

Analisis Laju Aliran Material *Hot Melt Adhesive* (HMA) pada Bagian *Nozzle 3D Printer*

Stefanus Julius Junaedi, Filian Arbiyani, and Marten Darmawan[†]
Program Studi SI Teknik Mesin Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya

Abstrak—Penggunaan *3D Printer* bukanlah hal yang tabuh lagi di era modernisasi ini. Berkembangnya teknologi *3D Printer* yang didasari oleh *additive manufacturing* ini tidak luput dari pengembangan yang dilakukan dari segi material pembentuk produk. Pengembangan terkait penggunaan *soft material* banyak dilakukan dalam satu dekade terakhir ini dikarenakan karakteristik dari *soft material* yang cukup unik. Istilah *Non Newtonian* selalu melekat pada karakteristik dari *soft material* ini. Material *Hot Melt Adhesive (HMA)* tergolong pada material yang lunak dan cenderung mudah dibentuk dan diasuksikan dapat mewakili pengembangan dari *soft material* yang sudah ada, dan didasari oleh kemiripan sifat material dengan *soft material*. Penelitian dilakukan dengan melakukan metode secara Simulasi maupun secara eksperimen dengan melakukan variasi terhadap laju aliran dan temperatur pemanasan terhadap material uji. Penelitian sifat laju aliran secara Simulasi dilakukan dengan menggunakan program ANSYS dengan metode *Computational Fluid Dynamics (CFD)*. Tahapan Komparasi laju aliran dilakukan dengan cara melakukan percobaan secara eksperimen terhadap variasi yang diberikan, dan hal ini bertujuan untuk membandingkan antara hasil simulasi dengan hasil eksperimen. Kesalahan terhadap Simulasi yang tidak melebihi 10% , maka Simulasi dapat diterima dan dapat diimplementasikan pada pengoperasian *3D Printer*.

Kata kunci—*Additive manufacturing, Soft material, Hot Melt Adhesive, ANSYS, CFD.*

I. PENDAHULUAN

PENGGUNAAN *3D printer* semakin bertambah pesat dengan tujuan membantu pekerjaan manusia, terlebih dalam bidang pembuatan atau pewujudnya suatu rancang bangun dari suatu desain. Penggunaan *3D Printer* banyak digunakan dalam dunia robotika, medis, otomotif dan masih banyak lainnya [1]. Pada umumnya, *3D Printer* digunakan untuk membuat suatu benda yang cenderung berbentuk *solid*, dengan tekstur yang keras. Material yang pada umumnya digunakan adalah *Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)* dan *Polyactic Acid* atau biasa disebut *Polyactide (PLA)*, dan material tersebut tergolong dalam golongan *hard material* [2].

Dalam beberapa dekade terakhir, banyak dilakukan pengembangan mengenai *soft material* dalam dunia industri maupun dunia medis [3]. Tujuan dilakukannya pengembangan *3D Printer* dengan menggunakan *soft material* adalah untuk mendapatkan hasil jadi yang lunak. Mengingat pentingnya rheology dalam suatu aliran *soft material*, maka dari itu perlu dilakukan pembelajaran mengenai rheology. Rheology banyak membicarakan mengenai deformasi serta aliran dari material *non Newtonian* [4]. HMA dapat dikategorikan sebagai bagian

dari rheology, namun tidak sepenuhnya. HMA dapat digolongkan sebagai aliran *non Newtonian* pada saat berubah menjadi fasa liquid.

HMA bukan suatu material yang dapat digolongkan dalam klasifikasi *soft material*, namun karakteristik dari HMA tidak jauh berbeda dari *soft material*. *Soft material* merupakan suatu material yang cenderung sulit mengeras atau lunak setelah diberi perlakuan berupa panas maupun gaya. Hal itu pula yang terjadi pada HMA pada saat sudah berubah menjadi *liquid*, namun waktu pengerasan dari HMA cenderung lebih cepat dari *soft material* pada umumnya. Oleh karena itu, material HMA dipilih sebagai material yang akan digunakan untuk penelitian dengan tujuan mengetahui karakteristik dari HMA yang kemudian dapat digunakan untuk mewakili sifat dari *soft material*.

Laju aliran dalam suatu sistem *3D Printer* penting diperhatikan terkait dengan kualitas produk yang dihasilkan. Laju aliran akan sangat berpengaruh terhadap kestabilan dari sistem, dan kestabilan lah yang akan mempengaruhi kualitas produk yang dihasilkan. Pada umumnya, bahan baku berupa *soft material* akan mengalir dengan cepat apabila sudah menjadi *liquid*, dan material akan menghasilkan hasil jadi yang tidak bagus jika laju aliran dari material terlalu cepat. Ketika Laju aliran dari material terlalu cepat, maka material yang berada dalam fasa *liquid* akan saling tumpang tindih dan akan melembak. Sebaliknya, ketika laju aliran terlalu rendah maka keluaran yang dihasilkan akan menjadi tidak stabil, dan akan menjadi tidak kontinu [5]. Maka dari itu, analisis laju aliran merupakan salah satu fokus dalam suatu mekanisme *3D Printer*.

Pentingnya analisis laju aliran HMA yang dapat dijadikan acuan untuk mengetahui fenomena laju aliran yang terjadi serta meningkatkan kestabilan proses *printing* yang memiliki implikasi langsung terhadap hasil jadi dari HMA, dan dilakukan menggunakan analisis Simulasi berbasis *CFD (Computational Fluid Dynamic)*. Fenomena laju aliran yang ingin diketahui adalah pengaruh laju aliran yang dihasilkan terhadap temperatur pemanasan dan kecepatan putar motor, dan perlu dianalisis apakah data yang dihasilkan bersifat fluktuatif atau stabil serta terdapat *trend* (pola) atau tidak pada data yang dihasilkan. Secara keseluruhan, analisis laju aliran HMA pada sistem *3D Printer* akan lebih akurat apabila dilakukan tidak hanya secara pengamatan terhadap metode eksperimen saja, melainkan juga dengan metode Simulasi. Metode Simulasi yang dilakukan berupa analisis Simulasi berbasis *CFD*. Program Simulasi yang paling mendukung ketentuan yang dibutuhkan adalah program ANSYS berbasis *Fluent* yang diperuntukkan secara khusus pada fluida.

