

Analisa Ketelitian Gerak Sumbu X *Ekstruder* Mesin *Fused Deposition Modeling* dan Kualitas Hasil 3D *Printing* Menggunakan Bahan *Polylactic Acid* (PLA)

A. T. Rohman, H.S.B. Rochardjo*, Herianto

Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada.
Jl. Grafika No. 2, Kompleks UGM, Yogyakarta 55281, Indonesia
E-mail: *heru-sbr@ugm.ac.id

Abstrak

Fused Deposition Modeling (FDM) merupakan teknologi *additive layer manufacturing* (ALM) yang bekerja dengan cara ekstrusi material. Material yang digunakan adalah *polylactid acid* (PLA). Tantangan penggunaan teknologi FDM antara lain kualitas dimensi benda hasil uji *printing*. Oleh karena itu dilakukan penelitian yang bertujuan untuk mengetahui besar akurasi gerak ekstruder mesin FDM dan ketelitian dimensi benda hasil uji *printing* pada mesin FDM. Pengaruh optimasi kontrol pada mesin FDM akan dilihat pengaruhnya terhadap akurasi gerak mesin FDM dan ketelitian benda uji.

Penelitian dilakukan pada sumbu gerak ekstruder mesin FDM. Metode penelitian dengan cara pengukuran akurasi *under no load* pada mesin FDM dan divalidasi menggunakan pengukuran ketelitian dimensi hasil uji *printing*. Pengukuran *under no load* menggunakan laser interferometer sedangkan pengukuran dimensi benda uji *printing* menggunakan mesin CMM. Parameter kecepatan dan proses *printing* ditetapkan pada nilai tertentu. Optimasi kontrol dilakukan dengan penambahan *step/unit* motor 80,1 dan 80,2.

Perbedaan hasil pengukuran *under no load* dan pengukuran ketelitian dimensi pada hasil *printing* banyak dipengaruhi oleh faktor *shrinkage* material. Kompensasi kontrol dapat meningkatkan ketelitian dimensi sebesar 0,145 mm. Mesin FDM yang diteliti dapat menghasilkan ketelitian dimensi produk sebesar 0,157 mm dengan nilai ketidakpastian dibawah ± 0.050 mm.

Kata kunci : *ketidakpastian pengukuran, FDM, shrinkage, kompensasi kontrol, step/unit, under no load*

Abstract

Fused Deposition Modeling (FDM) is an additive layer manufacturing (ALM) technology that works by material extrusion. The material used is polylactid acid (PLA). FDM technology has challenges in the quality and accuracy of product dimensions. Therefore, this research is conducted to determine the accuracy and repeatability of FDM machine and the benefit caused by FDM machine compensations.

The research is carried out on the FDM extruder axis. The study is conducted by accuracy and repeatability measurement under no load condition on the FDM machine by laser interferometer and then validated by dimensional accuracy measurements of the printing test dimensions using CMM. Velocity and process parameters are set at a certain value. Machine control compensation is conducted by adding 80.1 and 80.2 step/unit motor.

The differences between under no load measurement and the products dimensional accuracy of the printing results is largely influenced by the material shrinkage. Control compensation increase dimensional accuracy by 0.145 mm. The FDM machine could produce an accuracy of product dimensions of 0.157 mm with uncertainty values under + 0.050 mm.

Keywords : uncertainty, fdm, shrinkage, control compensation, step/unit, under no load

