

ANALISIS LAJU ALIRAN PADA NOZZLE PRINTER TIGA DIMENSI UNTUK MATERIAL THERMOPLASTIC POLYURETHANE

Mateus Dylan, Arka Soewono, Marten Darmawan*

Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya
BSD City, Jalan Raya Cisauk, Desa Sampora, Kec. Cisauk, Kab. Tangerang, Banten, 15435

*Email: marten.darmawan@atmajaya.ac.id

Abstrak

Penggunaan Printer 3D saat ini sudah semakin luas dan banyak macam bentuk yang dapat dibuat karena sistem *layer-by-layer*. Pada penelitian ini dilakukan pengukuran laju aliran volumetrik (debit) menggunakan material *Thermoplastic Polyurethane* (TPU) sebagai filamen printer 3D. TPU memiliki karakteristik material yang elastis. Pada eksperimen, dapat dibuktikan bahwa fluida TPU memiliki sifat non-newtonian, yaitu *shear-thinning* karena semakin besar temperatur dan kecepatan *input* yang diberikan pada fluida menyebabkan peningkatan debit *outlet*. Pengukuran laju aliran volumetrik (debit) fluida ditujukan agar dapat diketahui pengaruh viskositas fluida terhadap kestabilan debit aliran. Data hasil eksperimen dibandingkan dengan data hasil simulasi menggunakan perangkat lunak ANSYS *Fluent* 17.2. Data hasil simulasi belum dapat menunjukkan pengaruh viskositas terhadap debit aliran diakibatkan data yang dimasukkan pada perangkat lunak hanya berdasarkan dari jurnal dan lembaran data spesifikasi produk pabrik tertentu.

Kata kunci: *Thermoplastic Polyurethane* (TPU), simulasi, eksperimen, debit aliran, *shear-thinning*.

Abstract

In recent years, the use of 3D Printers is increasingly widespread that many types of shapes can be made because layer-by-layer mechanism. This research measured the flow discharge of Thermoplastic Polyurethane (TPU) as a 3D Printer filament. The characteristic of TPU material is elastic. The experiment result can be proven that TPU fluids has non-newtonian characteristic, specifically shear-thinning because the greater of temperature and speed input to the fluid cause the increase of outlet flow discharge. The measurement of fluid flow discharge is intended to determine the effect of fluid viscosity to flow discharge stability. Experimental data tests were compared with simulation data using ANSYS Fluent 17.2 software. Simulation data have not been able to show the effect of viscosity to flow discharge because the input data in software merely based on the data from journal and certain factory product specification datasheet.

Keywords: *Thermoplastic Polyurethane* (TPU), simulation, experiment, flow discharge, *shear-thinning*.

1. Pendahuluan

Printer 3D, yang juga merupakan *additive manufacturing*, memiliki aplikasi penggunaan yang luas [1]. Printer 3D mencetak benda dari filamen dengan mekanisme *layer-by-layer* sehingga mampu membuat objek dengan bentuk yang rumit [2]. Beberapa material filamen pada printer 3D yang umum digunakan seperti *polylactic acid* (PLA), *acrylonitrile butadiene styrene* (ABS), dan *nylon* merupakan filamen yang menghasilkan hasil cetak objek keras (tidak elastis). Penggunaan printer 3D saat ini umumnya hanya menjangkau produk yang keras. Padahal, printer 3D dapat memiliki aplikasi penggunaan yang lebih luas apabila dapat menghasilkan produk yang elastis.

Salah satu filamen elastis yang dapat digunakan adalah karet sintetis. Karet sintetis yang akan dimodifikasi merupakan jenis *thermoplastic polyurethane* (TPU). TPU merupakan material yang memiliki sifat elastis dan kuat, tahan minyak, dan tahan terhadap abrasi yang terjadi pada permukaan [3]. Penggunaan material TPU pada printer 3D dapat menghasilkan suatu produk yang elastis sehingga diharapkan printer 3D memiliki nilai jual yang semakin tinggi. Meskipun material TPU memiliki potensi seperti yang telah dijelaskan, perilaku aliran TPU pada *nozzle* perlu dikaji secara mendalam melalui metode eksperimen

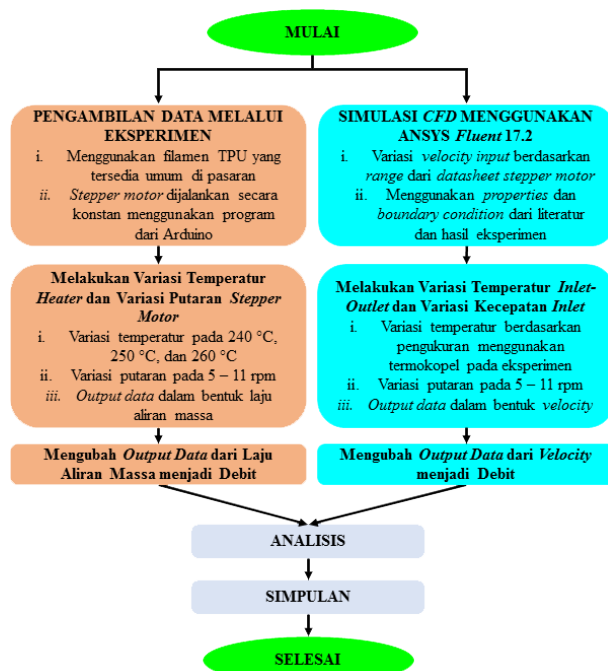
dan simulasi. Selain itu, TPU merupakan fluida non-newtonian sehingga sifat fluida dari TPU sangat dipengaruhi oleh *shear rate* dan temperatur [4].

