



PENGEMBANGAN MESIN 3D PRINTING BANGUNAN UNTUK MATERIAL SISA RERUNTUHAN BANGUNAN

*Andy Nurul Yunita Pettalolo¹, *Ibnu Abdul Rosid², & Alva Edy Tontowi³*

^{1,3} Teknik Industri, Universitas Gadjah Mada, Indonesia

² Teknik Industri, Universitas Jenderal Achmad Yani Yogyakarta, Indonesia

*andynurulyunita@gmail.com, *ibnuabdulrosid@unjaya.ac.id, alvaedytontowi@ugm.ac.id*

Correspondent authors : *ibnuabdulrosid@unjaya.ac.id

Abstrak: Pengembangan Mesin 3D Printing Bangunan Untuk Material Sisa Reruntuhan Bangunan.

Material reruntuhan bangunan dapat dimanfaatkan sebagai bahan bangunan yang digunakan untuk proses rekonstruksi. Teknologi yang dapat digunakan untuk melakukan rekonstruksi bangunan adalah teknologi 3D Printer FDM. Pada penelitian ini dikembangkan material untuk teknologi 3D Printer FDM dengan memanfaatkan *recycle material* yang tersusun berupa semen, *fly ash*, *clay*, superplasticizer dan air yang disebut *recycle concrete*, serta dilakukan optimasi parameter mesin 3D Printer untuk mendapatkan kombinasi parameter dengan error dimensi yang minimal. Penelitian ini dikembangkan mesin 3D Printer untuk konstruksi bangunan. Metode optimasi parameter menggunakan Fractional Factorial Design dengan 3 parameter dalam 2 level yaitu berupa print speed (100 mm/s dan 120 mm/s), layer height (6 mm dan 9 mm) serta kecepatan putaran ekstruder (30 rpm dan 40 rpm). Hasil optimasi didapatkan *layer height* berpengaruh signifikan terhadap error dimensi tinggi dan interaksi print speed dan kecepatan putaran ekstruder berpengaruh signifikan terhadap *error* dimensi tinggi, untuk mendapatkan error dimensi terkecil didapatkan dengan kombinasi parameter print speed sebesar 100 mm/s, layer height sebesar 6 mm, dan kecepatan putaran ekstruder sebesar 30 rpm dengan hasil error dimensi diameter sebesar 0,0671 dan error dimensi tinggi sebesar 0,0256.

Kata kunci : *Recycle Concrete*; 3D Printing; Rekonstruksi Bangunan; Optimasi; *Error Dimensi*.

Abstract: Building 3D Printing Machine Development for Building Ruins Residual Material.

Building ruins materials can be used as building materials used for the reconstruction process. The technology that can be used to reconstruct buildings is FDM 3D Printer technology. In this study, materials for 3D Printer FDM technology were developed by utilizing recycle materials composed of cement, fly ash, clay, superplasticizer and water, it called recycle concrete. Optimization of 3D Printer machine parameters was carried out to obtain a combination of parameters with minimal error dimension. This research developed 3D Printer Machine for building construction. The parameter optimization method used Fractional Factorial Design with 3 parameters and 2 levels, it were explained by print speed (100 mm/s and 120 mm/s), layer height (6 mm and 9 mm) and extruder rotation speed (30 rpm and 40 rpm). The optimization results obtained layer height has a significant effect on high dimensional errors and the interaction of print speed and rotational speed of the extruder has a significant effect on high dimensional errors, to get the smallest dimensional error obtained with a combination of print speed parameters of 100 mm/s, layer height of 6 mm, and The extruder rotation speed is 30 rpm with a diameter dimension error of 0.0671 and a height dimension error of 0.0256.

Keywords : *Recycle Concrete*; 3D Printing; Building Reconstruction; Optimization; *Error Dimension*.

