

RESEARCH ARTICLE

Rancang Bangun Ekstruder Dan Pengendalian Motor stepper Dan Heater Pada Ekstruder Pada Massive 3D Printer Dengan Pelet Sampah Plastik

Ardis Firdais, Brahmantya Aji Pramudita* and Irham Mulkan Rodiana

Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom, Bandung, 40257, Jawa Barat, Indonesia

* Corresponding author: brahmantyaajip@telkomuniversity.ac.id

Received on 30 September 2023; accepted on 31 October 2023

Abstrak

Berdasarkan data Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK), Indonesia menghasilkan 67,8 juta ton sampah pada tahun 2020 dan pada catatan The National Plastik Action Partnership (NPAP) terdapat sekitar 4,8 juta ton per tahun sampah plastik di Indonesia tidak terkelola dengan baik. Dari permasalahan tersebut, mendaur ulang sampah plastik merupakan peran yang penting untuk mengurangi terjadinya pencemaran lingkungan. Dalam rangka mendaur ulang sampah plastik dibuatnya Rancang Bangun *Massive 3D Printer* menggunakan bahan material dari sampah plastik. Pembuatan produk dengan mesin 3D Printer menggunakan material plastik dengan jenis *Polyethylene* (PE). Pada penelitian ini, didapatkan nilai M307 H1 R1.140 K0.582:0.000 D11.11 E1.35 S1.00 B0 V23.7 dengan melakukan *auto-tuning* yang diperintahkan langsung melalui *Duet Web Control*. Penggunaan sistem kontrol PID untuk mengontrol temperatur hot end pada *Massive 3D Printer* mampu mengontrol suhu pada *hot end* dengan baik (tidak mengalami fluktuatif) dan berdampak kepada proses ekstrusi, sehingga dapat menghasilkan keluaran tinta yang tidak berongga dan hasil pencetakan memiliki kepadatan yang baik, didukung juga dengan suhu yang sesuai pada *heater*, yaitu 200 °C dan *feedrate motor stepper* yang *tepat*, yaitu 0,5 mm/s.

Key words: *Massive 3D Printer, 3D Printer Delta, Ekstruder*

Pendahuluan

Berdasarkan data Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK), Indonesia menghasilkan 67,8 juta ton sampah pada tahun 2020. Berdasarkan jenisnya, 17% sampah yang dihasilkan masyarakat berupa sampah plastik [1]. Banyaknya penggunaan plastik di kehidupan masyarakat tentu tidak bisa dipungkiri karena memang plastik begitu dibutuhkan.

Sementara di Indonesia, 9% dari sampah plastik mencemari saluran air dan laut. Penelitian baru yang diterbitkan dalam jurnal *Science* menyatakan bahwa 24 hingga 34 juta metrik ton polusi plastik saat ini memasuki lingkungan laut setiap tahun. Itu sekitar 11% dari total sampah plastik yang dihasilkan di seluruh dunia [4].

Sebagai manusia, tentunya penulis sendiri tidak menginginkan sampah plastik tertumpuk terus menerus begitu saja dan mencemari bumi ini hingga sudut-sudut tidak terduga. Oleh karena itu, mendaur ulang sampah plastik merupakan salah satu peran yang penting untuk mengurangi terjadinya pencemaran lingkungan. Berdasarkan permasalahan tersebut, tercetuslah ide untuk membuat Rancang Bangun *Massive 3D Printer*, dimana tinta 3D Printer berasal dari sampah plastik jenis *Polyethylene* (PE) yang akan diolah pada mesin shredder terlebih

dahulu. Nantinya produk yang dihasilkan berupa produk dekorasi, sehingga produk yang dihasilkan dari mendaur ulang sampah plastik ini dapat memiliki nilai guna dan jual yang tinggi.

Pada penyusunan Rancang Bangun *Massive 3D Printer* ini, penulis berfokus pada *ekstruder*. *Ekstruder* dikenal juga sebagai *print head*, bertugas untuk mengekstrusi butir sampah plastik hingga menjadi tinta *3D Printer* dan meletakkannya di *print bed*. Kestabilan keluaran dari *ekstruder* tentunya sangat penting, mengingat keberhasilan produk yang dihasilkan bergantung pada tinta yang dikeluarkan dari *ekstruder*. Semakin baik bentuk dan ukuran diameter tinta yang dihasilkan tentunya semakin baik juga produk yang dihasilkan dan berpengaruh terhadap tingginya nilai jual.

Tinjauan Pustaka

3D Printing

3D Printing merupakan salah satu metode proses manufaktur dengan cara melakukan penambahan material hingga terbentuk sebuah produk, atau juga biasa disebut dengan *additive manufacturing* [1]. *3D Printing* terdiri dari beberapa jenis, yang biasa digunakan yaitu tipe

delta dan tipe cartesian [2]. Penelitian ini menggunakan tipe delta, yang merupakan Printer 3D dengan tiga tiang vertikal membentuk segitiga dengan masing-masing terdapat lengan yang terhubung ke effector, dengan motor stepper sebagai penggerak yang dihubungkan melalui pulley [3]. Printer delta memiliki keuntungan dalam kemampuan untuk membuat objek lebih tinggi karena ketinggian Printer dan lengan yang tinggi [3].