[†]Corresponding author: Marten Darmawan (e-mail: marten.darmawan@atmajaya.ac.id).

Manuscript received August 1, 2019; revised September 1, 2019.

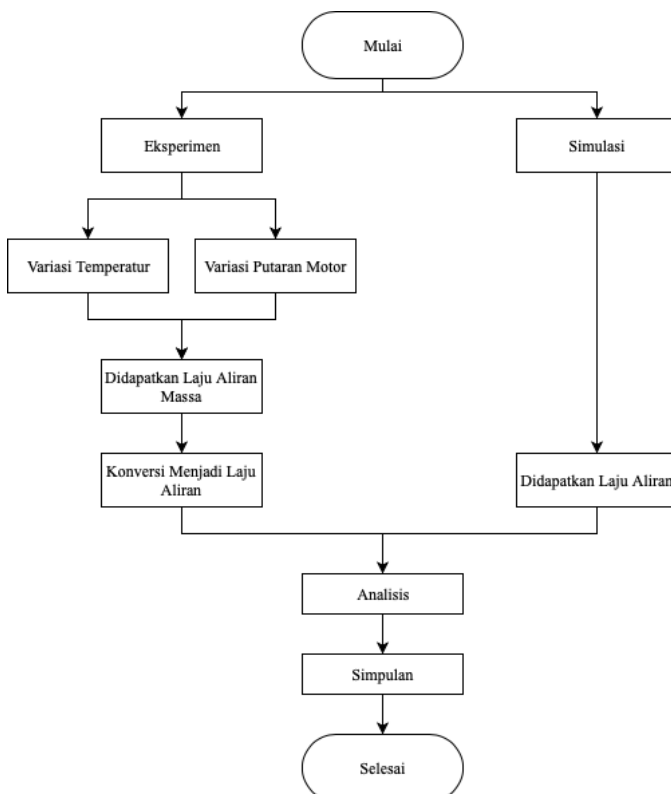
II. METODE PENELITIAN DAN DESAIN EKSPERIMEN

Penelitian dilakukan dengan fokus terhadap laju aliran dari material yang digunakan pada saat kondisi sudah berubah menjadi liquid. Analisis dilakukan terhadap laju aliran HMA, dengan memperhatikan laju aliran pada bagian inlet nozzle serta temperatur pemanasan pada extruder yang digunakan pada rancang bangun extruder yang dibuat. Simulasi akan dilakukan sebagai bentuk analisis, dan akan dilakukan dengan menggunakan ANSYS Fluent CFD. Metode yang digunakan pada penulisan laporan tugas akhir ini adalah metode analisis dengan melakukan eksperimen dan simulasi untuk mengetahui laju aliran HMA dan membandingkan kualitas produk pada setiap variasi nya serta membandingkan hasil eksperimen dengan hasil simulasi.

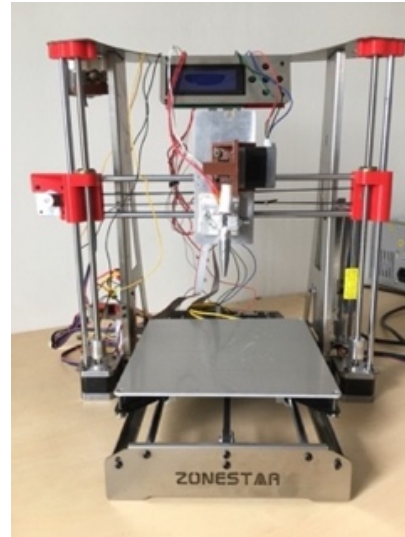
Berdasarkan diagram alir yang tertera pada Gambar. 1., maka akan diawali dengan pembahasan metodologi penelitian terhadap studi literatur, diikuti dengan pembahasan metodologi secara simulasi, dan pembahasan metodologi secara eksperimen.

A. Eksperimen

Metode eksperimen merupakan metode yang dilakukan dengan mengimplementasikan pengaturan pada simulasi terhadap eksperimen. Metode eksperimen dilakukan sebagai komparasi dari hasil simulasi yang dilakukan serta mengukur data yang diperlukan sebagai parameter *input* pada simulasi. Tidak seluruh data hasil pengukuran yang dibutuhkan dapat langsung didapatkan melalui percobaan secara eksperimen, maka dari itu diperlukan proses konversi dengan melakukan perhitungan.



Gambar. 1: Diagram Alir Metodologi Penelitian



Gambar. 2: Model 3D Printer

Sistem akan berjalan secara vertikal seperti mekanisme kerja *3D Printer* pada umumnya, maka dari itu pada simulasi menggunakan fungsi gravitasi dan model *3D Printer* yang digunakan dapat dilihat pada Gambar. 2 *Nozzle* yang digunakan adalah *nozzle glue gun* dengan bentuk yang digunakan pada umumnya. Pemanas yang digunakan merupakan pemanas yang digunakan pada *glue gun* dengan daya pemanas sebesar 20 Watt. Motor yang digunakan adalah *stepper motor*, dan digunakan sebagai penggerak serta pendorong material yang digunakan.

