelum dan sesudah penambahan *Maddock mixer* yang telah dimodifikasi tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan, kurang lebih berlangsung selama tujuh menit. Temperatur proses ekstrusi tanpa *Maddock mixer* berkisar pada 190°C . Sementara itu, temperatur ekstrusi dengan *Maddock mixer*, ketiganya berkisar pada 200°C (*undercut* 0,1 mm, *undercut* 0,5 mm, *undercut* 1,2 mm).



Gambar 11. Temperatur ekstrusi pada saat proses ekstrusi.

Adanya kenaikan temperatur yang signifikan setelah mengalami penambahan *Maddock mixer* sesuai dengan hasil studi Sun dkk. [11], bahwa penambahan *mixer* beresiko menimbulkan kenaikan temperatur dan dapat menyebabkan degradasi pada beberapa jenis material. Hal tersebut terjadi karena meningkatnya tegangan geser (*shear stress*) setelah *screw* mengalami penambahan *Maddock mixer*. Kenaikan temperatur tersebut hanya akan mencapai titik tertentu saja. Kenaikan temperatur ini juga akan mengurangi viskositas material ekstrusi, sehingga panas yang ditimbulkan dari gesekan (*shear heating*) juga akan berkurang. Hal tersebut sesuai dengan hasil percobaan yang dilakukan, di mana pada ketiga variasi *undercut* memiliki temperatur ekstrusi yang relatif sama.

Selanjutnya, perbedaan hasil ekstrusi berupa diameter filamen dan kapasitas ekstrusi sebelum dan setelah penambahan *Maddock mixer* dengan variasi *undercut* dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Perbandingan filamen sebelum dan sesudah penambahan *Maddock mixer* dengan variasi *undercut*.

| Parameter | Sebelum modifikasi | Setelah modifikasi | | |
|----------------------------------|--------------------|--------------------|-------------------|-------------------|
| | | Undercut t 0,1 mm | Undercut t 0,5 mm | Undercut t 1,2 mm |
| Diameter rata-rata (mm) | 1,807 | 1,746 | 1,748 | 1,706 |
| Deviasi standar | 0,0535 | 0,0543 | 0,0669 | 0,0465 |
| Massa (kg) | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Waktu ekstrusi (menit) | 95 | 99 | 96 | 77 |
| Kapasitas/laju ekstrusi (kg/jam) | 0,6316 | 0,6061 | 0,6250 | 0,7792 |

Ada tiga parameter yang dibandingkan, yaitu diameter rata-rata, deviasi standar dan kapasitas ekstrusi. Diameter rata-rata filamen yang dihasilkan oleh proses ekstrusi sebelum penambahan *Maddock mixer* adalah sebesar 1,807 mm. Sementara itu,

filamen yang dihasilkan proses ekstrusi sesudah penambahan *Maddock mixer* memiliki diameter rata-rata sebesar 1,746 mm untuk variasi dengan *undercut* sebesar 0,1 mm, 1,748 mm untuk variasi dengan *undercut* sebesar 0,5 mm dan 1,706 mm untuk variasi dengan *undercut* sebesar 1,2 mm. Deviasi standar filamen yang dihasilkan oleh proses ekstrusi sebelum penambahan *Maddock mixer* adalah sebesar 0,0535. Sementara itu, filamen yang dihasilkan proses ekstrusi sesudah penambahan *Maddock mixer* memiliki deviasi standar sebesar 0,0543 untuk variasi dengan *undercut* sebesar 0,1 mm, 0,0669 untuk variasi dengan *undercut* sebesar 0,5 mm dan 0,0465 untuk variasi dengan *undercut* sebesar 0,1 mm. Kapasitas ekstrusi sebelum modifikasi sebesar 0,6316 kg/jam, sementara itu setelah modifikasi kapasitasnya menjadi 0,6061 kg/jam untuk variasi dengan *undercut* sebesar 0,1 mm, 0,6250 kg/jam untuk variasi dengan *undercut* sebesar 0,5 mm dan sebesar 0,792 kg/jam untuk variasi dengan *undercut* sebesar 1,2 mm.

Tabel 2 juga menunjukkan bahwa deviasi standar diameter filamen mengalami perubahan yang tidak terpolara setelah *screw* mengalami penambahan *Maddock mixer*. Pada *screw* dengan *undercut* sebesar 0,1 mm deviasinya mendekati *screw* tanpa *Maddock mixer*. Sementara *screw* dengan *undercut* 0,5 mm deviasinya lebih besar dibandingkan *screw* tanpa *Maddock mixer* dan *screw* dengan *undercut* 1,2 mm deviasinya lebih besar dari *screw* tanpa *Maddock mixer*. Hal ini menunjukkan kualitas filamen yang dihasilkan tidak dipengaruhi oleh variasi *undercut* pada *Maddock mixer*. Hal ini disebabkan karena proses pencampuran dan pelelehan pada *metering section* sebelum penambahan *Maddock mixer* telah terjadi dengan cukup baik, sehingga penambahan *Maddock mixer* tidak menimbulkan efek yang berarti. Dengan kata lain, fluktuasi diameter yang terjadi disebabkan karena faktor yang lain.