History & License of Article Publication:

Received: 23/04/2022 **Revision:** 15/06/2022 **Published:** 26/06/2022

DOI: <https://doi.org/10.37971/radial.v10i1.226>



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

PENDAHULUAN

Gempa bumi merupakan salah satu bencana alam yang menyebabkan kerusakan pada infrastruktur (Amri et al., 2016; Oluwafemi et al., 2018). Hasil kajian Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB) didapatkan risiko jumlah jiwa terdampak bencana gempa bumi sebesar 86.247.258 jiwa dengan kerugian lebih dari Rp. 466 triliun (Amri et al., 2016). Tindakan yang dilakukan untuk penanganan dampak bencana gempa bumi adalah pemulihan (rekonstruksi) infrastruktur bangunan. Permasalahan dalam proses rekonstruksi adalah proses pengerjaan yang membutuhkan waktu yang lama, sebagai contoh pada rekonstruksi akibat gempa bumi di Nias, dibutuhkan waktu hingga 48 bulan (Ophiyandri, 2011). Selain itu juga terkendala dengan ketersediaan material bangunan yang tersedia di area terdampak bencana (Wibowo, 2015). Sehingga diperlukan solusi untuk menangani masalah tersebut. Salah satu hal yang dapat dilakukan untuk mengatasi tidak tersedianya material bangunan adalah menggunakan material sisa reruntuhan (*recycle concrete material*) untuk di daur ulang yang digunakan untuk material rekonstruksi (Zhao, Wang, & Liu, 2013). Saat ini teknologi dalam proses pembangunan konstruksi terus berkembang (Imran, 2018), salah satu teknologi yang dapat digunakan untuk proses rekonstruksi adalah Teknologi 3D Printing (Pettalolo, Rosid, & Tontowi, 2020). Teknologi 3D Printing memiliki berbagai kelebihan, diantaranya dapat digunakan diberbagai kondisi lingkungan, perakitan mesin yang relatif mudah, dapat digunakan untuk membuat produk dengan skala struktur yang besar (Yin, Qu, Zhang, & Lim, 2018), waktu pengerjaan dan biaya yang optimal (Hossain, Zhumabekova, Paul, & Kim, 2020; Malaeb et al., 2015), lebih aman untuk digunakan (Hager, Golonka, & Putanowicz, 2016). Adapun salah satu permasalahan dalam implementasi Teknologi 3D Printer di bidang konstruksi bangunan adalah belum tersedianya material yang secara jelas dapat digunakan untuk material bangunan (*concrete material*), sehingga diperlukan kombinasi beberapa campuran material (Tay et al., 2017). Pada penelitian Rosid and Tontowi (Rosid & Tontowi, 2021) dilakukan modifikasi mesin 3D Printer FDM untuk material berupa pasta biokomposit, pada penelitian tersebut menggunakan pendekatan optimasi 2^k *fractional factorial design*.

Pada proses pembuatan produk menggunakan Teknologi 3D Printing menggunakan konsep lapis demi lapis (*layer by layer manufacturing*). Desain produk dibuat menggunakan *Computer Aided Design* (CAD). File tersebut disimpan dalam bentuk *file* STL yang kemudian dilakukan pengirisan (*slicing*) menggunakan *software slicer* (Abdulhameed, Al-Ahmari, Ameen, & Mian, 2019). Material untuk mesin 3D Printer dengan memanfaatkan material sisa (*recycle concrete*) (Pettalolo et al., 2020), material tersebut dikombinasikan dengan komposisi material lain berupa *fly ash*, semen dan air. Material tersebut diuji coba menggunakan *piping bag* untuk mengetahui kemampuan material untuk dapat keluar melalui

nozzle dengan besar diameter *nozzle* tertentu, namun belum diuji coba menggunakan mesin. Adapun salah satu kendala dalam penggunaan material *concrete* untuk mesin 3D Printer adalah pada proses *pumping* material (Nair et al., 2020). Sehingga pada penelitian ini dilakukan pengembangan material *recycle concrete* serta mesin 3D Printer untuk bangunan yang menggunakan material *recycle concrete* yang dapat dicetak (*printable*). Adapun teknologi 3D Printer yang digunakan adalah *Fused Deposition Modeling* (FDM) (Nematollahi, Xia, & Sanjayan, 2017).