Pada metode eksperimen dilakukan variasi terhadap laju aliran dan temperatur pemanasan. Hal ini dikarenakan metode eksperimen dilakukan untuk mencari data sebagai parameter *input* serta komparasi dari hasil simulasi. Eksperimen yang dilakukan meliputi pengukuran data serta mempelajari sifat material terkait ilmu mekanika fluida yang digunakan, pengukuran geometri dari *nozzle* yang akan digunakan, serta menghitung segala data yang diperlukan sebagai parameter *input* maupun variasi pada simulasi.

Metode eksperimen dilakukan dengan tujuan sebagai komparasi hasil simulasi yang dilakukan. Hasil yang diperoleh melalui metode eksperimen ini berupa laju aliran massa, tentu dengan dilakukan pengolahan data terlebih dahulu. Pada metode eksperimen dilakukan variasi terhadap beberapa parameter, yaitu variasi laju aliran *inlet* dan variasi temperatur. Variasi laju aliran *inlet* didasari oleh variasi kecepatan putar motor dengan variasi putaran yang diberikan adalah 3,75 rpm, 4 rpm, 5 rpm, 6 rpm, dan 7 rpm. Variasi temperatur yang dilakukan adalah 180°C, 190°C, dan 200°C.

B. Pengambilan Data

Pada tahap ini dilakukan pengukuran terkait penentuan nilai viskositas dari material *HMA*, pengukuran laju aliran *inlet*, laju aliran massa, tekanan pada bagian *inlet*, temperatur, dan massa jenis material. Beberapa pengukuran dilakukan secara eksperimen dengan mengoperasikan *3D Printer*. Metode eksperimen ini akan berfokus pada perolehan data laju aliran secara

eksperimen. Pengukuran data laju aliran massa dilakukan menggunakan timbangan serta *stopwatch*, dan dapat dilihat pada Gambar. 3.

Pengambilan data laju aliran massa dilakukan dengan menggerakkan motor pendorong menggunakan program *Arduino*, dan *input* berupa variasi kecepatan putar motor dalam bentuk rpm. Motor digunakan sebagai pendorong atau sebagai alat untuk menginjeksi material *HMA*. Pengambilan data dilakukan sebanyak 15 kali, yang terdiri dari 3 variasi temperatur dengan masing-masing terdapat 5 variasi putaran. Dari 15 variasi, pengambilan data dilakukan setiap 20 detik dan diambil sebanyak 2 data setiap variasi. Pengambilan data dimulai setelah 20 detik pertama dan akan berlangsung hingga 120 detik. Berdasarkan pengambilan data, data yang digunakan hanya sebanyak 2 data karena kondisi akan stabil setelah 20 detik sejak pertama kali motor berputar dan akan berkurang kestabilannya saat menjelang detik ke 100. Hal ini dikarenakan material yang digunakan akan habis setelah 120 detik, maka dari itu kestabilan akan menurun sejak detik ke 100. Pengambilan data laju aliran massa dilakukan secara vertikal menggunakan timbangan dan *stopwatch* (Gambar. 4). Timbangan tentu dikalibrasi terlebih dahulu sebelum digunakan untuk mengukur massa saat pengukuran. Kalibrasi dilakukan dengan cara meletakkan massa acuan di atas timbangan dan menyamakan nominal massa yang tertera pada timbangan dengan massa acuan.

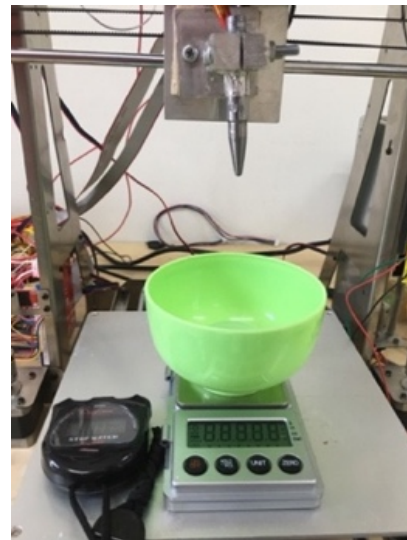
Dari hasil pengambilan data, maka akan diketahui data massa dan waktu proses. Kemudian data akan diproses menjadi laju aliran massa dengan melakukan perhitungan. Dari data laju aliran massa kemudian akan dicari data laju aliran *outlet* dengan dilakukan perhitungan pula untuk mengetahui nilai laju aliran volumetrik nilai laju aliran *outlet*.

C. Simulasi

Metode simulasi dilakukan dengan melakukan variasi terhadap laju aliran pada bagian *inlet nozzle* serta variasi temperatur pemanasan pada *extruder* yang juga berpengaruh terhadap laju aliran material yang digunakan. Variasi laju aliran pada bagian *inlet* dapat dikonversikan sebagai gaya atau tekanan yang diberikan pada bagian *inlet* sehingga dapat digunakan sebagai *input* pada simulasi. Variasi temperatur pemanasan akan diaplikasikan terhadap keseluruhan bagian *nozzle*. Sim-



Gambar. 3: Alat Pengukuran (a) Timbangan (b) *Stopwatch*



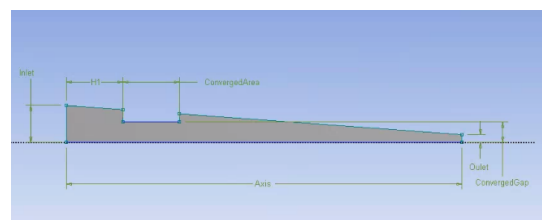
Gambar. 4: Mekanisme pengambilan data laju aliran massa

ulasi akan dilakukan dengan asumsi aliran bagian *inlet* pada *nozzle* adalah bersifat *laminar* dan dipengaruhi oleh perlakuan panas.