Oleh karena itu, pada penelitian ini akan dibandingkan dan dianalisis mengenai laju aliran *thermoplastic polyurethane* (TPU) yang terjadi pada *nozzle* printer 3D dengan metode eksperimen maupun simulasi. Parameter yang digunakan pada saat eksperimen maupun simulasi adalah temperatur dan putaran *stepper motor* sebagai kecepatan *inlet*. Simulasi menggunakan *software* ANSYS *Fluent* 17.2. Hasil dari penelitian ini iakan menjadi kajian awal untuk pengembangan printer 3D komersial dengan basis filamen TPU.

Pada penelitian ini juga dilakukan beberapa pembatasan pemodelan, yaitu menggunakan material TPU yang tersedia secara komersial, menggunakan *software* ANSYS *Fluent* 17.2, analisis laju aliran dibatasi pada bagian dalam *nozzle*, aliran *inlet nozzle* diasumsikan laminar, perpindahan panas konveksi diasumsikan tidak signifikan, *properties* simulasi berdasarkan studi pustaka dari jurnal dan *datasheet* produk suatu perusahaan untuk material yang sama (TPU), dan analisis akan berfokus pada debit aliran material TPU yang melewati *nozzle*.

2. Metode Penelitian

Pada penelitian ini, pengambilan data melalui uji eksperimen dan simulasi dilakukan pada waktu yang bersamaan, Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Pengambilan data eksperimen menggunakan Printer 3D *Zonestar* dengan melakukan variasi temperatur *heater* dan untuk variasi putaran *stepper motor* menggunakan bantuan Arduino untuk mengontrol pergerakan *stepper motor* tersebut. *Stepper motor* yang digunakan memiliki kode seri SY42STH38-1684A. Simulasi menggunakan software ANSYS *Fluent* 17.2.

Temperatur *heater* yang digunakan adalah 240 °C, 250 °C, dan 260 °C. Pada bagian *inlet* dan *outlet nozzle* dilakukan pengukuran temperatur secara langsung (menggunakan termokopel) agar diketahui penurunan temperatur pada bagian tersebut. Data hasil pengukuran temperatur tersebut digunakan sebagai *input* pada simulasi.

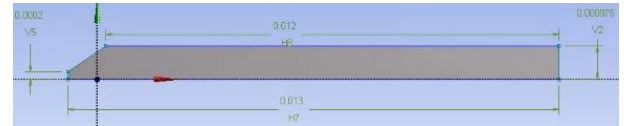
Putaran *stepper motor* yang digunakan adalah 5 rpm – 11 rpm dengan kenaikan setiap 0,5 rpm. Untuk temperatur *heater* sebesar 260 °C, dilakukan juga pengambilan data untuk putaran 12 rpm, 13 rpm, 14 rpm, dan 15 rpm.

Variasi antara temperatur dan putaran *stepper motor* dilakukan untuk mengetahui pengaruh temperatur dan *stepper motor* terhadap *output* yang dihasilkan dan fluktuasi temperatur terhadap kestabilan *output*. Pengukuran *output* dilakukan menggunakan timbangan dan *stopwatch* sehingga *output* yang dihasilkan dalam bentuk massa per satuan waktu (laju aliran massa).

Dibutuhkan putaran yang konstan dan terus-menerus sesuai dengan waktu yang telah ditentukan. Oleh karena itu, putaran dari *motor stepper* diatur menggunakan bantuan program Arduino. Dari program

Arduino dapat diatur besaran putaran motor dan waktu yang dibutuhkan.

Simulasi menggunakan ANSYS *Fluent* 17.2 menggunakan model dua dimensi *axisymmetric*, Gambar 2. Model *axisymmetric* merupakan model yang merujuk pada objek yang memiliki simetri silindris.



Gambar 2. Drawing Nozzle untuk Simulasi

Pengaturan *meshing* untuk penelitian ini menggunakan metode *quadrilaterals*. *Quadrilaterals* merupakan poligon dengan empat sisi dan empat sudut. Pengaturan untuk simulasi aliran fluida dengan kondisi waktu *steady* dan aliran diasumsikan laminar serta terdapat fungsi energi sebagai akibat terjadi kehilangan panas dari *inlet* ke *outlet nozzle*.

Nozzle menggunakan material *brass-yellow* dengan nilai konduktivitas termal sebesar 119 W.m⁻¹.K⁻¹, massa jenis sebesar 8800 kg.m⁻³, dan panas spesifik sebesar 380 J.kg⁻¹.K⁻¹ [5].

Fluida TPU menggunakan *properties* yang terdapat pada jurnal dan *datasheet* suatu perusahaan dengan nilai massa jenis sebesar 1210 kg.m⁻³ [6], panas spesifik sebesar 2000 J.kg⁻¹.K⁻¹, dan konduktivitas termal sebesar 0,22 W.m⁻¹.K⁻¹ [7]. Fluida TPU memiliki sifat non-newtonian sehingga nilai viskositas dari fluida TPU sendiri berubah-ubah sesuai dengan kondisi percobaan. Parameter viskositas terdiri atas *consistency index* sebesar 1728 kg.sⁿ⁻².m⁻¹, *power-law index* sebesar 0,8642, *minimum viscosity limit* sebesar 400 kg.m⁻¹.s⁻¹, *maximum viscosity limit* sebesar 1500 kg.m⁻¹.s⁻¹, *reference temperature* sebesar 463,15 K, dan *activation energy* sebesar 1000 K [8].