METODE

Material

Material *recycle concrete* dikembangkan untuk dapat didorong keluar melalui *nozzle* (mampu keluar) atau dapat ditekan (*printable*) (Nair et al., 2020), serta memiliki kemampuan membentuk benda kerja secara *layer by layer*. Sehingga diperlukan untuk menentukan jenis material penyusun dan jumlahnya. Material terdiri atas semen, *fly ash*, *recycle concrete* (agregat halus), *clay*, *superplasticizer* dan air. Kombinasi material tersebut dikembangkan dengan melakukan eksperimen menggunakan metode *pilot study* (Pettalolo et al., 2020). Jumlah penentuan semen didasarkan pada penelitian terdahulu (Le et al., 2012; Malaeb et al., 2015), dengan dasar tersebut kemudian dilakukan *pilot study* untuk mendapatkan variasi dari komposisi material, sehingga didapatkan beberapa kombinasi komposisi material *recycle concrete* (Tabel 1) Kombinasi komposisi yang ditentukan kemudian dilakukan uji coba kemampuan tekan untuk keluar melalui *nozzle* untuk mengetahui kemampuan ekstruksi dan mampu bentuk dari material tersebut.

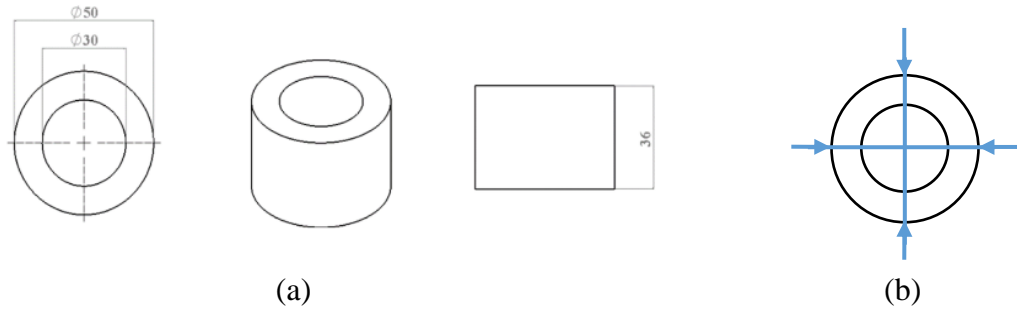
Tabel 1. Komposisi dan Kombinasi Material

	Kombinasi material					
	I	II	III	IV	V	VI
<i>Rec. mat.</i> (gr)	500	500	500	500	500	500
Semen (gr)	350	350	350	165	165	165
<i>Fly ash</i> (gr)	100	100	100	60	60	60
Air ¹	0,67	0,56	0,56	0,48	0,42	0,32
Sp ² (%)	-	1,43	0,76	0,64	0,64	0,50
<i>Clay</i> ³ (%)	-	-	-	50	50	67
Mampu Keluar	X	√	√	√	√	√
Mampu bentuk	X	X	√	√	√	√

(sumber : hasil eksperimen)

Design of Experiment

Objek penelitian berbentuk silinder dengan dimensi 50 x 36 mm, dengan tebal dinding spesimen sebesar 10 mm yang disesuaikan dengan diameter *nozzle*. Desain dibuat dengan menggunakan CAD.



(Sumber : hasil perancangan dimensi spesimen)

Gambar 1. (a) Dimensi Spesimen, (b) Titik Pengukuran Dimensi Diameter dan Tinggi

Perhitungan *error* dimensi menggunakan dimensi hasil *printing* (D_1) dengan dimensi pada desain CAD (D_0). Sehingga didapatkan nilai *error* dimensi (Almy & Tontowi, 2018).

$$\text{Error dimensi (\%)} = \left[\left[\frac{D_0 - D_1}{D_1} \right] \times 100\% \right] \quad (1)$$

Pengukuran diameter dan tinggi spesimen dilakukan dengan mengukur dimensi sebanyak 2 titik pengukuran yang bersilangan untuk meminimalkan bias hasil pengukuran (Gambar 1). Hasil *pilot study* didapatkan nilai *level* untuk setiap parameter (Tabel 2). Nilai tersebut digunakan untuk input pada proses *generate design of experiment*.