1. PENDAHULUAN

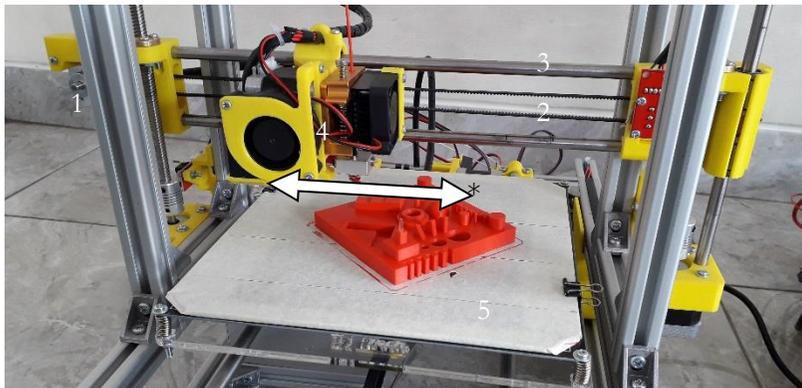
Additive manufacturing (AM) merupakan teknologi pembentukan material yang berbeda dengan teknologi *subtractive manufacturing* yang menghilangkan material mentah menjadi komponen jadi. Dalam teknologi AM, material dibentuk berdasarkan lapis demi lapis atau disebut *layer manufacturing* (LM) menjadi bentuk 3D model atau diistilahkan sebagai *Additive Layer Manufacturing* (ALM).

Beberapa penelitian mengkaji dan memperoleh wawasan bahwa teknologi AM memiliki kemanfaatan potensi yang tinggi (Berman, 2012). Potensi keuntungannya antara lain berkurangnya biaya *tooling*, mengurangi *scrap* permesinan dan mengurangi dampak kerusakan lingkungan dengan asumsi bahwa penerapan AM tidak hanya untuk pembuatan *prototype* namun juga untuk produk konsumsi masyarakat (Schniederjans dan Yalcin, 2018). Keuntungan dalam penggunaan teknologi AM lainnya adalah peningkatan keragaman produk dan jumlah produksi yang rendah dengan kecepatan produksi yang tinggi dan pelayanan konsumen yang tinggi. Aplikasi dari AM sudah diterapkan dalam berbagai bidang antara lain pendidikan, mekanik, otomotif, *aerospace*, *robotic*, kelautan, arsitek, medis dan industri farmasi. Dalam industri farmasi sudah dimulai pembuatan obat oral menggunakan 3d *printing* dengan variasi geometrik, dimensi dan warna. Airbus memproduksi lebih dari 1.000 komponen menggunakan mesin *fused deposition modelling* (FDM) dengan material resin ULTEM™ 9085 untuk dipasang pada pesawat A 350 XWB karena memiliki keunggulan dalam akurasi/ketelitian dimensi dan kestabilan material. Produk medis *intra-uterine device* (IUD) juga diproduksi menggunakan mesin 3d *printing* FDM. (Sadia dkk, 2017). Kelebihan pada AM ternyata tidak selaras dengan ketelitian produk AM (Dimitrov dkk, 2006). Selain itu faktor lain yang masih menjadi kendala pada produk ALM adalah kualitas dimensi seperti ketelitian geometrik, mampu ulang dan kehalusan permukaan.

Sebagian besar penelitian kualitas produk AM adalah dengan cara pengukuran benda uji hasil proses AM melalui perhitungan nilai penyimpangan dimensi, geometrik dan kualitas kondisi permukaan. Namun, penelitian yang sudah ada lebih kepada optimasi pada parameter proses AM. Salah satu penelitian parameter utama adalah dimensi komponen, temperatur ekstruder, orientasi *printing* dan *layer thickness* yang berpengaruh terhadap akurasi dimensi produk AM (Lim dkk, 2016). Cajal (2016) melakukan penelitian *volumetric error* pada mesin *polyjet* Objet350V 3D *printer* dengan cara pengukuran benda uji hasil *printing* menggunakan mesin CMM dan menganalisa *systematic error* yang terjadi pada mesin tersebut. Penelitian kualitas hasil AM berdasarkan kondisi mesin masih belum banyak dilakukan. Oleh karena itu pada penelitian ini akan dilakukan pengukuran akurasi mesin FDM kemudian dilakukan validasi menggunakan pengukuran pada benda uji hasil *printing* AM pada mesin tersebut. Peningkatan kualitas hasil AM akan dilakukan dengan cara kompensasi kontrol pada mesin FDM.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian diawali dengan penentuan jenis pengukuran akurasi mesin FDM, penentuan parameter pengukuran yang digunakan pada pengukuran *under no load* penentuan parameter proses *printing*, pelaksanaan pengukuran mesin FDM, pembuatan benda uji *printing*, pengukuran ketelitian dimensi mesin, evaluasi ketelitian dimensi mesin dan optimasi *step/unit* motor. Obyek penelitian adalah sumbu gerak X (ekstruder) mesin FDM dengan spesifikasi sebagai berikut: *motor stepper* NEMA 17, penggerak *timing belt* GT2, pulley GT2 dan guide rod 8 mm. Diameter *nozzle* ekstruder adalah 0.4 mm. Material yang digunakan adalah *polylactide* (PLA) dengan diameter penampang sebesar 1,75 mm. Material PLA memiliki suhu kerja 180-200°C, titik leleh 120-170 °C dan titik *softening* 45-120 °C (Valerga dkk, 2018). Konfigurasi ekstruder sumbu X dapat dilihat pada Gambar 1.