Massive 3D Printer

Massive 3D Printer adalah Mesin *3D Printer* dengan ukuran yang lebih besar dari *3D Printer* yang umumnya beredar. Untuk dapat mencetak dekorasi dibutuhkan *3D Printer* dengan skala besar, dikarenakan ukuran memiliki beberapa keuntungan, seperti benda yang akan dicetak dapat bekerja lebih baik jika diproduksi sebagai satu bagian padat, dapat lebih menghemat waktu dibandingkan dengan merakit bagian-bagian kecil menjadi suatu produk besar, mendapatkan kebebasan dalam mendesain [4].

Ekstruder

Ekstruder adalah komponen yang sangat penting pada alat cetak bangun ruang *3D Printer* yang berfungsi untuk memanaskan dan memotong butir plastik pada alat *3D Printer* [5]. Ekstruder terdiri dari beberapa komponen penting, yaitu motor *stepper*, *thermistor*, *heater*, *fan*, dan *nozzle* [5]. Ekstruder diletakkan di bagian tengah alat pencetak bangun ruang tiga dimensi. Ekstrusi dalam pencetakan alat ini menggunakan bahan ekstrusi yang melibatkan *cold end* dan *hot end*. *Cold end* merupakan bagian dari sistem ekstruder yang menarik dan mengantarkan butir plastik menggunakan *screw* dan mendorong ke arah *hot end*, tempat dimana heater berada pada *heat block* [5].

Polyethylene

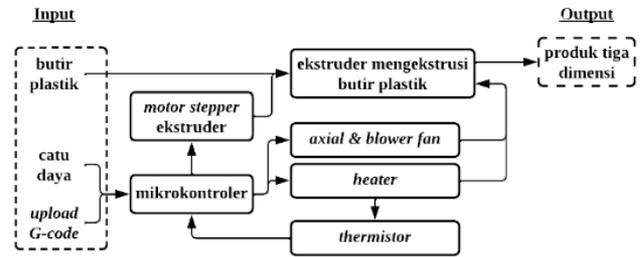
Polyethylene merupakan bahan termoplastik yang kuat dan dapat dibuat dari yang lunak sampai yang kaku [6]. *Polyethylene* diklasifikasikan menjadi dua jenis berdasarkan kepadatan dan percabangannya [6]. Sifat mekaniknya sangat bergantung pada variabel seperti luas dan jenis percabangan, struktur kristal, dan berat molekul, yaitu *polyethylene* densitas rendah (LDPE) dan *polyethylene* densitas tinggi (HDPE) [6]. LDPE ditentukan oleh kisaran densitas 0,910–0,940 g/cm³ dan memiliki tingkat percabangan rantai pendek dan panjang yang tinggi. Sedangkan, densitas HDPE lebih besar atau sama dengan 0,941 g/cm³ dan memiliki tingkat percabangan yang rendah, sehingga gaya antarmolekul lebih kuat daripada polimer bercabang tinggi [6].

Metodologi Penelitian

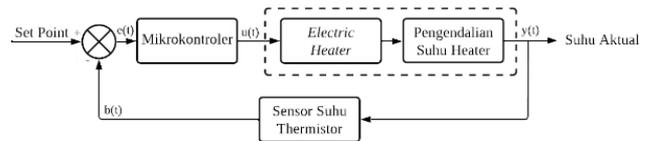
Desain Sistem

Pada penelitian ini akan dibuat sebuah *3D Printer* berukuran sangat besar yang berfokus pada bagian ekstruder dan nantinya dapat menghasilkan produk dekorasi rumah. Butir plastik tersebut akan masuk ke dalam ekstruder untuk diekstrusi terlebih dahulu, pada bagian ini ekstruder membutuhkan *fan* untuk menurunkan suhu pada saat *screw* mentransferkan butir plastik ke arah *hot end* (*nozzle*) agar butir plastik tidak leleh sebelum waktunya. Panas yang berada pada bagian ekstruder berasal dari bagian *heat block*, dimana terdapat *heater* dan *thermistor*. Saat proses pengeluaran tinta dari *nozzle*, terdapat fan yang mengarah ke arah keluarnya tinta, sehingga suhu pada tinta menurun dan tinta menjadi padat (tidak berongga) dan ketebalannya dapat stabil. Ekstruder tersebut digerakkan menggunakan lengan delta dan *heat bed* adalah alas dalam proses pembuatan produk dekorasi rumah dari *3D Printer*.