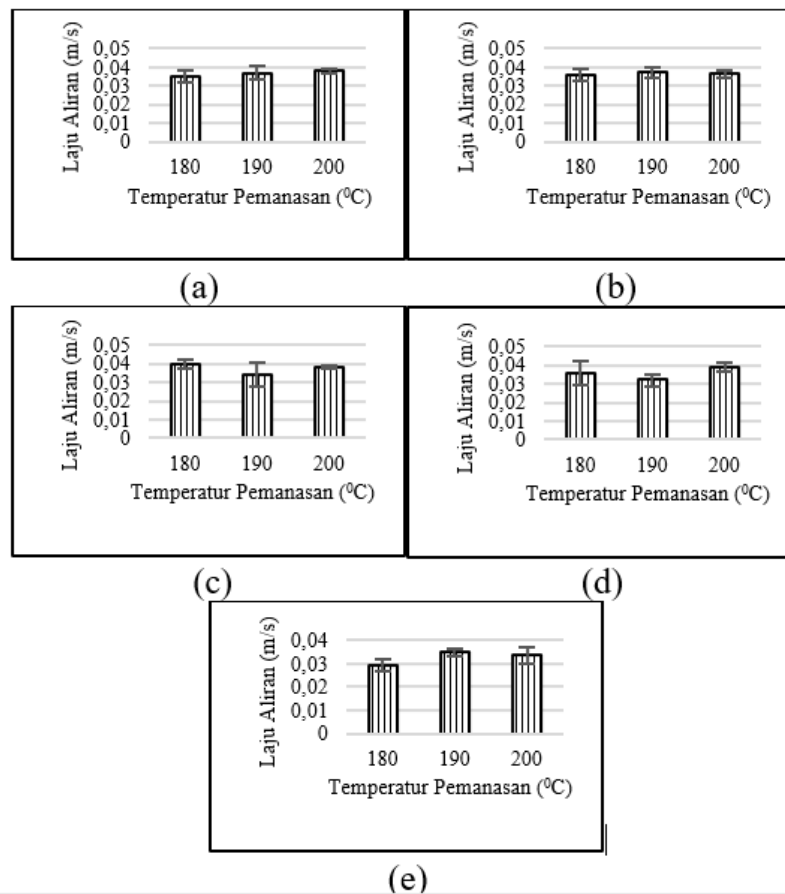
Secara keseluruhan, simulasi yang dilakukan akan berfokus pada laju aliran material *HMA* untuk menemukan hasil yang sesuai, dan akan menghasilkan hasil jadi dengan kualitas yang baik. Simulasi akan dinyatakan berhasil apabila faktor kesalahan pada hasil simulasi tidak lebih dari 10% hasil Komparasi yang ada. Pada penelitian ini, dilakukan simulasi dengan menggunakan *ANSYS Fluent CFD*. Metode simulasi ini terdiri dari beberapa tahapan untuk bisa menemukan hasil yang diinginkan, diantaranya adalah pembuatan model, pembuatan *meshing*, pengaturan parameter *input*, serta iterasi. Setelah empat proses tersebut sudah dilakukan, maka hasil akan terlihat pada program.

Dalam melakukan simulasi sangat penting untuk membuat domain guna mengetahui area yang akan dianalisis. Domain dibuat berdasarkan spesifikasi geometri benda yang digunakan pada eksperimen, maka dari itu pengukuran terhadap *nozzle* yang digunakan pada eksperimen. Dari spesifikasi ukuran *nozzle* berdasarkan pengukuran yang dilakukan, kemudian dibuat model pada *DesignModeler*. Terlihat pada Gambar 5, geometri dari desain yang digunakan sebagai *domain* simulasi.

Simulasi ini dilakukan dengan menggunakan tipe analisis berupa 2 dimensi dengan model *axisymmetric*. Maka dari itu, model yang dibuat hanya setengah bagian dari geometri *nozzle* yang akan dianalisa. Berikut adalah ukuran dari model yang



Gambar. 5: Model nozzle



Gambar. 6: Grafik Pengaruh Temperatur Pemanasan Terhadap Laju Aliran pada Metode Eksperimen (a) 3,75 rpm (b) 4 rpm (c) 5 rpm (d) 6 rpm (e) 7 rpm

dibuat.

- *Inlet* : 3,575 mm.
- *Outlet* : 0,75 mm.
- *Axis* : 38,5 mm.
- *Converged Area* : 5,5 mm.
- *H1* : 5,5 mm.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

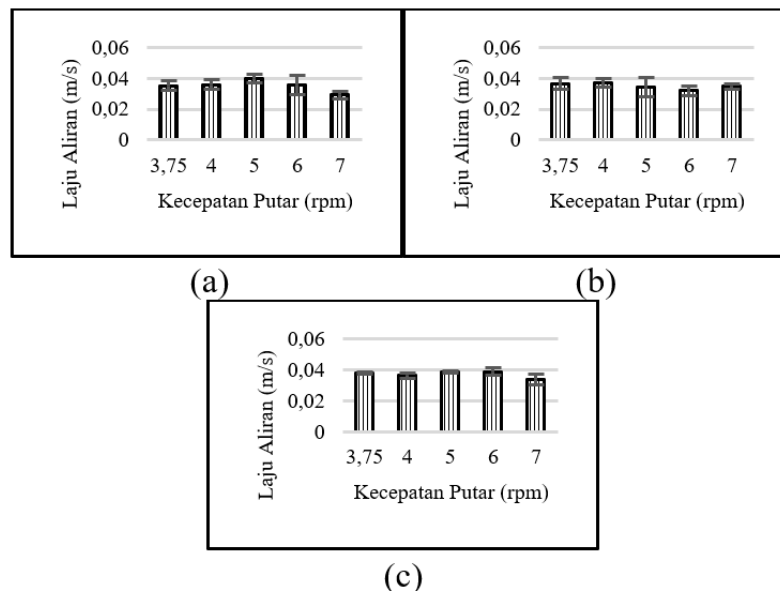
Setiap metode percobaan yang dilakukan tentu didapatkan hasil dari masing-masing metode. Percobaan dengan metode eksperimen didapat beberapa hasil percobaan yang kemudian dapat digunakan sebagai parameter *input* pada simulasi dan sebagai Komparasi dari hasil simulasi. Data untuk Komparasi didapat berdasarkan konversi yang dilakukan dalam bentuk perhitungan. Hasil dari metode eksperimen secara keseluruhan berupa angka yang kemudian dibandingkan terhadap hasil simulasi. Berdasarkan metode Simulasi, didapat hasil berupa data berupa angka dan profil dari tekanan, temperatur, laju aliran, dan banyak lainnya. Hasil dapat ditampilkan dalam bentuk grafik, kontur, maupun vektor. Seluruh prosedur yang dilakukan untuk memperoleh hasil telah dijelaskan pada Bab 3. Maka dari itu, pada penulisan Bab 4 ini hasil membahas mengenai hasil dari metode yang dilakukan serta analisis terhadap hasil yang didapatkan. Berikut adalah penjabaran