Boundary condition diatur agar kondisi yang disimulasikan menyerupai kondisi pada saat eksperimen. Pada *boundary conditions*, terdapat *axis*, *inlet*, *outlet*, dan *wall*. Bagian *inlet* dimasukkan *velocity input*, *pressure input*, dan *temperature inlet*. Bagian *outlet* dimasukkan *velocity outlet* dan *temperature outlet*. Pada bagian *wall* dimasukkan *temperature wall* (mengikuti *temperature outlet*).

Nilai *properties input* akan bervariasi, tergantung dari kecepatan *stepper motor* yang akan diatur. Variasi kecepatan (*revolutions per minute/RPM*) *motor stepper* diubah menjadi kecepatan linear dan diketahui bahwa jari-jari *stepper motor* adalah sebesar 5,5 mm. Nilai dari kecepatan linear tersebut yang digunakan sebagai kecepatan *input*.

Setelah melakukan simulasi, hasil yang ditampilkan pada ANSYS *Fluent* 17.2 merupakan *maximum velocity outlet*. Pencarian nilai debit *outlet* mengamsumsikan bahwa aliran telah laminar dan *fully developed*.

Di dalam software ANSYS *Fluent* 17.2, perlu diketahui juga *properties* perpindahan panas untuk bagian *wall*. *Wall* merupakan dinding *nozzle* sehingga temperatur yang ditulis merupakan temperatur *nozzle*

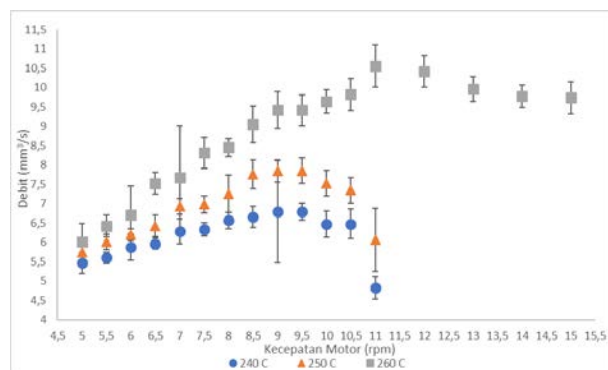
yang didapat pada saat eksperimen. Diasumsikan bahwa pada *wall* terjadi kondisi *no-slip condition* ($v = 0$).

Bagian *axis* merupakan bagian tengah dari *nozzle*. Sumbu *axis* tersebut merupakan sumbu *axisymmetric* sehingga pada saat melihat *result* dari simulasi, sumbu *axis* terletak pada tengah *nozzle* (sebagai *mirror* agar menjadi bentuk *nozzle* utuh).

Setelah uji eksperimen dan simulasi selesai dilakukan, nilai debit dari hasil eksperimen dibandingkan dengan debit aliran berdasarkan simulasi pada ANSYS *Fluent* 17.2. Penghitungan persentase perbandingan data eksperimen dan simulasi pada setiap percobaan berguna untuk perbandingan kuantitatif sehingga diketahui penyimpangan hasil eksperimen dan simulasi.

3. Hasil dan Pembahasan

Output yang dihasilkan pada eksperimen adalah *mass flow rate*. *Mass flow rate* tersebut kemudian diubah menjadi debit. Grafik menunjukkan bahwa pada saat putaran motor rendah, kenaikan debit sebanding dengan peningkatan putaran motor, Gambar 3. Namun, debit justru semakin menurun walaupun putaran motor ditingkatkan pada saat putaran motor tinggi. Fenomena ini tidak sesuai dengan teori di mana kenaikan putaran motor (kecepatan *input*) akan menghasilkan kenaikan debit pula (kecepatan *outlet*).



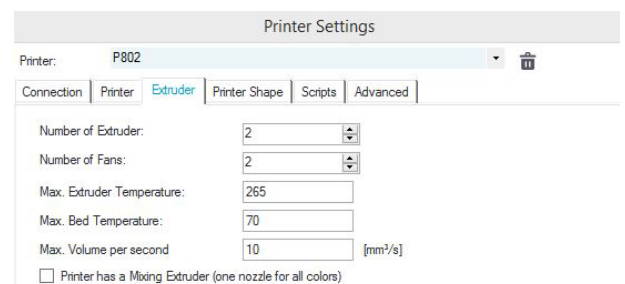
Gambar 3. Grafik data Eksperimen Debit vs Kecepatan Motor

Seperti yang diketahui, *3D Printer* yang digunakan pada dasarnya merupakan *3D Printer* yang menggunakan filamen ABS dan PLA. Kedua filamen tersebut memiliki permukaan yang lebih kasar jika dibandingkan dengan filamen TPU. Filamen sendiri memerlukan gaya yang cukup besar untuk dapat masuk ke dalam *nozzle*. Pada saat terjadi peningkatan putaran motor, terjadi penurunan *torque* pada motor. Hal ini dapat menyebabkan terjadinya selip antara motor dengan filamen. Selip terjadi karena motor tidak mampu mendorong filamen dengan kecepatan linear yang sama akibat kurangnya *torque*.

Dari grafik dapat dilihat bahwa semakin tinggi temperatur fluida, semakin tinggi pula debit yang dihasilkan, Gambar 3. Hal ini dikarenakan TPU memiliki sifat fluida non-newtonian, artinya akan terjadi perubahan viskositas sesuai dengan perilaku yang diberikan. TPU memiliki sifat *shear thinning*, yaitu semakin besar gaya dan temperatur yang diberikan

kepada TPU akan menyebabkan viskositas TPU semakin cair (nilai viskositas semakin rendah).