Tabel 2. Parameter dan Level Optimasi

Parameter	-	+	Satuan	Penentuan Nilai
Print Speed (PS)	100	120	mm/s	Ditentukan berdasarkan hasil <i>pilot study</i> dan studi literatur
Layer Height (LH)	6	9	mm	Ditentukan berdasarkan Studi literatur
Putaran Ekstruder (PE)	30	40	rpm	Ditentukan berdasarkan <i>pilot study</i> kemampuan ekstruder untuk mendorong material

(Sumber : hasil eksperimen)

Generate kombinasi parameter menggunakan *software* Minitab, didapatkan kombinasi parameter sejumlah 12 *run time* (Tabel 3). Hasil dari *generate* digunakan untuk *input* program pada mesin 3D Printer FDM *Building Customized*.

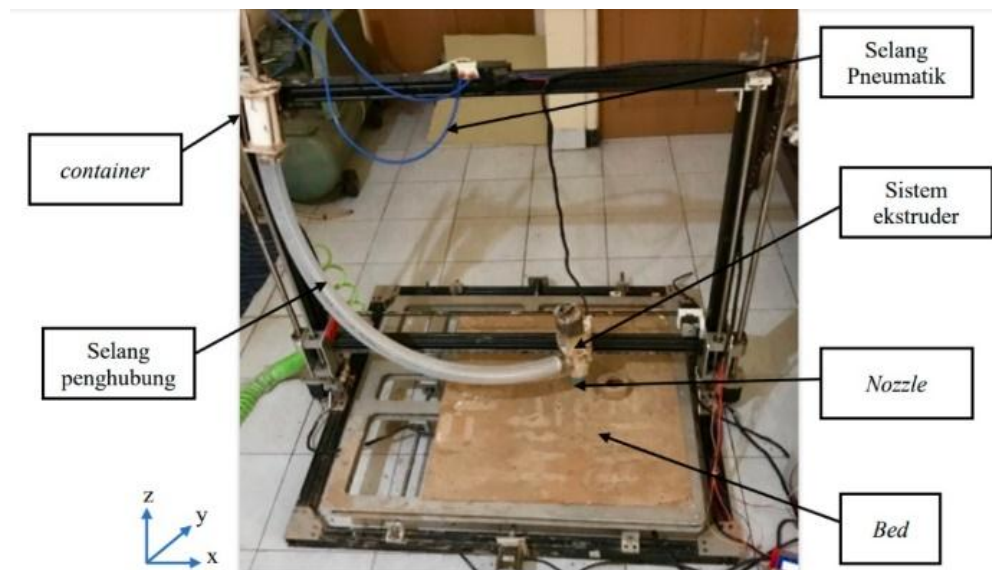
Tabel 3. *Design of Experiment* Penelitian

RT	PS	LH	PE	PS (mm/s)	LH (mm)	PE (rpm)
1	-1	-1	+1	100	6	40
2	+1	-1	-1	120	6	30
3	-1	+1	-1	100	9	30
4	+1	+1	+1	120	9	40
5	-1	-1	+1	100	6	40
6	+1	-1	-1	120	6	30
7	-1	+1	-1	100	9	30
8	+1	+1	+1	120	9	40
9	-1	-1	+1	100	6	40
10	+1	-1	-1	120	6	30
11	-1	+1	-1	100	9	30
12	+1	+1	+1	120	9	40

(sumber : hasil eksperimen)

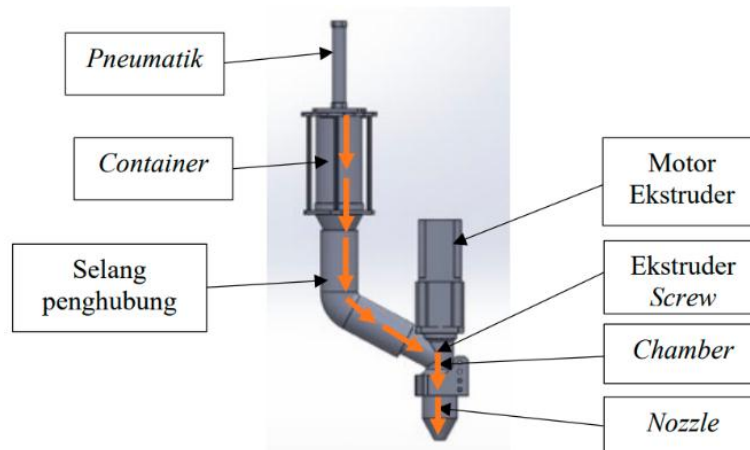
Mesin

Mesin 3D Printer *Building Customized* terdiri dari beberapa bagian (Gambar 2), diantaranya adalah *container* material, selang penghubung, sistem penumatik, sistem ekstruder dan *bed*. Pada *container* material terdapat pneumatik untuk mendorong material dari *container* ke sistem ekstruder yang dihubungkan dengan selang penghubung.