serta pembahasan mengenai hasil dari metode eksperimen dan metode simulasi yang dilakukan.

A. Eksperimen

Percobaan secara eksperimen dilakukan untuk melakukan komparasi terhadap hasil simulasi yang dibuat. Perhitungan pada metode eksperimen terbagi atas 2 bagian, yaitu terhadap bagian *inlet* dan terhadap bagian *outlet*. Perhitungan terhadap bagian *inlet* hanya berupa laju aliran pada bagian *inlet* saja, sedangkan perhitungan terhadap bagian *outlet* berupa laju aliran massa, laju aliran volumetrik, dan laju aliran. Perhitungan terhadap bagian *inlet* didasarkan pada data kecepatan putar motor yang divariasikan, sedangkan perhitungan terhadap *outlet* berdasarkan hasil yang dihasilkan pada percobaan eksperimen yang dilakukan, yaitu berupa massa dan waktu. Hasil dalam bentuk simulasi akan dilampirkan pada bagian lampiran.

1) **Pengaruh temperatur pemanasan terhadap laju aliran pada metode eksperimen:** Eksperimen dilakukan dengan melakukan variasi temperatur terlebih dahulu. Hal ini dikarenakan viskositas jelas akan berubah seiring dengan perubahan temperatur pemanasan. Dengan kata lain, laju aliran juga akan berubah seiring dengan perubahan temperatur pemanasan. Maka dari itu, variasi temperatur dilakukan guna mengetahui pengaruh temperatur pemanasan terhadap laju aliran material



Gambar. 7: Grafik Pengaruh Kecepatan Putar Motor Terhadap Laju Aliran pada Metode Eksperimen (a) 180° C (b) 190° C (c) 200° C

HMA. Terdapat 3 variasi temperatur, yaitu 180°C, 190°C, dan 200°C.

Berdasarkan Gambar. 6, terlihat bahwa peran temperatur pemanasan pada metode eksperimen mempengaruhi laju aliran, dan hal ini terlihat dari data yang cukup fluktuatif. *Trend* atau pola dari pengaruh temperatur pemanasan terlihat jelas pada putaran rendah, yaitu pada putaran 3,75 rpm. Seiring dengan kenaikan temperatur pemanasan, maka viskositas akan semakin turun maka laju aliran akan meningkat. Hal ini lah yang terjadi pada putaran 3,75 rpm, namun tidak pada putaran lain. Semakin tinggi putaran motor, maka sistem akan semakin tidak stabil karena ada nya *slip* yang semakin besar seiring dengan kenaikan putaran motor. Namun secara keseluruhan, seiring dengan kenaikan temperatur pemanasan maka laju aliran akan semakin tinggi, dan hal ini terjadi pada kondisi putaran yang paling stabil, yaitu putaran 3,75 rpm.

2) **Pengaruh Kecepatan Putar Motor Terhadap Laju Aliran pada Metode Eksperimen:** Eksperimen kemudian dilanjutkan dengan melakukan variasi terhadap kecepatan putar motor. Hal ini dilakukan guna mengetahui pengaruh laju aliran pada bagian *outlet* terhadap kenaikan laju aliran pada bagian *inlet* yang diwakili oleh kecepatan putar motor. Pada fluida cair yang mengalir dalam *nozzle*, semakin cepat laju aliran *inlet* maka akan semakin cepat pula laju aliran pada bagian *outlet*. Hal yang demikian lah yang mendasari pemberian variasi kecepatan putar motor. Variasi kecepatan putar motor yang diberikan adalah 3,75 rpm, 4 rpm, 5 rpm, 6 rpm, dan 7 rpm.

Semakin tinggi kecepatan putar motor, maka semakin tinggi pula laju aliran yang dihasilkan. Hal ini hanya terlihat pada kondisi temperatur 180°C saja dan tidak terjadi peningkatan laju aliran yang terus menerus. Semakin tinggi temperatur pemanasan maka laju pengerasan akan semakin lambat, sehingga laju aliran cepat dan semakin sulit dikontrol. Maka dari itu *trend* atau pola hanya terlihat pada temperatur rendah, yaitu temperatur 180°C. Pada sisi lain, seiring dengan kenaikan

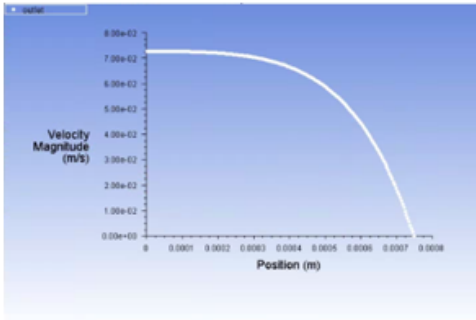
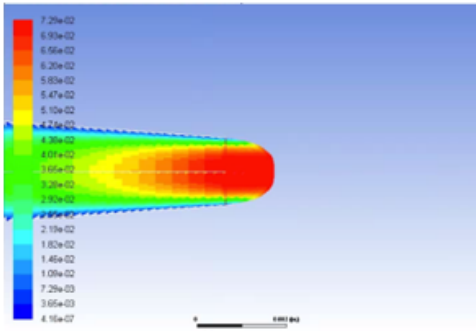
putaran motor maka *slip* yang terjadi akan semakin besar. Maka dari itu terlihat bahwa data yang didapat serupa dengan grafik parabola yang menunjukkan ada nya titik puncak. Titik puncak tersebut adalah titik atau putaran maksimum yang dapat menghasilkan kestabilan yang baik terhadap laju aliran yang dihasilkan, dan hal ini dapat dilihat pada Gambar. 7.