Keterangan gambar :

1. *Motor stepper.*
2. *Timing belt.*
3. *Guide rod.*
4. *Ekstruder.*
5. *Bed FDM.*

* Arah gerak ekstruder (sumbu X)

Gambar 1. Skema ekstruder sumbu X mesin FDM

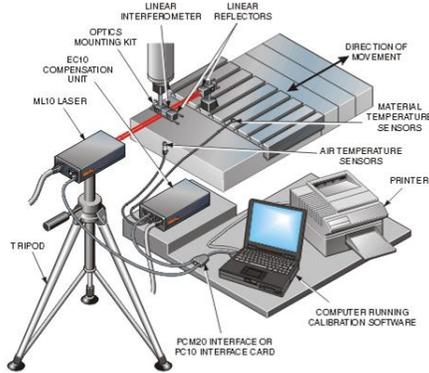
Peralatan yang digunakan

1. *Laser Interferometer Renishaw ML 10*

Laser interferometer merupakan alat ukur berbasis *laser* dan optik yang memiliki resolusi dan akurasi yang sangat tinggi. Evaluasi yang dilakukan untuk mesin FDM adalah pengukuran akurasi posisi, *backlash* dan mampu ulang mesin FDM. Konfigurasi perangkat uji laser interferometer dapat dilihat pada Gambar 2. Spesifikasi *laser interferometer* dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi *laser interferometer* Renishaw ML10 (Begović dkk, 2014)

No	Spesifikasi	Keterangan
1	Spesifikasi laser	<i>Helium Neon (HeNe) laser tube</i>
2	Akurasi sistem	0,5 ppm
3	Akurasi frekuensi laser	$\pm 0,05$ ppm
4	Resolusi	0,001 mikron
5	Kecepatan maksimum	4,0 m/detik
6	Frekuensi	50 kHz
7	<i>Range</i>	0 – 40 meter
8	Suhu operasi	0 – 40° C
9	Kelembapan operasi	0 – 95% (tanpa kondensasi)



Gambar 2. Konfigurasi pengukuran *laser interferometer* (Begović dkk, 2014)

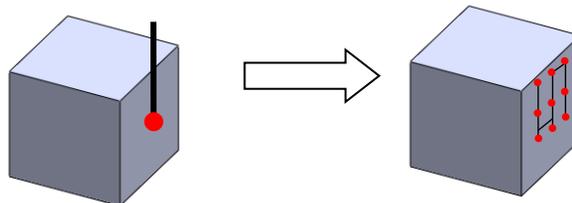
2. Coordinate Measuring Machine (CMM)

Mesin CMM dipilih dan digunakan untuk mengukur kualitas dimensi benda uji hasil *printing*. Pertimbangan dalam pemilihan CMM sebagai alat ukur adalah nilai *error* maksimum yang diijinkan (*Maximum Permissible Error*/ MPE_{CMM}) yang rendah. Berdasarkan ISO 10360, MPE_{CMM} didefinisikan sebagai berikut

$$MPE_{CMM} : \pm (X+L/K) \quad (1)$$

dengan X adalah tingkat akurasi mesin CMM dengan satuan μm , K adalah konstanta dan L adalah panjang *stroke* sumbu mesin CMM dengan satuan mm. Mesin CMM yang digunakan adalah CMM Brown Sharpe dengan $MEP_{CMM} \text{ BS} : \pm 2,5 + L/333 \mu\text{m}$.