Gambar 2. Mesin 3D Printer FDM *Customized* (sumber : perancangan mesin)

Pada sistem ekstruder terdiri dari *extruder screw* yang diputar dengan menggunakan motor untuk mendorong material pada *chamber* ekstruder keluar melalui *nozzle* (Gambar 3). Diameter *nozzle* ditentukan dengan melakukan *pilot study* yang didasarkan dari penelitian Yin *et al.* (2018), dimana diameter *nozzle* antara 9 mm hingga 20 mm.



Gambar 3. Skema sistem ekstruksi (sumber : hasil perancangan sistem ekstrusi)

sehingga dilakukan uji coba dengan *nozzle* berdiameter 20 mm, 15 mm dan 10 mm, dengan pertimbangan kemampuan material keluar dari *nozzle* dengan diameter *nozzle* terkecil, maka ditentukan diameter *nozzle* sebesar 10 mm. adapun dimensi *container* dan sistem input material didesain untuk dapat menekan masuk material dari *container* menuju *chamber* ekstruder. Sistem ekstruksi terdiri atas *chamber* ekstruder, *extruder screw* dan *nozzle*

ekstruder. Proses ekstruksi memanfaatkan putaran *extruder screw* untuk mendorong material keluar melalui *nozzle* (gambar 3).

Proses *Printing*

File CAD disimpan dalam bentuk STL (.stl) kemudian dilakukan proses *slicing* menggunakan *software slicer* Repetier-Host. Pada proses *slicing* ditentukan parameter dan *level* sesuai pada hasil *pilot study* (tabel III). Hasil dari *slicer* adalah file g-code, *file* tersebut digunakan sebagai *input* program pada mesin 3D Printing. Adapun sebelum proses *running printing*, dilakukan input material *recycle concrete* pada *container* material. Material dimasukkan ke dalam *container material* dan dipasangkan pneumatik. *Screw extruder* diputar dengan menggunakan motor dan material didorong dengan *setting* tekanan pneumatik sebesar 2 kg/cm² hingga 3 kg/cm². Ketika material sudah keluar melalui *nozzle*, proses *printing* dilakukan (Gambar 4). Setelah material selesai dicetak, maka dilakukan *resting* material selama 24 jam agar kadar air material turun dan material memiliki viskositas yang lebih tinggi untuk dilakukan pengukuran dimensi tinggi dan diameter.



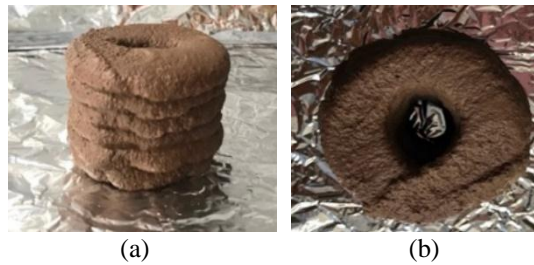
Gambar. 4 Proses *Printing* (sumber: hasil uji coba)

Analisis statistik

Hasil pengukuran kemudian dilakukan analisis statistik. Pengolahan data menggunakan bantuan *software* Minitab. Adapun pada tahap ini dilakukan analisis regresi, Analisis R², ANOVA dan optimasi parameter untuk mendapatkan hasil *printing* dengan *error* dimensi terkecil. Kemudian dilakukan optimasi parameter untuk mendapatkan *error* dimensi terkecil berdasarkan eksperimen yang telah dilakukan. Tahap selanjutnya dilakukan analisis terhadap hasil optimasi untuk mengetahui parameter *printing* untuk mendapatkan spesimen hasil *printing* dengan *error* dimensi terkecil.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil printing menggunakan Mesin 3D Printer FDM *Build Customized* untuk material *recycle concrete* dengan 2^k *fractional factorial design* didapatkan hasil printing dengan bentuk yang beragam (Gambar 5).