$e(t)$ = set point suhu—sinyal feedback suhu yang terbaca thermistor



Gambar 1. Diagram Blok Sistem



Gambar 2. Diagram Blok Sistem Kontrol Metode PID Pemanas Pada Hot End



Gambar 3. Desain Screw



Gambar 4. Desain Screw

$u(t)$ = sinyal output PID controller

$y(t)$ = sinyal output

$b(t)$ = sinyal feedback suhu yang terbaca thermistor

Gambar 1 menunjukkan alur pengendalian temperatur heater pada hot end. Mulai dari set point sebagai masukan awal, kemudian mikrokontroler akan mengirimkan perintah pada heater untuk melakukan pemanasan hingga set point yang ditentukan. Nilai tersebut kemudian akan diukur oleh thermistor dan diproses kembali oleh mikrokontroler untuk meminimalkan nilai error. Keluaran yang dihasilkan adalah suhu aktual heater pada hot end.

Desain Perangkat Keras

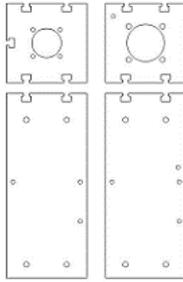
Berdasarkan pada penelitian ini, pada desain perangkat keras terbagi menjadi dua step, yaitu desain sistem mekanik pada Massive 3D Printer dan skematis rangkaian sistem Massive 3D Printer. Sistem mekanik Massive 3D Printer dengan fokus eMassive 3D Printer ekstruder terdapat desain screw, nozzle, heat block, akrilik penyangga ekstruder, jalur butir plastik masuk ke dalam ekstruder, dan jalur blower fan.

1. Desain Screw

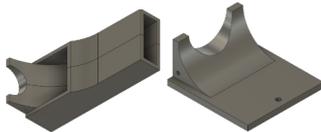
Berfungsi untuk mentransferkan butir plastik dari jalur butir plastik menuju nozzle. Bahan yang digunakan pada screw adalah bahan aluminium dengan ukuran diameter 16mm dan panjang 164mm.

2. Desain Nozzle

Berfungsi seperti pulpen yang akan mengeluarkan tinta berupa butir plastik yang sudah mencair. Bahan yang digunakan seperti screw dengan panjang 122mm dan memiliki diameter tinta sebesar 5mm. Pada bagian ujung nozzle juga terdapat heat block berukuran 50mm x 15mm.



Gambar 5. Desain Akrilik Penyangga Ekstruder



Gambar 6. Desain Jalur Butir Plastik



Gambar 7. Desain Jalur Blower Fan

3. Desain Akrilik Penyangga Ekstruder

Berfungsi untuk menyangga ekstruder sehingga *screw* dan *nozzle* dapat menyatu dan berfungsi dengan baik. Sisi-sisi akrilik terdapat bongkahan 3 mm yang akan ditempatkan oleh *bracket* untuk menampung komponen *fan* dan dapat mengikat jalur butir plastik dengan baik.

4. Desain Jalur Butir Plastik:

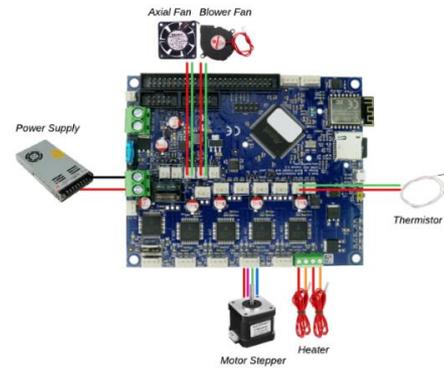
Berfungsi untuk memudahkan butir plastik masuk ke dalam ekstruder. Tinggi dari jalur butir plastik ini adalah 170 mm dan memiliki bukaan mulut sebesar 20 mm dan panjang 60 mm.

5. Desain Jalur Blower Fan

Berfungsi untuk menyalurkan angin dari *blower fan* langsung mengarah ke bagian dimana butir plastik yang sudah meleleh menjadi tinta keluar, sehingga ketika melakukan pencetakan, suhu pada tinta menurun. Skematis rangkaian sistem *Massive 3D Printer*, perangkat keras pertama yang dibutuhkan, yaitu Meanwell LRS-350-24 sebagai catu daya yang nantinya akan memasok energi listrik kepada mesin *3D Printer*, lalu ada Duet 2 WiFi sebagai mikrokontroler yang menjadi pusat penghubung antar perangkat yang dibutuhkan. Pada bagian ekstruder dibutuhkan motor stepper dengan perangkat keras Hanpose 17HS4401s-PG Nema 17 Extruder Gear Stepper Motor 42.