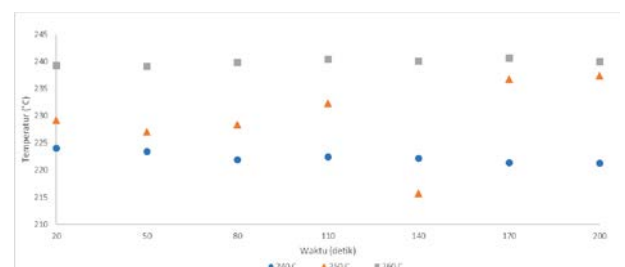
Kecepatan putaran motor saat temperatur *heater* diatur pada 240 °C, 250 °C, dan 260 °C adalah mulai dari 5 rpm hingga 11 rpm dan pencatatan data dilakukan untuk kenaikan kecepatan *inlet* setiap 0,5 rpm. Namun, pada saat temperatur *heater* diatur pada 260 °C dilakukan juga pengukuran untuk kecepatan 12 rpm hingga 15 rpm untuk kenaikan setiap 1 rpm. Hal ini disebabkan karena pada temperatur 240 °C dan 250 °C telah didapat tren eksponensial untuk data pada kecepatan 5 rpm hingga 11 rpm. Pada temperatur 260 °C, tren tersebut belum terlihat pada saat kecepatan 11 rpm sehingga dilakukan pengukuran tambahan pada kecepatan 12 rpm hingga 15 rpm untuk mencari tahu apakah tren tersebut (eksponensial) akan terjadi juga pada temperatur 260 °C atau tidak. Dapat dilihat bahwa tren eksponensial juga terjadi pada temperatur 260 °C.



Gambar 4. Pengaturan Printer 3D pada *Software* Repetier

Pengaturan debit maksimum untuk printer 3D adalah sebesar 10 mm³.s⁻¹, Gambar 4. Data hasil eksperimen yang mampu memenuhi debit sebesar 10 mm³.s⁻¹ adalah pada saat *heater* diatur pada 260 °C. Hal ini menunjukkan bahwa kemungkinan besar hasil *print* benda yang memiliki kualitas bentuk paling baik adalah saat *heater* diatur pada 260 °C.

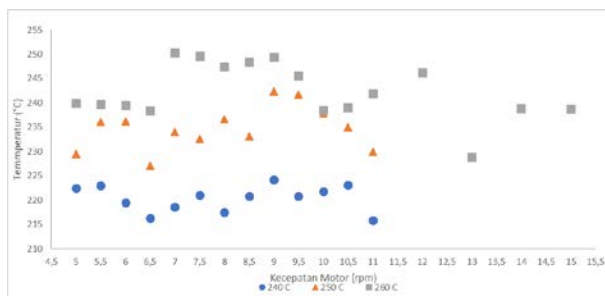
Grafik dalam Gambar 3 dapat dilihat bahwa terdapat nilai standar deviasi (ditunjukkan dengan *error bar* yang menunjukkan rentang nilai debit minimal dan maksimal pada data tersebut). Nilai minimal debit dan maksimal debit tersebut didapat dari pengambilan data dengan interval waktu setiap 30 detik. Dapat dilihat bahwa setiap pengambilan data sebenarnya juga menghasilkan debit yang berbeda. Hal ini dapat dikarenakan putaran *stepper motor* tidak benar-benar konstan (karena putaran *stepper motor* berbasis pada sudut putar dan tergantung pengaturan step yang digunakan).



Gambar 5. Grafik Temperatur *Inlet* pada 5 RPM

Hal lain yang menyebabkan terjadi variasi nilai debit pada setiap pengambilan data di dalam parameter (rpm dan *temperature heater*) yang sama adalah ketidakmampuan *heater* untuk menjaga temperatur *inlet* TPU tetap stabil, Gambar 5. Hal ini menyebabkan perubahan nilai viskositas setiap terjadi perubahan temperatur pada TPU sehingga debit menjadi tidak stabil.

Pada eksperimen, terdapat tiga pengaturan temperatur pada *heater*, yaitu 240 °C, 250 °C, dan 260 °C, Gambar 6. Dapat dilihat bahwa terjadi penurunan temperatur (*heat loss*) dari *heater* menuju bagian *inlet nozzle*. Penurunan temperatur rata-rata berkisar pada 10 °C – 20 °C. Hal ini disebabkan karena adanya jarak dari *heater* menuju *inlet nozzle* sehingga terjadi *heat loss*. *Heat loss* sendiri terjadi karena terjadinya perpindahan panas antara material TPU dengan dinding *nozzle*. Pada dinding *nozzle* sendiri juga terdapat perpindahan panas antara dinding *nozzle* dengan udara (lingkungan). Perbedaan temperatur yang signifikan antara udara dengan dinding *nozzle* inilah yang menyebabkan terjadinya *heat loss* dan penurunan temperatur pada bagian *inlet nozzle*.



Gambar 6. Grafik Average Inlet Temperature vs Kecepatan Motor

Dapat dilihat juga bahwa *inlet temperature* selalu berubah-ubah. Padahal, temperatur *heater* tetap diatur pada nilai yang sama. Hal ini dikarenakan *heater* akan mati pada saat sensor dari Printer 3D membaca temperatur sudah mencapai nilai yang telah ditentukan dan akan aktif kembali pada saat temperatur di bawah nilai yang telah ditentukan. Pada saat aktif kembali, *heater* tidak dapat menjaga temperatur tetap konstan, melainkan akan turun dulu sedikit sebelum *heater* mampu memanaskan kembali material TPU hingga temperatur yang telah ditentukan. Maka wajar apabila temperatur yang terbaca oleh termokopel tidak stabil pada setiap percobaan.