Gambar 5. Contoh Spesimen Hasil Printing (a) Tampak Depan dan (b) Tampak Atas (sumber : hasil uji coba)

Hasil pengukuran didapatkan dimensi spesimen yang beragam (tabel 4). Adapun rata-rata *error* dimensi untuk dimensi tinggi sebesar 0,035 dan diameter sebesar 0,120.

Tabel 4 Dimensi Hasil *Printing* (sumber : hasil pengolahan data)

Run time	Error dimensi	
	Diameter	Tinggi
1	0,049	0,011
2	0,136	0,027
3	0,140	0,054
4	0,229	0,07
5	0,118	0,004
6	0,098	0,016
7	0,185	0,068
8	0,175	0,072
9	0,045	0,031
10	0,125	0,004
11	0,020	0,007
12	0,120	0,058

Pada hasil analisis statistik untuk menguji normalitas data, didapatkan P-Value untuk *error* dimensi tinggi lebih dari nilai α , sehingga disimpulkan secara statistik kedua data tersebut gagal menolak H_0 atau data berdistribusi normal (tabel 5).

Tabel 5. P-Value Normalitas Data (sumber : hasil pengolahan data)

<i>Error</i> dimensi	P-Value	Alpha
Tinggi	0,079	0,05
Diameter	0,690	0,05

Sedangkan pada hasil analisis statistik untuk menguji homogenitas data, didapatkan P-Value untuk *error* dimensi tinggi lebih dari nilai α , sehingga disimpulkan secara statistik kedua data tersebut gagal menolak H_0 atau data homogen (tabel 6).

Tabel 6. P-Value Homogenitas Data (sumber : hasil pengolahan data)

<i>Error dimensi</i>	P-Value	Alpha
Tinggi	0,562	0,05
Diameter	0,623	0,05

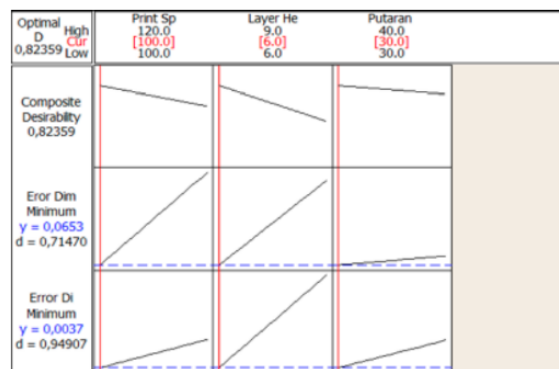
Model Regresi

Adapun didapatkan model regresi *Error Dimensi Diameter* (EDD) dan model regresi *Error Dimensi tinggi* (EDT)

$$EDD = -0,322 + 0,0027 PS + 0,0166 LH + 0,0005 KPE \quad (2)$$

$$EDT = -0,170 + 0,0006 PS + 0,0131 LH + 0,0012 KPE \quad (3)$$

Pada analisis R^2 , didapatkan nilai R^2 untuk *error* dimensi tinggi sebesar 66,08 % dan *error* dimensi diameter sebesar 39,89 %. Pada Uji ANOVA pada *error* dimensi diameter didapatkan nilai P-Value pada seluruh parameter uji lebih besar dibanding nilai α (0,05). Maka disimpulkan bahwa seluruh parameter uji tidak berpengaruh secara signifikan terhadap respon. Sedangkan pada Uji ANOVA pada *error* dimensi diameter didapatkan nilai P-Value pada parameter *Layer Height* didapatkan nilai lebih kecil dari pada nilai α . Sehingga disimpulkan *Layer Height* berpengaruh signifikan terhadap respon. Sedangkan parameter *Print Speed* dan Kecepatan Putaran Ekstruder memiliki nilai P-Value lebih besar dari pada α , sehingga disimpulkan kedua parameter tersebut tidak berpengaruh signifikan terhadap respon.