Sampel benda uji pada Gambar 3 menunjukkan cara pengambilan 9 titik data pada tiap posisi. Pengambilan data dilakukan secara *point to point probe* dan tidak dilakukan secara *scanning*. *Point to point probing* adalah pengambilan data pada permukaan satu demi satu. Sedangkan, *scanning probe* merupakan cara pengambilan data dengan cara mengikuti suatu permukaan atau selalu menempel sambil mengumpulkan titik koordinat permukaan tersebut. *Point to point probe* mempunyai nilai ketidakpastian hasil pengukuran yang lebih kecil dibanding dengan metode *scanning probe*.



Gambar 3. *Sampling* pengambilan data per posisi.

Pengukuran benda uji hasil *printing* menggunakan CMM menghasilkan data posisi X,Y dan Z tiap titik pengukuran. Data tersebut diolah menghasilkan sembilan sebaran data hasil pengukuran pada tiap posisi. Keseluruhan data dari sepanjang 120 mm menghasilkan total

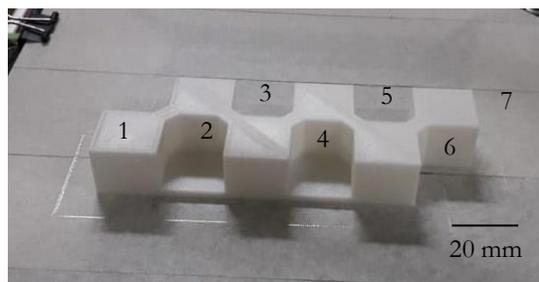
error/penyimpangan ketelitian dimensi. Namun dalam pengukuran benda uji ada nilai *uncertainty*/ketidakpastian pengukuran.

Langkah Pengujian

1. Pengukuran pemosisian atau *under no load* ekstruder sumbu X. Parameter gerak sumbu X ditentukan dengan kecepatan 50 mm/s, percepatan 1000 mm/s² dan jerk 7,5 m/s³. Pengukuran *under no load* akurasi mesin FDM mengacu pada ISO 230-2 2006. Sumbu X ekstruder diukur sepanjang 120 mm. Pada jarak tersebut dibagi menjadi 7 step pengukuran posisi setiap 20 mm. Pengukuran dilakukan dua arah dari titik nol menuju 120 mm kemudian kembali lagi diukur dari titik 120 mm menuju titik 0 untuk mendapatkan nilai *repeatability* pada dua arah yang berbeda dan didapatkan nilai *backlash*. Pengukuran dilakukan dengan lima kali perulangan.

Kompensasi kontrol berupa pengaturan *step/unit motor stepper* sebesar 80,0, 80,1 dan 80,2 dijadikan variabel masukan untuk dilihat variabel keluarannya. Variabel keluaran dari pengukuran *under no load* adalah

1. M = *Error* posisi rata-rata
 2. E = *Error* posisi sistematis
 3. R+ = Mampu ulang arah gerak sumbu X+
 4. R- = Mampu ulang arah gerak sumbu X-
 5. B = *Backlash* maksimal pengukuran
 6. A+ = Akurasi arah gerak sumbu X+
 7. A- = Akurasi arah gerak sumbu X-
 8. A = Akurasi total dari pengukuran
2. Pengukuran benda uji hasil AM menggunakan mesin CMM. Benda uji dibuat dengan parameter proses *printing* yang mengacu pada penelitian Sanchez dkk (2014) dan dapat dilihat pada Tabel 2. Menurut Sanchez dkk (2014), parameter tersebut merupakan parameter optimal dalam pembuatan benda uji. Benda uji hasil *printing* dapat dilihat pada Gambar 4. Pengukuran ketelitian dimensi dilakukan sepanjang 120 mm pada benda uji *printing*. Benda uji diukur dimensinya setiap panjang 20 mm dengan 9 kali pengambilan data pada tiap sisi. Pengukuran dimensi dilakukan secara *incremental* dimulai dari sisi ukur 1 sampai dengan 7.