Desain Perangkat Lunak

Tahap pertama pada yang dilakukan setelah mulai, pemasangan suhu pada *hot end* hingga naik sesuai dengan suhu *set point*. Pemanasan pada *hot end* dikontrol lewat metode PID, dimana nilai temperatur dikontrol sesuai dengan nilai *set point* yang diatur. Jika suhu pada



Gambar 8. Desain Perangkat Keras

hot end tidak bisa mencapai *set point* atau kenaikan suhu *hot end* per detik tidak sesuai, proses tidak dapat dilanjutkan dan harus dilakukan pengecekan terhadap nilai *auto-tuning* menggunakan metode PID yang sudah dilakukan, lalu proses harus dimulai dari awal kembali. Apabila suhu pada *hot end* berhasil naik sesuai dengan *set point* yang ditentukan dan suhu sudah stabil, maka lanjut kepada tahap berikutnya, yaitu fan menyala ketika suhu sudah naik. Selanjutnya motor stepper menggerakkan ekstruder sehingga dapat melakukan ekstrusi terhadap butir plastik dan ekstruder dapat mengeluarkan tinta (butir plastik yang sudah dilelehkan). Jika proses ekstrusi terjadi hambatan yang menyebabkan ekstruder tidak dapat bergerak, maka mesin harus diberhentikan dan proses mengulang dari awal kembali. Namun apabila proses ekstrusi berjalan dengan baik tanpa ada hambatan apapun, proses akan dilanjutkan ke tahap mencetak tiga dimensi, dan saat proses pencetakan sudah selesai, *hot end* mati dan temperatur akan turun kembali menjadi seperti semula.

Hasil dan Pembahasan

Realisasi Alat

Pada proses perancangan alat terdapat beberapa tahap, diantaranya pembuatan rangka, pemasangan rantai, pemasangan ekstruder, dan pemasangan *heat bed*. Berikut merupakan *Massive 3D Printer* yang sudah dirancang secara keseluruhan.

1. Pemasangan Ekstruder

Tahap ini dilakukan penggabungan komponen di antaranya terdapat *screw*, *nozzle*, *heat block*, jalur butir plastik masuk, jalur fan, akrilik, *heater*, *thermistor*, dan motor *stepper*. Jika semua sudah terpasang dengan baik akan terlihat seperti di Gambar 10.

Tuning Heater menggunakan Metode PID

Tuning heater menggunakan metode PID dilakukan dengan cara memberikan perintah *auto-tuning PID* pada Duet Web Control. Pencarian nilai dilakukan dengan memberikan perintah pada rumus yang terdapat di bawah ini:

$$M303H1S230 \quad (1)$$

Keterangan:

- *M303* = Perintah penggunaan program *auto-tuning* pada Duet Web Control.
- *H* = Indeks heater. Nilai 1 untuk *hot end*, nilai 0 untuk *heat bed*.
- *S* = Temperatur (nilai *set point*) 230 untuk *hot end*.



Gambar 9. Diagram Alir Penelitian



Gambar 10. Massive 3D Printer

Perintah tersebut dikirimkan di Duet Web Control. Setelah dilakukan, mikrokontroler akan mulai melakukan auto-tuning hingga mendapatkan nilai koefisien PID yang nantinya akan dimasukkan ke dalam file `config.g` yang terdapat pada Duet Web Control. Berikut nilai koefisien PID yang didapatkan:

$$M307H1R1.140K0.582 : 0.000D11.11E1.35S1.00B0V23.7 \quad (2)$$

Keterangan:

- M307 Perintah untuk menetapkan atau melampirkan parameter proses pemanasan.
- H1 Indeks heater. Nilai 1 untuk hot end, nilai 0 untuk heat bed.



Gambar 11. Ekstruder

- R1.140 Heating rate.
- K0.582 : 0.000 Cooling rate.
- D11.11 Dead time.
- E1.35 Exponent of the cooling rate curve, default 1.35.
- S1.00 Maximum PWM.
- B0 Perintah untuk mematikan mode On-Off dan menggunakan mode PID.
- V23.7 VIN Supply Voltage.

Dengan PID Parameters sebagai berikut, terbagi menjadi dua bagian, pada keadaan heating (melakukan pemanasan) dan pada keadaan stand by:

$$\begin{aligned} \text{Heating} &= P14.1I0.307D109.6 \\ \text{Steady/Stand By} &= P14.1I0.547D109.6 \end{aligned} \quad (3)$$