Selain faktor dari *heater*, sensor termokopel ditempel pada dinding *nozzle* bagian *inlet* dan *outlet* dan termokopel tersebut dipegang oleh tangan. Hal ini menyebabkan posisi termokopel yang bergeser-geser sedikit pada saat pengambilan data karena permukaan *nozzle* yang licin. Hal ini juga menyebabkan terjadinya perbedaan nilai temperatur yang dibaca oleh termokopel karena posisi yang berubah-ubah. Walaupun demikian, perubahan posisi termokopel hanyalah sedikit karena termokopel diusahakan tetap berada di tempat awalnya.

Simulasi pada ANSYS *Fluent* 17.2 dilakukan pada beberapa kondisi, yaitu pengaruh nilai *alpha*,

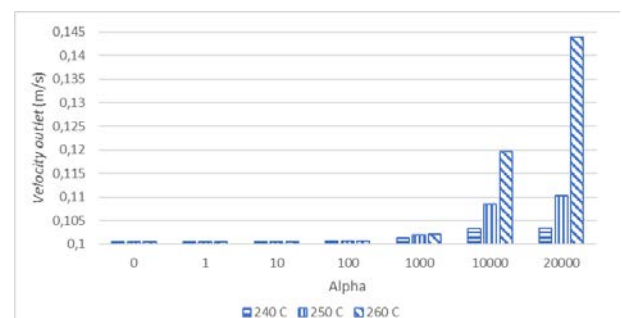
kecepatan *inlet*, dan temperatur (*inlet* dan *outlet*). Material TPU yang digunakan tidak diketahui besaran nilai energi aktivasi sehingga dilakukan simulasi dengan variasi nilai *alpha* untuk mengetahui pengaruh nilai *alpha* terhadap nilai *velocity outlet* hasil simulasi.

Dapat dilihat bahwa semakin besar nilai *alpha*, semakin besar juga pengaruh temperatur terhadap nilai *velocity outlet*, Tabel 1. Nilai temperatur didapat dari hasil eksperimen sehingga temperatur pada simulasi menyerupai kondisi pada saat eksperimen. Pada saat *alpha* dimasukkan nilai nol, simulasi tidak memperhitungkan pengaruh temperatur terhadap viskositas fluida sehingga nilai *velocity outlet* tidak akan berubah walaupun terjadi variasi *temperature inlet* dan *temperature outlet*.

Tabel 1. Perbandingan Hasil Simulasi dengan Variasi Nilai *Alpha* (kecepatan inlet sebesar 5 RPM)

α	Velocity outlet (m/s)		
	240 °C	250 °C	260 °C
0	0,1005255		
1	0,1005262	0,1005268	0,100527
10	0,1005332	0,1005389	0,1005408
100	0,100603	0,1006603	0,1006791
1000	0,1013166	0,1019207	0,1021236
10000	0,1032711	0,1084149	0,1196726
20000	0,1034527	0,1102411	0,1440247

Pada grafik dapat dilihat tren/fenomena pada fluida TPU di mana semakin besar nilai *alpha*, semakin besar peningkatan *velocity outlet*, terutama pada fluida dengan temperatur yang lebih tinggi, Gambar 7. Hal ini membuktikan bahwa fluida TPU memiliki karakteristik *shear-thinning*.



Gambar 7. Grafik Perbandingan Variasi Nilai *Alpha*

Pada simulasi didapat informasi bahwa pengaruh temperatur cukup berdampak pada hasil *debit outlet* dan semakin tinggi temperatur *heater*, semakin tinggi pula *debit outlet* yang ditunjukkan oleh hasil simulasi, Tabel 2.

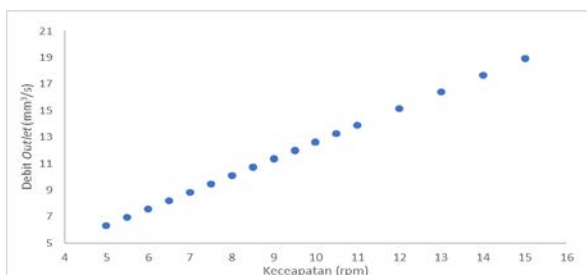
Dapat dilihat bahwa terjadi perbedaan nilai *debit outlet* pada setiap kondisi (di putaran motor yang sama) namun tidak signifikan. Hal ini membuat plot data menjadi grafik menjadi tidak maksimal karena rentang nilai *debit outlet* yang terlalu besar jika semua variasi putaran motor dimasukkan pada grafik. Oleh karena itu, grafik setiap variasi nilai *alpha* dan temperatur dipisah agar dapat dilihat dengan lebih jelas perbandingannya.

Tabel 2. Debit *Outlet* Hasil Simulasi

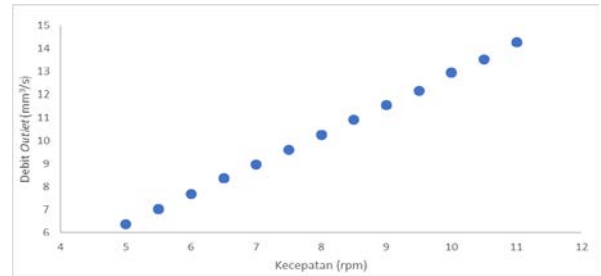
RPM	$Q_{\text{output}} \text{ (mm}^3/\text{s)}$			
	$\alpha = 0$	$\alpha = 1000$		
		240 °C	250 °C	260 °C
5	6,3162	6,36591	6,40387	6,41662
5,5	6,94786	7,03964	7,04074	7,09227
6	7,57953	7,68608	7,71093	7,75317
6,5	8,21097	8,38553	8,38814	8,38979
7	8,84245	8,97245	9,02583	9,08213
7,5	9,4743	9,59986	9,63337	9,79764
8	10,106	10,2602	10,3374	10,4678
8,5	10,7374	10,9087	10,9416	11,0329
9	11,3691	11,5625	11,6443	11,6938
9,5	12,0007	12,1703	12,257	12,3616
10	12,6324	12,9761	13,0554	13,0934
10,5	13,2641	13,5594	13,6165	13,6873
11	13,8955	14,2927	14,3106	14,4815
12	15,1588			15,8161
13	16,4222			16,7897
14	17,6853			18,5239
15	18,9486			19,8922