Gambar 4. Benda uji hasil *printing*

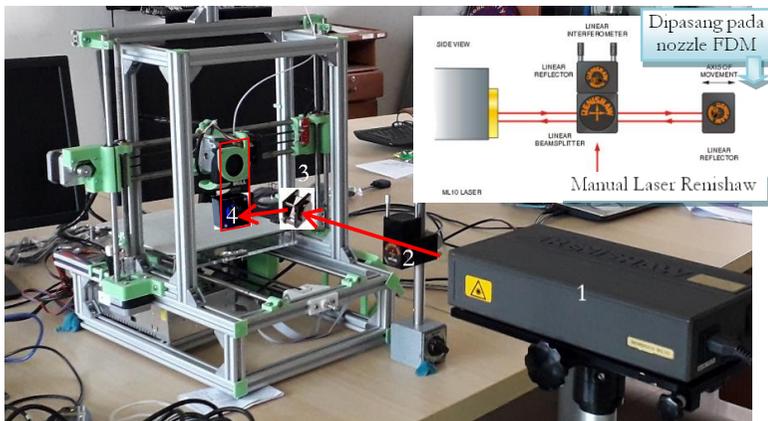
Tabel 2. Parameter proses printing benda uji(Sanchez dkk, 2014)

Parameter	Nilai	Satuan
<i>Layer thickness</i>	0,20	mm
<i>Raster width</i>	0,71	mm
<i>Suhu Bed</i>	60	°C
<i>Suhu Nozzle</i>	200	°C
<i># of perimeters</i>	3	
<i>Top solid layers</i>	3	
<i>Bottom solid layers</i>	3	
<i>Fill density</i>	30	%
<i>Material</i>	PLA	
<i># of repetitions</i>	2	
<i>Travel speed</i>	200	mm/s
<i>Nozzle diameter</i>	0,4	mm
<i>Filament Diameter</i>	1,75	mm
<i>Support</i>	No	
<i>Slicer</i>	Repetier-Host V2.05	

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Konfigurasi pengukuran akurasi mesin FDM menggunakan *laser interferometer* dapat dilihat pada Gambar 5. Hasil pengukuran *under no load* menghasilkan data *error* posisi, mampu ulang, *backlash* dan akurasi sumbu X (ekstruder) mesin FDM dapat dilihat pada Tabel 3. Karakteristik penyimpangan sumbu x bernilai positif sebesar 137 μm maka saat diberikan penambahan nilai *step/unit* motor sebesar 80,1 maka nilai penyimpangan naik sebesar 59 μm . Pada *step/unit* 80,2 maka terjadi peningkatan penyimpangan yang signifikan sebesar 214 μm . Terjadinya kenaikan hanya pada R+ sebesar 13 μm pada *step/unit* 80,1.

Backlash tidak berpengaruh terhadap perubahan nilai *step/unit*. *Error* posisi rata-rata (M) mengalami kenaikan yang signifikan. Grafik penyimpangan pada sumbu X, Gambar 6, menunjukkan pola penambahan penyimpangan akurasi pada arah positif. Hal ini terjadi karena penambahan nilai *step/unit* motor secara aktual berpengaruh terhadap penambahan jarak pergerakan translasi sumbu X.