B. Simulasi

Berdasarkan metode simulasi yang dilakukan, didapat hasil berupa *mesh* dan hasil simulasi secara keseluruhan. Hasil simulasi pada program ANSYS dapat disajikan dalam bentuk kontur, vektor, maupun grafik. Hasil secara keseluruhan akan terlihat lebih jelas apabila disajikan dalam bentuk kontur, namun profil aliran akan terlihat jelas apabila disajikan dalam bentuk vektor maupun grafik. Maka dari itu, data dari hasil simulasi yang dibandingkan dengan data hasil eksperimen merupakan laju aliran rata-rata. Simulasi dilakukan dengan 15 kali pengulangan yang meliputi 3 variasi temperatur dengan masing-masing diberi 5 variasi kecepatan putar motor untuk merepresentasikan laju aliran pada bagian *inlet*. Hasil dari simulasi dicatat dan dibandingkan dengan hasil eksperimen disajikan dalam bentuk grafik sebagai komparasi antara hasil simulasi dengan hasil eksperimen.

Pada Gambar. 8. bagian (a) terlihat bahwa profil laju aliran pada bagian *outlet* telah mencapai *fully developed*, dan hal ini didukung oleh data grafik laju aliran yang diperlihatkan pada Gambar. 8. bagian (b). Pada grafik laju aliran diatas, terlihat bahwa bentuk grafik adalah setengah parabola karena simulasi yang dilakukan menggunakan metode *axisymmetric* yang berarti titik 0 berada di sumbu X. Dengan melihat profil laju aliran dari hasil simulasi yang menunjukkan bahwa aliran bersifat *laminar*, maka dapat dikatakan bahwa laju aliran maksimum merupakan 2 kali laju aliran rata-rata [6].

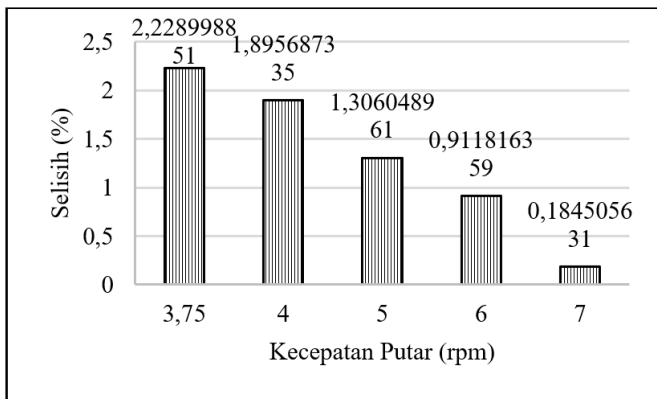
1) **Hasil meshing:** Jumlah *mesh* akan sangat mempengaruhi hasil simulasi. Jumlah *mesh* yang dibuat akan menen-



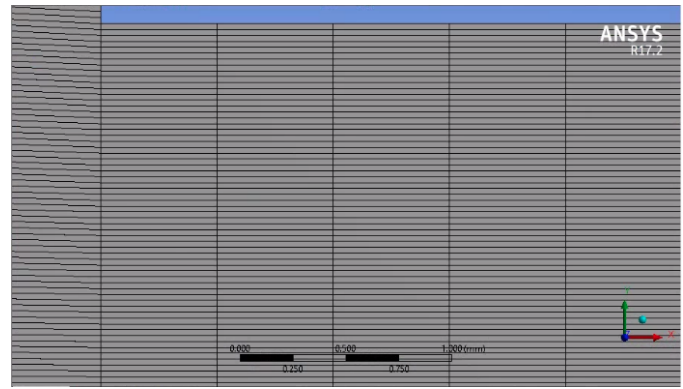
Gambar. 8: (a) Profil Laju Aliran pada Bagian Outlet (b) Grafik Laju Aliran pada Bagian Outlet

tukan ketelitian dari hasil simulasi yang dihasilkan. Semakin banyak jumlah *mesh* yang dibuat, maka hasil simulasi akan semakin teliti. Secara keseluruhan, pembagian jumlah divisi pada *mesh* variasi 2 merupakan 3 kali dari jumlah divisi yang ditetapkan pada *mesh* variasi 1, dan hasil simulasi berdasarkan variasi tersebut tentu berbeda.

Berdasarkan hasil simulasi dengan 2 variasi jumlah *mesh*, beda nilai laju aliran antar hasil simulasi yang dihasilkan adalah sebesar 0,00091761 m/s dengan selisih *error* sekitar 2,23% . Besar selisih *error* yang dihasilkan sangat jelas memperlihatkan bahwa penentuan jumlah *mesh* sangat berpengaruh



Gambar. 9: Grafik Selisih Error Hasil Laju Aliran Terhadap Variasi Jumlah Mesh



Gambar. 10: Hasil meshing

terhadap hasil simulasi yang dihasilkan.