Dapat dilihat bahwa terjadi perbedaan nilai debit *outlet* pada setiap kondisi (di putaran motor yang sama) namun tidak signifikan. Hal ini membuat plot data menjadi grafik menjadi tidak maksimal karena rentang nilai debit *outlet* yang terlalu besar jika semua variasi putaran motor dimasukkan pada grafik. Oleh karena itu, grafik setiap variasi nilai α dan temperatur dipisah agar dapat dilihat dengan lebih jelas perbandingannya.

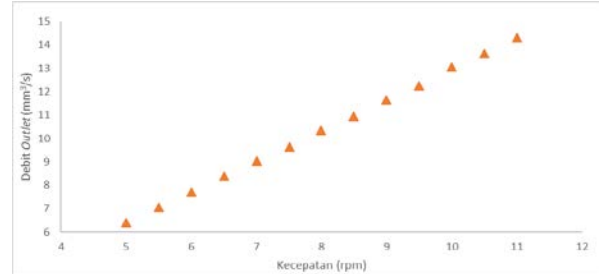
Terjadi hubungan linear antara debit *outlet* dengan *velocity inlet*, Gambar 8. Mengacu pada teori fluida non-newtonian, grafik membentuk hubungan eksponensial antara viskositas dengan *shear rate* (gaya). Semakin cair fluida, semakin tinggi nilai debit *outlet*. Hubungan antara *torque* dan rpm pada *stepper motor* adalah berkebalikan (berlawanan). Oleh karena itu, peningkatan putaran motor akan membuat *pressure input* menurun. Semakin rendah *pressure input*, semakin tinggi nilai viskositas fluida (semakin kental). Hal ini menyebabkan peningkatan nilai debit *outlet* seharusnya semakin rendah pada putaran motor tinggi. Namun, nilai *pressure input* yang dimasukkan ke dalam pengaturan diasumsikan sama walaupun pada kenyataannya sebenarnya terjadi perubahan tekanan walaupun kecil.



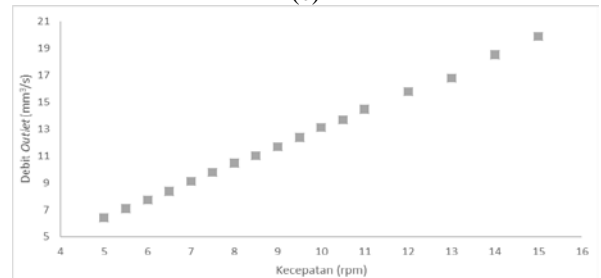
(a)



(b)



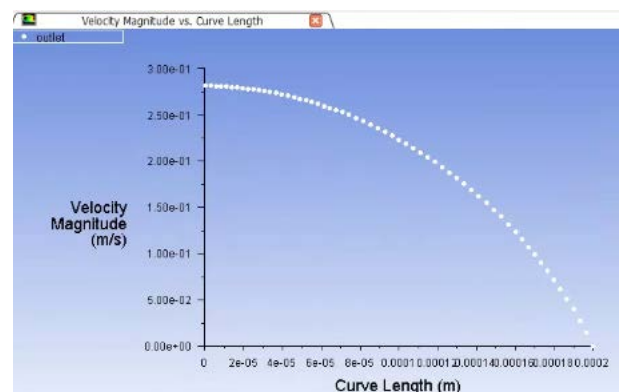
(c)



(d)

Gambar 8. Grafik Debit *Outlet* Hasil Simulasi
(a) $\alpha = 0$, (b) $\alpha = 1000$ & $T = 240$ °C,
(c) $\alpha = 1000$ & $T = 250$ °C, (d) $\alpha = 1000$ & $T = 260$ °C

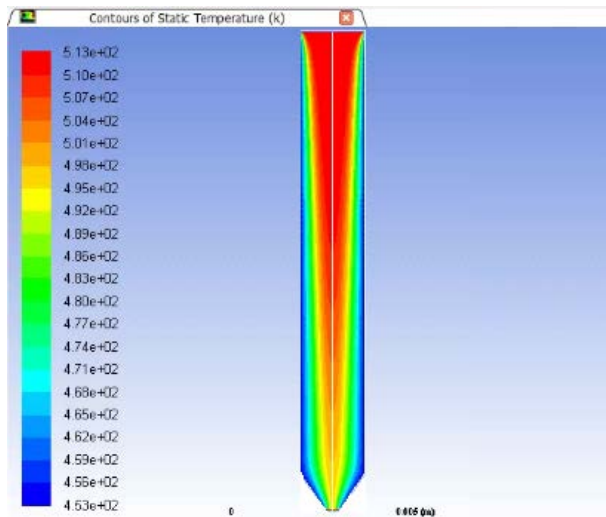
Dapat dilihat bahwa bagian tengah *nozzle* memiliki kecepatan maksimal dan pada dinding *nozzle* kecepatan fluida sama dengan nol (*no-slip condition*), Gambar 9. Titik nol merupakan bagian tengah dari *nozzle* dan titik 0,0002 m merupakan dinding *nozzle*. Pada grafik dapat dilihat bahwa kecepatan *outlet nozzle* membentuk kurva parabola.