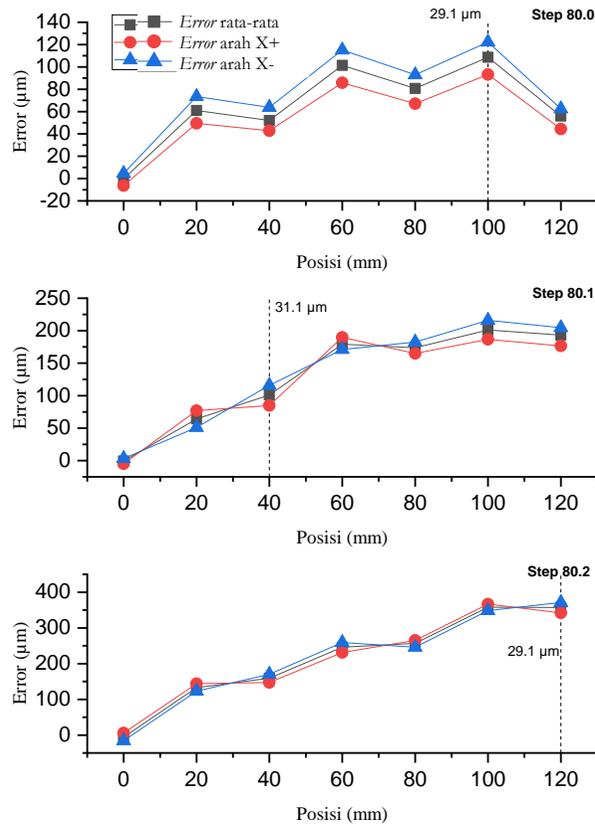


Keterangan gambar :

1. Laser Interferometer
2. Linear beamsplitter dan linear reflector
3. Mirror reflector
4. Linear reflector

→ Arah laser

Gambar 5. Pengukuran akurasi mesin FDM



Gambar 6. Grafik akurasi *under no load* sumbu x (ekstruder)

Tabel 3. Data akurasi sumbu X (ekstruder) dengan variasi *step/unit* motor

No	Sb	Step/Unit	M µm	E µm	R+ µm	R- µm	B µm	A+ µm	A- µm	A µm
1	X	80,0	109	123	15	13	21	115	123	137
2	X	80,1	176	186	28	10	20	184	192	196
3	X	80,2	329	344	12	9	21	331	343	351

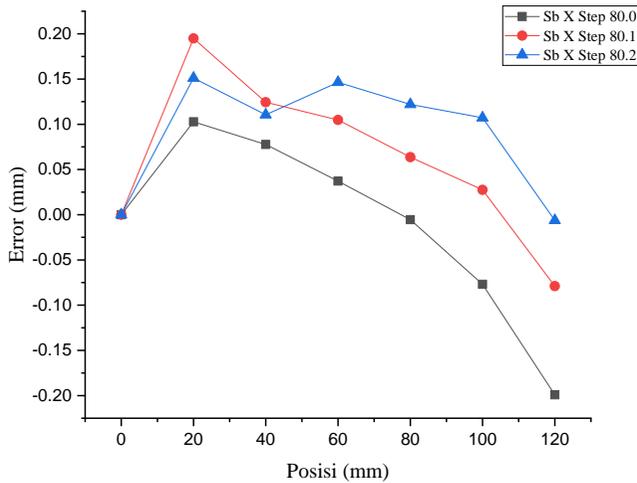
Hasil pengukuran ketelitian benda uji hasil *printing* dapat dilihat pada Tabel 4. *Error* posisi pada tiap sisi ukur ditunjukkan pada masing-masing nilai *step/unit motor*. Ketelitian dimensi ditunjukkan dari besar total *error* akurasi produk. *Error* total atau ketelitian dimensi merupakan selisih nilai *error* terbawah terhadap *error* tertinggi. Total penyimpangan ketelitian dimensi benda uji pada *step/unit* 80,0 yaitu sebesar 0,302 mm. Ketidakpastian pengukuran sebesar $\pm 0,051$ mm dengan interval kepercayaan 68% atau *coverage factor* satu. Total penyimpangan ketelitian dimensi benda uji pada *step/unit* 80,1 120 mm turun menjadi 0,274 mm. Ketidakpastian pengukuran meningkat hanya sebesar $\pm 0,006$ mm yang berarti tidak terlalu signifikan. Ketidakpastian

ketelitian dimensi benda uji pada *step/unit* 80,2 bernilai $\pm 0,030$ mm yang menunjukkan bahwa peningkatan *step/unit* dapat mengurangi ketidakpastian pengukuran. Total penyimpangan ketelitian dimensi menunjukkan nilai yang baik yaitu 0,157 mm. Benda kerja dengan posisi 60 mm sampai dengan 120 mm mewakili titik tengah *bed* sampai dengan titik akhir *bed* mesin FDM. Maka area tersebut bisa menjadi rekomendasi posisi penempatan benda untuk proses *printing* dikarenakan nilai *Maximum Percent Error* (MEP) memiliki nilai yang relatif rendah pada area tersebut. Grafik penyimpangan ketelitian dimensi benda uji dengan variasi *step/unit* motor dapat dilihat pada Gambar 7.