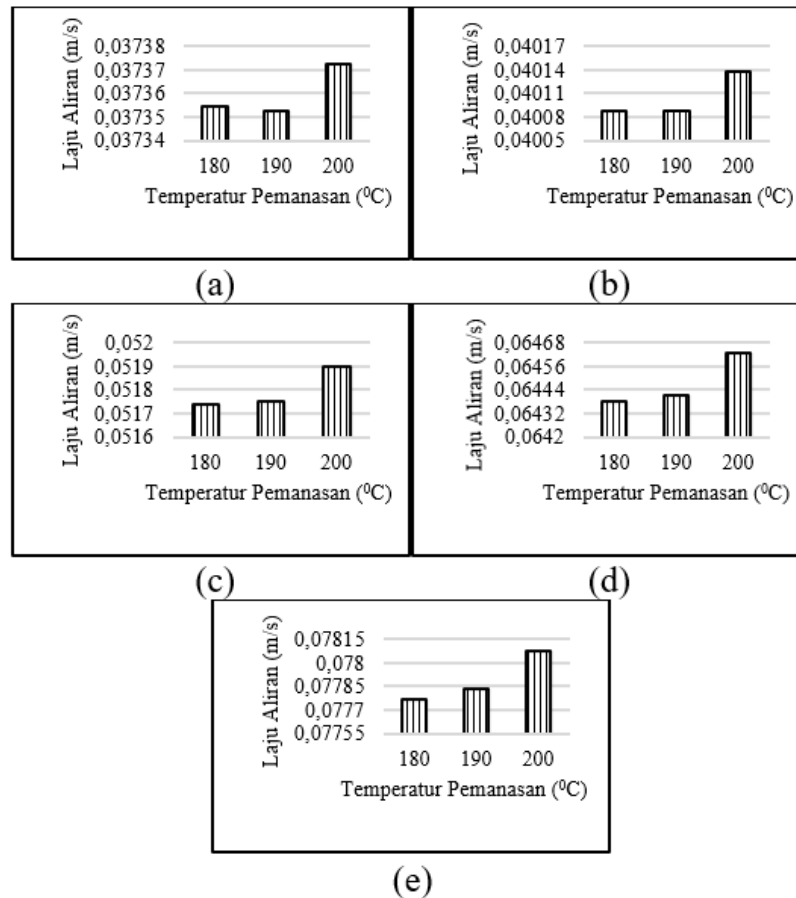
Melihat Gambar. 9, maka terbukti bahwa semakin besar jumlah *mesh* semakin teliti pula hasil simulasi yang dihasilkan. Dengan rata-rata selisih *error* sekitar 1,31% , maka dapat dinyatakan bahwa kenaikan jumlah *mesh* tentu berpengaruh pada hasil simulasi. Bentuk *mesh* dibuat menggunakan bentuk *quadrilateral* atau dapat dilihat dengan bentuk segi empat. Gambar. 10. merupakan bentuk *mesh* dengan hasil yang baik, dan digunakan untuk melakukan simulasi lebih lanjut. *Mesh* yang digunakan pada simulasi ini juga berdasarkan variasi yang memiliki jumlah *element* lebih banyak, yaitu dengan jumlah *element* sebanyak 6590 *elements* dan 6798 *nodes*.

2) **Pengaruh Temperatur Pemanasan Terhadap Laju Aliran pada Metode Simulasi:** Secara keseluruhan, variasi pada metode simulasi hanya mengacu atau memodelkan hal yang terjadi pada eksperimen ke dalam simulasi, khususnya pada bagian *nozzle*. Sama hal nya dengan eksperimen, pada simulasi juga dilakukan 3 variasi temperatur, yaitu 180°C, 190°C, dan 200°C. Hasil secara simulasi kemudian dijadikan pembandingan terhadap hasil eksperimen yang dilakukan.

Lain hal nya dengan hasil eksperimen, pada Gambar. 11. memperlihatkan bahwa hasil laju aliran pada metode simulasi secara keseluruhan menunjukkan peningkatan terhadap variasi temperatur pemanasan, namun tidak pada temperatur 190°C dengan putaran 3,75 dan 4 rpm. Kecil nya rentang antara temperatur *inlet* dan *outlet* pada temperatur 190°C yang memicu cepatnya laju pengerasan dan kecilnya laju aliran *inlet* pada putaran 3,75 dan 4 rpm mengakibatkan terjadinya penurunan laju aliran pada kondisi tersebut. Hal ini terjadi karena kondisi ideal yang terjadi pada simulasi sehingga hasil hanya akan dipengaruhi oleh parameter *input* yang digunakan saja.

3) **Pengaruh Kecepatan Putar Motor Terhadap Laju Aliran pada Metode Simulasi:** Variasi kecepatan putar motor pada simulasi sama dengan variasi kecepatan putar motor pada eksperimen, namun ada sedikit yang membedakan. Parameter *input* yang mewakili kecepatan putar motor adalah berupa perhitungan terhadap laju aliran *inlet* yang mengacu pada kecepatan putar motor. Variasi kecepatan putar motor yang diberikan adalah 3,75 rpm, 4 rpm, 5 rpm, 6 rpm, dan 7 rpm.