Gambar 5. Parameter Optimasi (sumber : hasil pengolahan data)

Pada hasil *running* pada *software* Minitab, didapatkan kombinasi parameter untuk mendapatkan hasil printing dengan *error* dimensi terkecil. Adapun kombinasi parameter tersebut yaitu *print speed* sebesar 100 mm/s, *layer height* sebesar 6 mm dan kecepatan putaran ekstruder sebesar 30 rpm, dengan nilai *desirability* sebesar 0,82359. Hasil optimasi kemudian dilakukan *running* printing untuk mengetahui perbaikan hasil printing setelah dilakukan optimasi parameter. Pada hasil optimasi printing didapatkan rata-rata *error*

dimensi spesimen untuk *error* dimensi diameter sebesar 0,0671. Sedangkan *error* dimensi tinggi sebesar 0,0256 (tabel 7).

Tabel 7. *Error* Dimensi Hasil Optimasi (sumber : hasil pengolahan data)

	Replikasi			Rata-rata
	I	II	III	
EDD	0,0847	0,0649	0,0516	0,0671
EDT	0,0201	0,0243	0,0323	0,0256

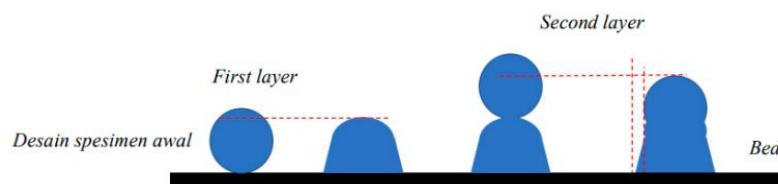
Dimensi spesimen hasil optimasi kemudian dibandingkan dengan dimensi spesimen hasil eksperimen. Hasil perbandingan didapatkan *error* dimensi diameter untuk diameter lebih kecil dibandingkan hasil eksperimen yaitu memiliki *gap* sebesar 0,0529 dan *error* dimensi tinggi sebesar 0,0095 (Tabel 8).

Tabel 8. *Gap Error* Dimensi Hasil Eksperimen dan Hasil Optimasi (sumber : hasil pengolahan data)

	Hasil optimasi	Hasil eksperimen	<i>Gap</i>
EDD	0,0671	0,1200	0,0529
EDT	0,0256	0,0351	0,0095

Analisis *error* dimensi

Pada hasil pengamatan, spesimen masih memiliki viskositas yang rendah. Pada saat material keluar melalui *nozzle*, hal tersebut menyebabkan material *printing* mengalami degradasi dan tidak membentuk sesuai dengan bentuk dan dimensi pada desain. Sehingga menyebabkan dimensi hasil cetak yang bervariasi, yaitu penurunan tinggi material dan kecenderungan material turun (melebar), sehingga dimensi diameter menjadi lebih besar (gambar 6). Adanya variasi tersebut menghasilkan hasil pengukuran berbeda dengan desain spesimen pada CAD. Pada bagian sisi arah x dan y terjadi ketidaklinearan pada garis referensi pada desain. Pada dimensi arah z juga mengalami ketidaksesuaian dengan desain CAD. Hal tersebut menyebabkan dimensi hasil cetak tidak sesuai dengan dimensi pada desain spesimen.



Gambar 6. Visualisasi *Error* Dimensi Pada Proses *Printing* Material (sumber : hasil pengolahan data)

Pada hasil pengamatan visual juga didapatkan informasi berupa adanya penurunan material ke arah x dan y (melebar), sehingga dimensi tinggi (arah z) mengalami penurunan. Pada bagian antar *layer* didapatkan celah, hal tersebut disebabkan karena bentuk lubang *nozzle* yang berbentuk lingkaran, sehingga menghasilkan bentuk material yang keluar melalui

nozzle terbentuk mendekati lingkaran. Hal tersebut menyebabkan material ketika membentuk pada *next layer* menghasilkan bentuk yang tidak rata (gambar 7).



Gambar 6. Visualisasi *Error Dimensi* Pada Proses *Printing Material* (sumber : hasil pengolahan data)