Pengujian Akurasi Sensor

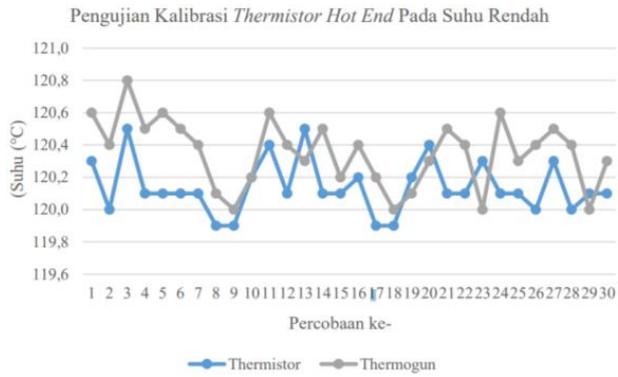
Pengujian akurasi sensor dilakukan untuk mendapatkan nilai akurasi data yang akan dibaca oleh sensor dengan melakukan perbandingan dengan perangkat tertentu, sehingga meminimalisir terjadinya error pada saat pembacaan data. Pada pengujian ini akan mendapatkan dua nilai, yaitu persentase error dan persentase akurasi yang didapatkan melalui persamaan berikut:

$$\text{error} = \frac{\text{nilai_pengukur} - \text{nilai_sebenarnya}}{\text{nilai_sebenarnya}} \times 100\% \quad (4)$$

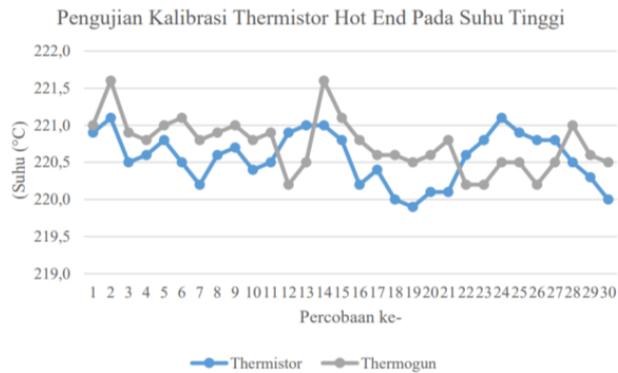
$$\text{akurasi} = 100\% - \text{error} \quad (5)$$

Pengujian kalibrasi sensor suhu dilakukan dengan membandingkan nilai yang terbaca oleh sensor suhu thermistor dan nilai yang terbaca oleh thermogun. Pengujian dilakukan pada dua suhu, yaitu suhu rendah dan tinggi, masing-masing pengambilan data dilakukan sebanyak 10 kali pada hot end ekstruder langsung. Hasil pengujian pembacaan sensor suhu dan pembacaan pada thermogun adalah seperti pada gambar.

Setelah melakukan pengujian pada suhu rendah, nilai error dan akurasi bisa didapatkan dengan menggunakan persamaan 3 dan 4. Didapatkan nilai persentase error sebesar 0,22% dan nilai persentase akurasi sensor suhu sebesar 99,78%. Setelah melakukan pengujian pada suhu tinggi, nilai persentase error sebesar 0,20% dan nilai persentase akurasi sensor suhu sebesar 99,80%. Berdasarkan pengujian



Gambar 12. Pengujian Sensor Suhu Thermistor Hot End pada Suhu rendah



Gambar 13. Pengujian Sensor Suhu Thermistor Hot End pada Suhu Tinggi



Gambar 14. Desain Garis 8,5 cm

kalibrasi sensor suhu pada suhu rendah dan tinggi di atas, dapat disimpulkan bahwa sensor suhu yang digunakan pada penelitian ini layak digunakan karena memiliki nilai akurasi yang cukup tinggi.

Pengujian Sistem Keseluruhan

1. Pengujian Suhu Heater pada Hot End Terhadap Produk

Pengujian ini dilakukan dengan tujuan mengetahui suhu yang tepat agar dapat menghasilkan produk yang baik dengan desain garis sepanjang 8,5 cm feedrate motor stepper sebesar 0,5 mm/s, keluaran nozzle sebesar 5 mm, dan jarak antara nozzle dan heat bed sebesar 0,6 mm.

Pengujian dilakukan dengan 4 suhu yang berbeda, yaitu 185°C, 190°C, 195°C, 200°C, dan 205°C. Berikut merupakan hasil dari pengujian yang sudah dilakukan:

Berikut merupakan hasil pengujian suhu dari 185—205°C, berurutan dari paling kiri – paling kanan. Pada suhu 185°C patah, pada 190°C ukurannya lebih kecil, pada 195°C terdapat rongga sehingga membuat bentuknya tidak stabil, dan pada 205°C ketebalannya lebih besar dari 200°C. Berikut apabila dilihat secara mendetail dan dibuktikan dengan alat ukur:



Gambar 15. Hasil Pengujian Suhu 185—205°C



Gambar 16. Hasil Pengujian pada Suhu 185°C

Dengan menggunakan suhu 185°C, didapatkan panjang 8,95 cm dan lebar 6,3 mm. Selisih ukuran dari desain dapat dikatakan 0,45 cm pada panjang dan 1,3 mm pada lebar. Dari pengujian suhu pada 185°C terdapat beberapa kekurangan dari hasil desainnya, seperti yang ditandai oleh lingkaran merah, hasil pada tinta tidak stabil, yaitu terdapat rongga pada hasil cetak, sehingga menyebabkan hasil dari cetakan tersebut mudah patah.