Gambar 9. Grafik *Velocity Outlet*

Pada simulasi menggunakan ANSYS *Fluent 17.2* dapat juga dilihat persebaran panas pada saat fluida mengalir melewati *nozzle*. Persebaran panas tersebut

ditunjukkan dalam bentuk *contours of static temperature*, Gambar 10.



Gambar 10. *Contours of Static Temperature* pada Nozzle

Dapat dilihat bahwa temperatur akan semakin rendah pada bagian dinding *nozzle*. Hal ini dikarenakan sumber panas berasal dari fluida TPU yang telah dipanaskan oleh *heater*. Pada bagian dinding *nozzle* terjadi perpindahan panas antara dinding dengan fluida TPU maupun antara dinding dengan udara lingkungan. Oleh sebab itu, pada bagian dinding temperatur yang diukur oleh simulasi menjadi temperatur yang paling rendah jika dibandingkan dengan bagian dalam *nozzle*.

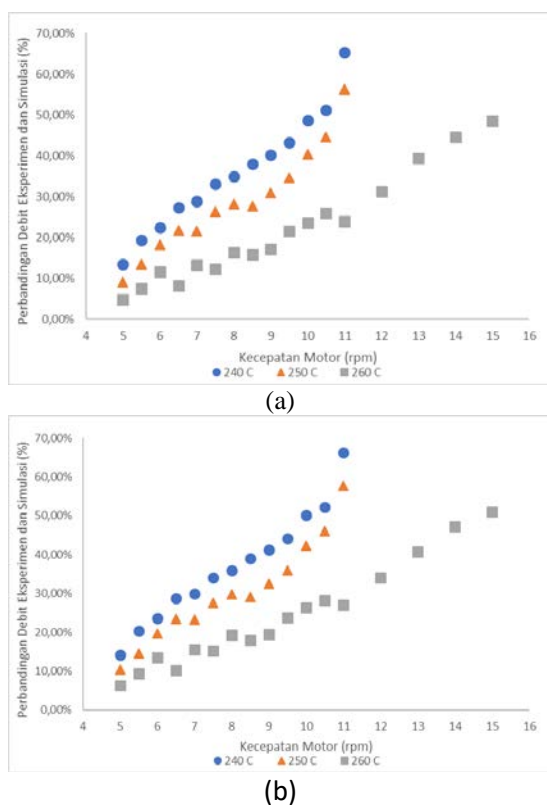
Data hasil eksperimen dan simulasi dibandingkan seperti pada grafik, Gambar 11. Jika melihat perbandingan data tersebut, hanya pada putaran motor rendah yang memiliki persentase di bawah dari 10%. Selain itu, dapat dilihat juga bahwa semakin tinggi temperatur fluida, semakin rendah persentase perbandingan data. Hal ini dapat disebabkan karena fluida dengan temperatur tinggi memiliki viskositas yang lebih rendah (lebih cair). Viskositas fluida sangat berpengaruh pada bagian *nozzle* yang mulai menyempit (diameter *nozzle* mengecil) karena pada bagian tersebut terjadi perubahan pada aliran fluida dan terjadi peningkatan kecepatan fluida.

Pada simulasi menggunakan ANSYS *Fluent* 17.2, diperlukan beberapa parameter agar simulasi dapat dijalankan dan memberikan hasil yang digunakan sebagai validasi data eksperimen. Namun, semua data *inlet* yang dimasukkan pada ANSYS *Fluent* 17.2 merupakan data yang didapat dari jurnal, perhitungan, maupun data eksperimen itu sendiri.

Data viskositas yang digunakan merupakan data yang didapat dari jurnal [8], sedangkan nilai massa jenis dan nilai konduktivitas termal [7] dari TPU didapat dari *datasheet* produk suatu perusahaan. Walaupun pada jurnal juga menggunakan material *Thermoplastic Polyurethane* (TPU), namun tidak diberitahu sumber produsen/perusahaan yang memproduksi material tersebut. Setiap perusahaan memiliki perbandingan komposisi penyusun yang berbeda-beda walaupun dapat diasumsikan bahwa sifat material yang akan ditunjukkan memiliki nilai yang mirip. Pengujian nilai viskositas, massa jenis, dan konduktivitas termal material sulit dilakukan karena keterbatasan alat uji yang ada di Indonesia (sulit menemukan tempat yang dapat menguji parameter tersebut pada saat kondisi material cair pada suhu 190 °C).

Pressure inlet hanya mengacu pada *datasheet* dari *stepper motor* yang digunakan [9]. Grafik pada Gambar 3.26 menunjukkan nilai perbandingan antara *torque* dengan PPS (kecepatan motor) yang kurang detail. Padahal, kenaikan putaran motor hanya sebesar 0,5 saja setiap percobaan. Hal ini menyebabkan *pressure inlet* diasumsikan sama pada setiap putaran motor. Pada kenyataannya, setiap kenaikan rpm akan membuat nilai *pressure inlet* juga berubah akibat perubahan nilai *torque*. Nilai *pressure inlet* hanya mengandalkan data dari *datasheet* akibat keterbatasan alat untuk mengukur nilai *torque* aktual.

Pengukuran nilai *velocity inlet* juga hanya berdasarkan dari putaran motor yang dikonversi menjadi kecepatan linear karena keterbatasan alat. Padahal, mungkin saja nilai *velocity inlet* tidak benar-benar sesuai dengan putaran motor akibat adanya slip antara *motor stepper* dengan filamen TPU. Selain itu, terdapat jarak dari *motor stepper* menuju *nozzle* sehingga terjadi *pressure drop* [10]. Hal ini membuat pengaturan *properties, boundary condition*, dan parameter pada simulasi tidak benar-benar sesuai dengan kondisi pada saat eksperimen.