Tabel 4. Data akurasi produk arah X dengan variasi *step/unit* motor

No	Keterangan	Step/Unit	Posisi							Total Error
			0	20 mm	40 mm	60 mm	80 mm	100 mm	120 mm	
1	Error posisi	80.0	0	0.103	0.078	0.037	-0.005	-0.077	-0.199	
2	Stdev	80.0	0	0.03	0.039	0.051	0.014	0.041	0.025	0.302+0.051 mm*
3	MEP	80.0	0	0.51%	0.20%	0.06%	-0.01%	-0.08%	-0.17%	
4	Error posisi	80.1	0	0.195	0.124	0.105	0.064	0.028	-0.079	
5	Stdev	80.1	0	0.056	0.030	0.052	0.021	0.051	0.030	0.274 +0.056 mm*
6	MEP	80.1	0	0.96%	0.31%	0.17%	0.08%	0.03%	0.07%	
7	Error posisi	80.2	0	0.151	0.111	0.146	0.122	0.107	-0.006	
8	Stdev	80.2	0	0.010	0.016	0.025	0.027	0.022	0.030	0.157 + 0.030 mm*
9	MEP	80.2	0	0.75%	0.28%	0.24%	0.15%	0.11%	-0.01%	

*interval kepercayaan 68% dengan coverage factor :1



Gambar 7. Grafik penyimpangan ketelitian benda uji hasil printing sumbu x dengan variasi *step/unit* motor

Penyimpangan ketelitian dimensi benda hasil uji *printing* diawali adanya penyimpangan geometri yang bisa dievaluasi menggunakan pengukuran gerak *under no load* sumbu X ekstruder (Huang dkk, 2018).

Terjadi adanya perbedaan nilai penyimpangan ketelitian dengan dua metode antara pengukuran gerak *under no load* dan pengukuran CMM benda uji hasil *printing* diakibatkan karena beberapa faktor. Pada pengukuran gerak *under no load* hanya dipengaruhi oleh faktor *error* yang diakibatkan oleh kendala mekanik seperti elastisitas *timing belt*, keausan *guide rod* dan keausan *bushing* sumbu X yang berakibat pada penyimpangan posisi (Qin dkk, 2019).

Pada pengukuran ketelitian benda uji *printing* menggunakan CMM dipengaruhi oleh faktor lain seperti *shrinkage* atau penyusutan material PLA akibat dari proses pendinginan. Benda uji hasil *printing* memiliki panjang 120 mm. *Shrinkage* benda uji dengan nilai parameter 80,0 *step/unit motor* terjadi pada area 80 mm sampai dengan 120 mm dengan nilai 0,078 mm – 0,194 mm. Benda uji sepanjang titik awal 0 – 60 mm tidak terjadi *shrinkage*. *Shrinkage* material berpengaruh terhadap pengurangan dimensi benda pada bidang *printing* arah sumbu X dan Y. *Shrinkage* dapat diperbaiki dengan metode SCF (*Shrinkage Coefficient Factor*). Namun efek perbaikan dengan SCF ini menyebabkan ketelitian dimensi menjadi besar yaitu sekitar 0,552/60 mm untuk material PLA (Abdi dkk, 2018).

Metode optimasi kontrol *step/unit motor* dapat meningkatkan ketelitian dimensi benda uji *printing* tanpa harus modifikasi *G-Codes* maupun modifikasi 3D model CAD seperti yang dilakukan oleh penelitian yang sudah ada (Cajal dkk., 2016).