Hasil pengujian pada suhu 190°C didapatkan panjang sebesar 8,6 cm, dimana berarti selisih dari desain adalah 0,1 cm, dan didapatkan lebar sebesar 4,8 mm, dimana selisih dari desain adalah 0,2 mm. Pada lingkaran merah terdapat sedikit rongga yang menyebabkan keluaran tinta menjadi tidak stabil.

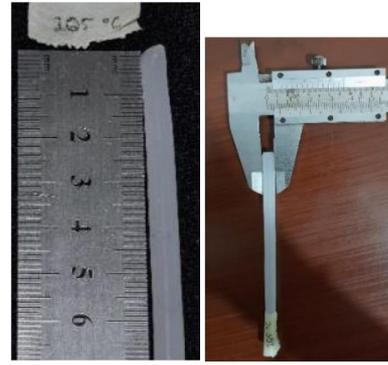
Hasil pengujian pada suhu 195°C, didapatkan panjang 8,4 cm, selisih 0,1 cm dari desain dan ketebalan 5,9 mm, selisih 0,9 mm dari desain. Pada pengujian ini didapatkan selisih ketebalan yang terlalu jauh dari keluaran tinta yang dihasilkan seharusnya. Terdapat juga sedikit rongga yang membuat keluaran menjadi tidak stabil.

Hasil pengujian pada suhu 200°C, nilai panjang 8,5 cm sesuai dengan desain, dan lebar 5,1 mm, selisih 0,1 mm dari yang seharusnya. Hasil cetak pada suhu ini memiliki ketebalan dan bentuk yang stabil, tidak terdapat rongga seperti pada suhu 185°C, 190°C, dan 195°C.

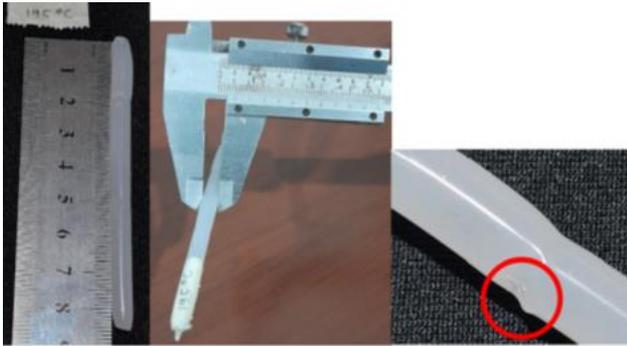
Panjang yang dihasilkan dari pengujian pada suhu 205°C adalah 8,7 cm, dimana bernilai selisih 0,2 cm dari desain dan lebar 6,4 mm,



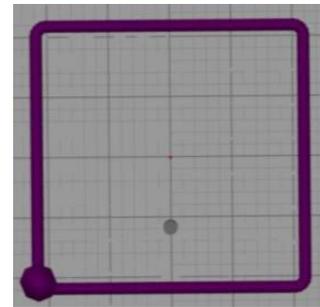
Gambar 17. Hasil Pengujian pada Suhu 190 °C



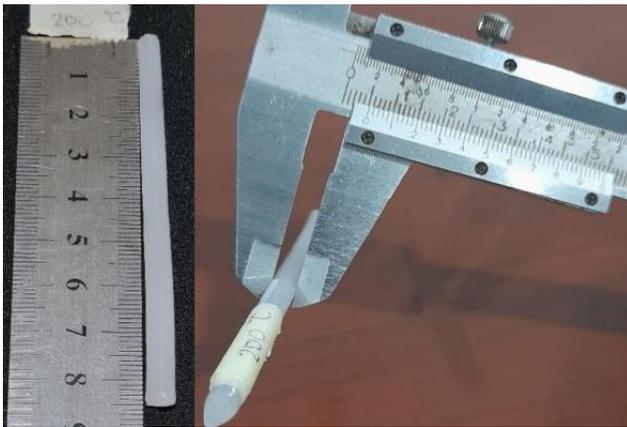
Gambar 20. Hasil Pengujian pada Suhu 205 °C



Gambar 18. Hasil Pengujian pada Suhu 195 °C



Gambar 21. Hasil Cetak Tiga Dimensi dengan Feedrate 0,5 mm/s



Gambar 19. Hasil Pengujian pada Suhu 200 °C



Gambar 22. Hasil Cetak Tiga Dimensi dengan Feedrate 2 mm/s

dimana bernilai selisih 1,4 mm dari yang seharusnya. Untuk hasil cetak yang didapatkan cukup stabil dan tidak berongga. Berdasarkan dari lima pengujian yang sudah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa suhu yang paling tepat untuk digunakan pada Massive 3D Printer adalah suhu 200 °C, dikarenakan ketepatan panjang dan lebar pada hasil cetak dan desain terbilang paling baik dari yang lainnya dan hasil cetak pada suhu 200 °C stabil, tidak memiliki rongga sedikitpun.