Pada Gambar. 12. terlihat bahwa terjadi peningkatan laju aliran terhadap kenaikan kecepatan putar motor secara keseluruhan. Hal ini selaras dengan persamaan laju aliran



Gambar. 11: Grafik Pengaruh Temperatur Pemanasan Terhadap Laju Aliran pada Metode Simulasi (a) 3,75 rpm (b) 4 rpm (c) 5 rpm (d) 6 rpm (e) 7 rpm

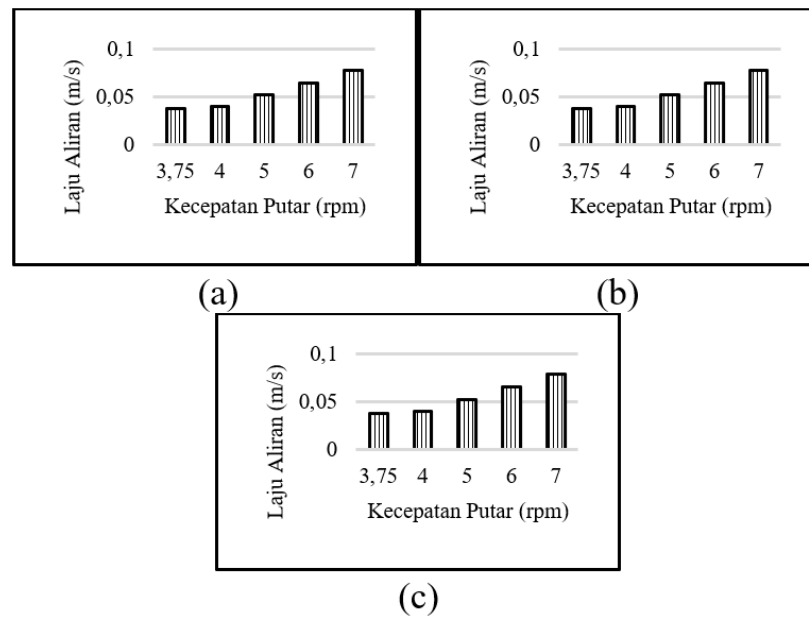
berdasarkan laju aliran volumetrik yang menyatakan bahwa semakin tinggi laju aliran volumetrik maka akan semakin tinggi pula laju aliran *outlet*. Dalam hal ini, laju aliran volumetrik dipengaruhi oleh laju aliran *inlet*, maka dari itu, laju aliran *inlet* juga mempengaruhi laju aliran *outlet*.

IV. KESIMPULAN

Pada metode eksperimen, laju aliran meningkat seiring dengan kenaikan temperatur pemanasan, dan hal ini hanya terjadi pada putaran rendah saja karena kestabilan proses pada putaran rendah lebih terjaga dibandingkan dengan putaran lainnya. Laju aliran secara eksperimen pada temperatur 180°C memiliki data yang lebih terkontrol, dan hal ini disertai dengan adanya *trend* yang menggambarkan pengaruh temperatur pemanasan terhadap laju aliran. Perubahan kecepatan putar motor berpengaruh terhadap laju aliran secara eksperimen, dan hal ini terlihat pada *trend* yang dihasilkan pada temperatur rendah, yaitu 180°C. Seiring dengan kenaikan kecepatan putar motor, maka akan laju aliran secara eksperimen semakin tidak stabil. Hal ini dibuktikan dengan turunnya laju aliran setelah putaran 5 rpm pada temperatur 180°C. Tidak terdapatnya *trend* terhadap pengaruh kecepatan putar motor pada temperatur 190°C dan 200°C karena laju pengerasan yang cenderung lambat sehingga laju aliran menjadi tidak dapat dikontrol.

Laju aliran berdasarkan hasil simulasi meningkat seiring dengan kenaikan kecepatan temperatur pemanasan karena kondisi *slip* yang tidak dapat didefinisikan pada simulasi serta kondisi simulasi yang ideal. Laju aliran berdasarkan hasil simulasi meningkat seiring dengan kenaikan kecepatan putar motor, namun tidak pada temperatur 190°C dengan putaran 3,75 rpm dan 4 rpm karena kecilnya gaya yang diterima oleh material serta laju pengerasan yang cenderung lebih cepat dari pada kondisi lainnya. Terdapat peningkatan perbedaan hasil laju aliran antara hasil eksperimen dengan hasil simulasi seiring dengan kenaikan kecepatan putar motor. Hal ini dikarenakan adanya *slip* antara *gear* motor dengan material *HMA* pada eksperimen. Terdapat perbedaan hasil laju aliran yang tidak konsisten antara hasil eksperimen dengan hasil simulasi seiring dengan kenaikan temperatur pemanasan karena tidak terdapat *tensioner* pada *extruder 3D Printer* dan temperatur ruangan yang berubah-ubah. Keterbatasan alat untuk pengujian viskositas membawa pada metode *trial and error* pada penentuan nilai k , n , dan *Activation Energy*.

Penggunaan *tensioner* diperlukan pada *holder* agar dapat menekan material secara sempurna, sehingga menghindari ketidakstabilan proses. Pengukuran laju aliran *inlet*, viskositas, k , n , dan *Activation Energy* diperlukan guna meningkatkan akurasi data yang digunakan. Kondisi termal pada ruang pengujian harus terjaga guna menjaga tingkat konsistensi nilai



Gambar. 12: Grafik Pengaruh Kecepatan Putar Motor Terhadap Laju Aliran pada Metode Simulasi (a) 180°C (b) 190°C (c) 200°C

temperatur pada proses pengambilan data. Ketersediaan alat yang perlu ditingkatkan terkait pengujian viskositas terhadap material uji untuk menghindari metode *trial and error*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] E. Mikołajewska, M. Macko, Ł. Ziarniecki, S. Stańczak, P. Kawalec and D. Mikołajewski (2014).
- [2] B. Tymrak, M. Kreiger and J. M. Pearce, *Materials & Design* **58**, 242 (2014).
- [3] H. Muroi, R. Hidema, J. Gong and H. Furukawa, *Journal of solid mechanics and materials engineering* **7**, 163 (2013).
- [4] H. A. Barnes, J. F. Hutton and K. Walters, *An introduction to rheology* (Elsevier, 1989).
- [5] B. Derby, *Annual Review of Materials Research* **40**, 395 (2010).
- [6] J. A. Schetz and A. E. Fuhs, *Fundamentals of fluid mechanics* (John Wiley & Sons, 1999).