Gambar 11. Perbandingan Data Eksperimen dengan Simulasi (a) $\alpha = 0$, (b) $\alpha = 1000$

4. Simpulan dan Saran

Berdasarkan penelitian dan analisis data hasil uji eksperimen dan simulasi, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- a. Berdasarkan hasil eksperimen, temperatur *heater* sebesar 260 °C merupakan temperatur yang ideal untuk *print* menggunakan material TPU pada *3D Printer* karena aliran debit yang dihasilkan dapat mencapai jangkauan maksimum hingga 10 mm³.s⁻¹ yang dibutuhkan *software* Repetier.
- b. Semakin tinggi temperatur dan gaya yang diberikan pada fluida TPU, viskositas fluida TPU semakin rendah (cair) yang dibuktikan dengan penurunan peningkatan debit setiap terjadi kenaikan kecepatan putaran motor.
- c. Perbedaan gaya dorong dari *stepper motor* yang tidak terlalu besar pada setiap putaran motor membuat perbedaan nilai viskositas antar percobaan tidak signifikan.
- d. Terjadi kehilangan panas dari *heater* menuju *inlet* akibat perpindahan panas antara fluida, dinding *nozzle*, dan lingkungan yang dibuktikan dengan terjadinya perbedaan temperatur 10 °C – 20 °C pada bagian *inlet* antara data pengukuran termokopel dengan temperatur *heater*.
- e. Debit *outlet* cenderung tidak stabil disebabkan *heater* yang tidak mampu menjaga temperatur fluida tetap stabil.
- f. *Stepper motor* yang digunakan tidak memiliki gaya dorong cukup kuat untuk mendorong filamen sehingga terjadi selip pada material saat putaran motor tinggi.
- g. Simulasi menggunakan ANSYS *Fluent* 17.2 belum dapat berjalan maksimal diakibatkan nilai *properties* material dan *boundary condition* yang tidak sepenuhnya dihitung, melainkan menggunakan data dari jurnal.

Pada penelitian dan analisis data hasil uji eksperimen dan simulasi ini, masih terdapat banyak kekurangan. Oleh karena itu, terdapat beberapa saran untuk pengembangan dari penelitian itu, yaitu:

- a. Melakukan pengukuran *velocity inlet* dan *pressure inlet* menggunakan alat pengukur kecepatan dan tekanan sehingga diketahui nilai pasti dari parameter tersebut.
- b. Pengukuran *velocity outlet* menggunakan alat pengukur kecepatan agar diketahui nilai sebenarnya.
- c. Menggunakan *motor stepper* dengan *torque* yang lebih besar agar mengurangi kemungkinan selip pada filamen.
- d. Termokopel ditempelkan secara permanen pada bagian *inlet* dan *outlet nozzle* agar mengurangi faktor *human error*.

- e. Melakukan pengujian viskositas, massa jenis, konduktivitas material, dan *activation energy* agar nilai yang dimasukkan pada *software* simulasi lebih akurat.

Daftar Pustaka

- [1] Mikołajewska, E., Macko, M., Ziarniecki, Ł., Stańczak, S., Kawalec, P., dan Mikołajewski, D., (2014): *3D Printing Technologies in Rehabilitation Engineering*, License Open Journal Systems of Radom University, Vol. 4 no. 12 hal. 78–83, Polandia.
- [2] Conner, B. P., dkk., (2014): *Making Sense of 3-D Printing : Creating a Map of Additive Manufacturing Products and Services*, ADDMA Vol. 9, AS.
- [3] Alves, P., Coelho, J. F. J., Haack, J., Rota, A., Bruinink, A., Gil, M. H., (2009): *Surface Modification and Characterization of Thermoplastic Polyurethane*, European Polymer Journal, Portugal.
- [4] Barnes, H. A., J. F. Hutton, dan K. Walters, (2001): *An Introduction to Rheology*, 6th Edition, Elsevier, Belanda.
- [5] [Online] *Thermal Properties of Metals, Conductivity, Thermal Expansion, Specific Heat*, Engineers Edge, LCC, diakses 25 Januari 2019 (https://www.engineersedge.com/properties_of_metals.htm).
- [6] [Online] AVALON® 70 AE, Huntsman Internasional LCC, diakses 19 Januari 2019 (<http://www.huntsman-tpu.com/catalog/product/view/id/169/>).
- [7] [Online] Drobny, J. G., (2008): *Thermoplastic Polyurethane Elastomers - Elastollan® - Material Properties*, BASF, Jerman, diakses 20 Januari 2019 (http://www.polyurethanes.basf.de/pu/solutions/elastollan/en/function/conversions/publish/content/group/Arbeitsgebiete_und_Produkte/Thermoplastische_Spezialelastomere/Infomaterial/elastollan_material_uk.pdf).
- [8] Lu, Q. W., Macosko, C. W., (2004): *Comparing the Compatibility of Various Functionalized Polypropylenes with Thermoplastic Polyurethane (TPU)*, Polymer, Vol. 45 hal. 1981-1991, AS.
- [9] [Online] *High Torque Hybrid Stepping Motor Specifications (Model SY42STH38-1684A)*, Changzhou Songyang Machinery & Electronics, Tiongkok, diakses 1 Februari 2019 (<https://www.pololu.com/file/0J715/SY42STH38-1684A.pdf>).
- [10] Ramanath, H. S., Chua, C. K., Leong, K. F., Shah, K.D., (2008): *Melt Flow Behaviour of Poly-ε-caprolactone in Fused Deposition Modelling*, Journal of Material Science: Materials in Medicine Vol. 19 hal. 2541-2550, Eropa.