2. Pengujian Feedrate Motor Stepper pada Ekstruder

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui nilai feedrate yang tepat agar dapat menemukan keluaran tinta yang ketebalannya stabil dan sesuai dengan desain tiga dimensi yang sudah dibuat. Pada pengujian ini dilakukan dengan kondisi yang sama, yaitu dengan suhu hot end sebesar 200 °C, suhu heat bed sebesar 80 °C, desain 3D dengan ukuran 10 x

10 (cm) berbentuk persegi, keluaran nozzle selebar 5 mm, dan jarak antara nozzle dan heat bed sebesar 0,6 mm.

Pengujian dilakukan pada 4 nilai feedrate berbeda, yaitu 2 mm/s, 1,5 mm/s, 1 mm/s, dan 0,5 mm/s. Berikut merupakan hasil dari pengujian yang sudah dilakukan:

Hasil cetak tiga dimensi dengan feedrate 2 mm/s memiliki panjang 11,2 cm dan lebar 0,9 cm, yang berarti panjang hasil cetak lebih 1,2 cm daripada seharusnya dan lebar hasil cetak lebih 0,4 cm dari seharusnya. Dapat terlihat bahwa lebar tinta yang dikeluarkan sangat tidak stabil sehingga menyebabkan bentuk hasil cetak tidak beraturan.

Hasil cetak tiga dimensi dengan feedrate 1,5 mm/s memiliki panjang 11,8 cm, dimana panjang tersebut lebih 1,8 cm. Sedangkan lebar yang dihasilkan adalah 0,65 cm, lebih 0,15 cm dari lebar nozzle sebenarnya. Kestabilan keluaran tinta masih terbilang kurang stabil, dikarenakan lebar yang didapatkan pada hasil cetak masih tidak rata.

Hasil cetak pada feedrate 1 mm/s, didapatkan panjang sebesar 11,1 cm dan lebar 0,8 cm. Hasil cetak memiliki panjang berlebih sebanyak 1,1 cm dari desain tiga dimensi dan memiliki kelebihan lebar sebanyak 0,3 cm.



Gambar 23. Hasil Cetak Tiga Dimensi dengan Feedrate 1,5 mm/s



Gambar 24. Hasil Cetak Tiga Dimensi dengan Feedrate 1 mm/s



Gambar 25. Hasil Cetak Tiga Dimensi dengan Feedrate 0,5 mm/s

Panjang dan lebar yang didapatkan dari hasil cetak adalah 9,5 cm dan 0,75 cm. dengan feedrate 0,5 mm/s, panjang pada hasil cetak berkurang sebanyak 0,5 cm dari desain tiga dimensi sesungguhnya. Lebar yang didapatkan juga lebih 0,25 cm dari ukuran nozzle seharusnya. Tetapi, hasil cetak menggunakan feedrate 0,5 mm/s memiliki ketebalan tinta yang stabil pada setiap sisinya, sehingga hasil cetak beraturan membentuk persegi.

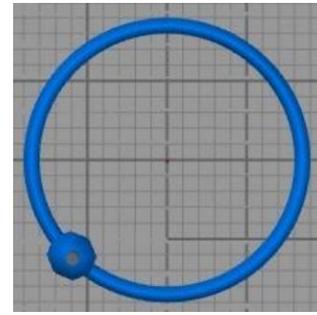
Berdasarkan empat pengujian di atas dengan nilai feedrate berbeda, keluaran tinta ekstruder yang stabil dan paling mendekati panjang desain tiga dimensi dan lebar dari nozzle adalah hasil cetak tiga dimensi dengan nilai feedrate 0,5 mm/s.

3. Pengujian Sistem Kontrol Temperatur Metode PID dan *On-Off* pada *Hot End*

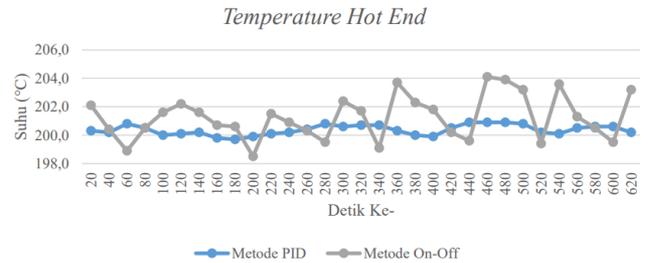
Pengujian ini dilakukan untuk mengevaluasi kestabilan temperatur pada hot end berdasarkan nilai set point yang telah diatur sebelumnya. Dua metode kontrol temperatur, yaitu Metode Kontrol Temperatur PID dan Metode *On-Off*, dibandingkan. Pengujian ini fokus pada proses pencetakan desain tiga dimensi lingkaran dengan diameter 9 cm.