Sementara itu, diameter rata-rata pada proses ekstrusi setelah modifikasi memiliki nilai yang lebih dekat dengan nilai diameter target (1,75 mm) yaitu sebesar 1,746 mm; 1,7483 mm; dan 1,7056 mm, bila dibandingkan dengan nilai rata-rata diameter filamen sebelum penambahan *Maddock mixer* (1,8070 mm). Namun, hal ini tidak menunjukkan bahwa kualitas filamen setelah modifikasi menjadi lebih baik. Rata-rata diameter filamen tidak bisa dijadikan parameter untuk menilai kualitas filamen yang diproduksi, karena nilainya sangat bergantung pada berbagai parameter lain dalam proses produksi filamen, salah satunya adalah kecepatan penarikan (*pulling speed*) yang besarnya pada setiap proses diatur secara manual oleh pengguna.

Hasil lain yang didapatkan dari kajian ini adalah bahwa kapasitas ekstrusi mengalami penurunan menjadi sebesar 0,6061 kg/jam akibat penambahan *Maddock mixer* (*undercut* 0,1 mm) pada proses ekstrusi. Namun pada saat besar kedalaman *undercut* bertambah menjadi 0,5 mm dan 1,2 mm, besar laju

ekstrusi bertambah menjadi 0,6250 kg/jam dan 0,7792 kg/jam. Hal ini disebabkan oleh terhambatnya laju aliran material ekstrusi dikarenakan berkurangnya lebar penampang saluran (*tunnel*) setelah penambahan *Maddock mixer* pada proses ekstrusi, namun pada saat kedalaman *undercut* diperbesar, lebar penampang saluran justru menjadi lebih besar sehingga meningkatkan laju ekstrusi.

4. Kesimpulan

Pada kajian ini, dilakukan usaha perbaikan fluktuasi diameter filamen yang dibuat dari bahan plastik daur ulang dengan mesin ekstrusi Extruder D29. Perbaikan yang dilakukan adalah berupa penambahan *Maddock mixer* dengan variasi undercut. *Maddock mixer* yang digunakan memiliki dimensi sebagai berikut: lebar *flute* 7 mm (0,27D); panjang *mixer* 71 mm (2,8D); dan 3 variasi kedalaman *flute*, yaitu 0,1 mm (0,04D), 0,5 mm (0,02D) dan 1,2 mm (0,47D).

Hasil pengujian menunjukkan bahwa modifikasi *screw* dengan menambahkan *Maddock mixer* pada Extruder D29 tidak efektif untuk meningkatkan kualitas filamen yang dihasilkan. Selain itu perubahan kedalaman *undercut* pada *screw* Extruder D29 tidak mempengaruhi hasil diameter filamen yang diproduksi, namun tetap berpengaruh terhadap kapasitas ekstrusi pada mesin. Kapasitas ekstrusi untuk *undercut* 0,1 mm sebesar 0,6061 kg/jam; kapasitas ekstrusi untuk *undercut* 0,5 mm sebesar 0,6250 kg/jam dan kapasitas ekstrusi untuk *undercut* 1,2 mm adalah sebesar 0,7792 kg/jam.

Daftar Pustaka

- [1] K. Mikula *et al.*, “3D printing filament as a second life of waste plastics—a review,” *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 2020.
- [2] L. Gu and T. Ozbakkaloglu, “Use of recycled plastics in concrete: A critical review,” *Waste Manag.*, vol. 51, no. July 2019, pp. 19–42, 2016.
- [3] S. Hwang, E. I. Reyes, K. sik Moon, R. C. Rumpf, and N. S. Kim, “Thermo-mechanical Characterization of Metal/Polymer Composite Filaments and Printing Parameter Study for Fused Deposition Modeling in the 3D Printing Process,” *J. Electron. Mater.*, vol. 44, no. 3, pp. 771–777, 2015.
- [4] 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.*, vol. 9, no. 1, pp. 3771–3775, 2020.
- [5] Sidney Levy, *Plastic Extrusion Technology Handbook*. New York: Industrial Press Inc, 1981.
- [6] M. A. Spalding, J. R. Powers, P. A. Wagner, and K. S. Hyun, “Flow surging in single-screw, plasticating *Extruders*,” *TAPPI PLACE Conf. 2007 - "Polymers, Laminations, Adhes.*

Coatings, Extrus., vol. 2, no. 3, pp. 600–646, 2007.

- [7] A. Spal, R. Power, and A. W, “Flow Surging in Single-Screw , Plasticating *Extruders*,” no. January, 2015.
- [8] M. A. Spalding and G. A. Campbell, “An engineering approach to designing plasticating *screws* for single-screw *Extruders*,” *Annu. Tech. Conf. - ANTEC, Conf. Proc.*, vol. 2, no. October 2014, pp. 1174–1179, 2009.
- [9] S. M. Raza and D. Singh, “Experimental Investigation on Filament Extrusion using recycled materials .,” 2020.
- [10] Herianto, S. I. Atsani, and H. Mastriswadi, “Recycled Polypropylene Filament for 3D Printer: Extrusion Process Parameter Optimization,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 722, no. 1, pp. 0–7, 2020.
- [11] X. Sun, M. A. Spalding, T. W. Womer, and N. Uzelac, “Design optimization of maddock mixers for single-screw extrusion using numerical simulation,” *Annu. Tech. Conf. - ANTEC, Conf. Proc.*, vol. 2017-May, pp. 1017–1023, 2017.
- [12] H. Pan *et al.*, *Rauwendaal Polymer Extrusion*, vol. 65, no. 12. 2014.