4. KESIMPULAN

Penelitian dengan membandingkan pengukuran *under no load* pada mesin FDM terhadap pengukuran pada benda hasil uji *printing* memiliki perbedaan hasil. Pengukuran *under no load* adalah pengukuran akurasi gerak sumbu X. Hal ini dikarenakan adanya faktor *shrinkage* pada material PLA, faktor . Akurasi pada hasil pengujian dapat disimpulkan bahwa:

1. Naiknya *repeatability* pada pergerakan ekstruder akan berpengaruh terhadap peningkatan nilai ketidakpastian hasil pengukuran benda uji *printing* namun dengan nilai yang sangat kecil yaitu 6 μm . Sedangkan turunnya *repeatability* berpengaruh terhadap turunnya nilai ketidakpastian dimensi hasil *printing*.
2. Penambahan nilai *step/unit* dari 80,0 sampai dengan 80,2 menyebabkan sistematik *error gerak under no load* meningkat sebesar 0,214 mm.
3. Penambahan nilai *step/unit* dari 80,0 sampai dengan 80,2 menyebabkan total *error* atau ketelitian dimensi benda uji meningkat sebesar 0,145 mm.
4. Nilai *shrinkage* diukur dari selisih akurasi ketelitian dimensi terhadap akurasi gerak ekstruder *under no load*. Berbeda dengan perhitungan *shrinkage* secara umum yang menghitung *shrinkage* sebagai perbedaan nilai ketelitian dimensi benda uji terhadap dimensi nominal desain CAD.
5. Akurasi gerak ekstruder berbanding terbalik dengan akurasi ketelitian dimensi benda uji. Hal ini dipengaruhi oleh mesin faktor penyusutan material PLA.
6. Kecepatan *feeding* dan diameter *nozzle* ditetapkan pada nilai tertentu sehingga bukan menjadi variabel yang dicari pengaruhnya terhadap ketelitian gerak mesin dan produk benda uji.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Abdi, Z., Alyasseri, A., Khader, A. T., Al-Betar, M. A., Papa, J. P., Alomari, O. A. and Makhadmeh, S. N. 2018. Analysis of Shrinkage Compensation Factor (SCF) of FDM uPrint SE for Accuracy Enhancement. *International Journal of Integrated Engineering*, 10(7), pp. 102–116.
- Begović, E., Plančić, I., Ekinović, S. and Ekinović, E. 2014. Laser Interferometry – Measurement and Calibration Method for Machine Tools. *3rd Conference “MAINTENANCE 2014”*, (September 2015), pp. 19–28.
- Berman, B. 2012. 3-D printing: The new industrial revolution, *Business Horizons*. Kelley School of Business, Indiana University. 55(2), pp. 155–162.
- Cajal, C., Santolaria, J., Samper, D. and Velazquez, J. 2016. Efficient volumetric error compensation technique for additive manufacturing machines. *Rapid Prototyping Journal*, 22(1), pp. 2–19.
- Cruz Sanchez, F. A., Boudaoud, H., Muller, L. and Camargo, M. 2014. Towards a standard experimental protocol for open source additive manufacturing: This paper proposes a benchmarking model for evaluating accuracy performance of 3D printers. *Virtual and Physical Prototyping*, 9(3), pp. 151–167.
- Huang, Z., Dantan, J. Y., Etienne, A., Rivette, M. and Bonnet, N. 2018. Geometrical deviation identification and prediction method for additive manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*, 24(9), pp. 1524–1538.
- Qin, Q., Huang, J. and Yao, J. 2019. A real-time adaptive look-ahead speed control algorithm for FDM-based additive manufacturing technology with Hbot kinematic system. *Rapid Prototyping Journal*, 25(6), pp. 1095–1107. doi: 10.1108/RPJ-11-2018-0291.
- Sadia, M., Alhnan, M. A., Ahmed, W. and Jackson, M. J. 2017. 3D printing of pharmaceuticals. *Micro and Nanomanufacturing*, 2, pp. 467–498. doi: 10.1007/978-3-319-67132-1_16.
- Schniederjans, D. G. and Yalcin, M. G. 2018. Perception of 3D-printing: analysis of manufacturing use and adoption. *Rapid Prototyping Journal*, 24(3), pp. 510–520. doi: 10.1108/RPJ-04-2017-0056.
- Valerga, A. P., Batista, M., Salguero, J. and Giroto, F. 2018. Influence of PLA filament conditions on characteristics of FDM parts. *Materials*, 11(8), pp. 2018–2022.