Pengujian dilakukan dengan memonitor dan mencatat temperatur selama proses pencetakan. Desain yang dicetak adalah lingkaran dengan diameter 9 cm, seperti yang terlihat pada Gambar 25. Nilai set point pada pengujian ini adalah 200 °C.

Dapat dilihat bahwa temperatur pada *hot end* lebih stabil apabila menggunakan sistem kontrol PID. Kestabilan temperatur pada hot end



Gambar 26. Desain Tiga Dimensi Lingkaran



Gambar 27. Desain Tiga Dimensi Lingkaran



Gambar 28. Perbandingan Hasil Cetak Pengujian Sistem Kontrol Temperatur Metode PID (A) Metode *On-Off* (B) pada *Hot End*

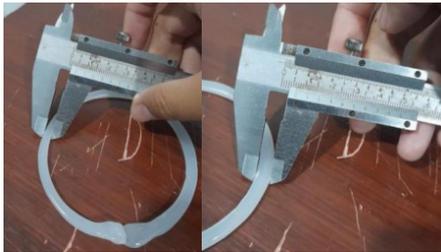
saat melakukan pencetakan akan berpengaruh kepada hasil cetak tersebut. Semakin stabil temperatur, semakin stabil juga keluaran tinta. Berbeda dengan sistem kontrol metode *On-Off*, temperatur mengalami fluktuatif dan persentase error hingga 0,8%. Hal ini akan berpengaruh kepada proses ekstrusi dan menyebabkan keluaran tinta tidak stabil. Berikut adalah perbandingan hasil cetak dari pengujian sistem kontrol temperatur metode PID dan *On-Off* pada *hot end*:

Hasil cetak dengan metode PID (A) keluaran tintanya lebih stabil dibandingkan hasil cetak dengan metode *On-Off* (B), berikut merupakan bukti pengukuran perbedaan atau ketidakstabilan dari tebal tinta yang dikeluarkan.

Ketebalan dari hasil cetak menggunakan metode PID adalah stabil 6,3 mm. Sedangkan pada ketebalan dari hasil cetak menggunakan metode *On-Off* pada satu sisi adalah 4,5 mm dan 6,7 mm pada satu sisi lainnya. Dari perbandingan hasil cetak tersebut dapat terlihat jelas apabila menggunakan sistem kontrol temperatur metode PID keluaran tintanya stabil, sedangkan jika menggunakan sistem kontrol temperatur metode *On-Off* keluaran tintanya tidak stabil, terlihat dari perbedaan ukuran yang cukup jauh dari kedua sisi. Ketidakstabilan hasil keluaran tinta tersebut disebabkan oleh temperatur yang fluktuatif saat melakukan pencetakan dan menyebabkan proses ekstrusi menjadi kurang baik.



Gambar 29. Hasil Cetak Pengujian Sistem Kontrol Temperatur Metode PID



Gambar 30. Hasil Cetak Pengujian Sistem Kontrol Temperatur Metode On-Off

Kesimpulan

Berdasarkan perancangan, implementasi, pengujian, dan analisa yang dilakukan pada sistem *Massive 3D Printer*, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Dengan melakukan *auto tuning* yang diperintahkan langsung melalui Duet Web Control, didapatkan nilai $M307H1R1.140K0.582 : 0.000D11.11E1.35S1.00B0V23.7$.
2. Penggunaan sistem kontrol PID untuk mengontrol temperatur *hot end* pada *Massive 3D Printer* beroperasi dengan optimal dikarenakan mampu mengontrol suhu pada *hot end* dengan baik (tidak mengalami fluktuatif) dan berdampak kepada proses ekstrusi, sehingga dapat menghasilkan keluaran tinta yang tidak berongga dan hasil pencetakan memiliki kepadatan yang baik, didukung juga dengan suhu yang sesuai pada *heater*, yaitu 200°C dan *feedrate motor stepper* yang tepat, yaitu 0.5 mm/s .

Daftar Pustaka

1. Rizaty MA. Mayoritas Sampah Nasional dari Aktivitas Rumah Tangga pada 2020; 2020. Available from: [link/to/mayoritas-sampah-nasional](#).
2. Tamara IH, Herianto. Optimasi Parameter Proses Mesin 3D Printer Fused Deposition Modeling Terhadap Akurasi Dimensi Hasil Cetak Filamen Polypropylene (PP); 2019.
3. Il PDRLW. The Delta Parallel Robot: Kinematics Solutions. Mechanical Engineering, Ohio University; 2016.
4. Widyaningrum GL. Studi Terbaru: Masalah Sampah Plastik di Bumi Sudah di Luar Kendali; 2020. Available from: [link/to/studi-terbaru-masalah-sampah-plastik](#).
5. Mensley M. What is an Extruder?; 2021. Available from: [link/to/what-is-an-extruder](#).
6. Zhong X, Zhao X, Qian Y, Zou Y. Polyethylene plastic production process. Insight - Material Science. 2018 Aug;1(1):1.