KESIMPULAN

Adapun pada penelitian ini didapatkan kesimpulan yaitu material *recycle concrete* atau sisa reruntuhan yang dikombinasikan dengan material lain, dengan komposisi *recycle material*, semen sebesar 33% (w/w), *fly ash* 12% (w/w), superplatisizer 0,50%, rasio air 0,32 dan clay 67%(w/w) dapat dicetak menggunakan mesin 3D Printer FDM *Customized*. Adapun desain sistem ekstruksi didesain agar dapat melakukan proses *printing material* yang berupa *recycle concrete*. Spesimen hasil printing memiliki dimensi dan bentuk yang tidak sama dengan desain CAD (*error dimensi*). Hasil optimasi didapatkan kombinasi parameter untuk mendapatkan *error dimensi* hasil printing terkecil, yaitu *print speed* sebesar 100 mm/s, *layer height* sebesar 6 mm dan kecepatan putaran ekstruder sebesar 30 rpm, dengan hasil berupa *error dimensi* diameter sebesar 0,0671 dan *error dimensi* tinggi sebesar 0,0256. Pada hasil analisis statistik menunjukkan bahwa parameter *layer height* berpengaruh signifikan terhadap *error dimensi* tinggi dan interaksi *print speed* dan kecepatan putaran ekstruder berpengaruh signifikan terhadap *error dimensi* tinggi. Sedangkan untuk parameter *print speed*, *layer height*, dan kecepatan putaran ekstruder tidak berpengaruh signifikan terhadap *error dimensi* diameter, serta interaksinya tidak ada yang berpengaruh terhadap *error dimensi* diameter. Adapun pada penelitian ini didapatkan beberapa saran, yaitu diperlukan uji *compression strength* yang bertujuan untuk mengetahui kekuatan kompresi hasil printing. Pengembangan material untuk mendapatkan material yang memiliki kemampuan *pumping material* lebih baik. Menambahkan parameter lain untuk dimasukkan sebagai parameter uji untuk mendapatkan hasil optimasi yang lebih komprehensif, serta mengembangkan kontainer material yang memiliki kapasitas lebih besar untuk meningkatkan volume printing.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdulhameed, O., Al-Ahmari, A., Ameen, W., & Mian, S. H. (2019). Additive Manufacturing: Challenges, Trends, and Applications. *Advances in Mechanical Engineering*, 11(2), 1–27. <https://doi.org/10.1177/1687814018822880>
- Almy, R. D., & Tontowi, A. E. (2018). The Effect of 3D Printing Machine Parameters in Extrusion Process of Biocomposite Materials (PMMA and HA) on Dimensional Accuracy. *SINERGI*, 22(2), 83–90. <https://doi.org/doi.org/10.22441/sinerigi.2018.2.003>
- Amri, M. R., Yulianti, G., Yunus, R., Wiguna, S., W. Adi, A., Ichwana, A. N., ... Septian,

- R. T. (2016). RBI (Risiko Bencana Indonesia). In R. Jati & M. R. Amri (Eds.), *InaRISK BNPB*. Retrieved from inarisk.bnpb.go.id
- Hager, I., Golonka, A., & Putanowicz, R. (2016). 3D Printing of Buildings and Building Components as the Future of Sustainable Construction? *Procedia Engineering*, *151*, 292–299. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.357>
- Hossain, M. A., Zhumabekova, A., Paul, S. C., & Kim, J. R. (2020). A review of 3D printing in construction and its impact on the labor market. *Sustainability*, *12*(20), 1–21. <https://doi.org/10.3390/su12208492>
- Imran, M. (2018). Material Konstruksi Ramah Lingkungan dengan Penerapan Teknologi Tepat Guna. *Jurnal Peradaban Sains, Rekayasa Dan Teknologi*, *6*(2), 146–157.
- Le, T. T., Austin, S. A., Lim, S., Buswell, R. A., Gibb, A. G. F., & Thorpe, T. (2012). Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, *45*(8), 1221–1232. <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9828-z>
- Malaeb, Z., Hachem, H., Tourbah, A., Maalouf, T., El Zarwi, N., & Hamzeh, F. (2015). 3D Concrete Printing: Machine and Mix Design. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, *6*(April), 14–22. Retrieved from www.iaeme.com/Ijciect.asp
- Nair, A., Aditya, S. D., Adarsh, R. N., Nandan, M., Dharek, M. S., Sreedhara, B. M., ... Sreekeshava, K. S. (2020). Additive Manufacturing of Concrete: Challenges and opportunities. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *814*(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/814/1/012022>
- Nematollahi, B., Xia, M., & Sanjayan, J. (2017). Current progress of 3D concrete printing technologies. *The 34th International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, (June), 260–267. <https://doi.org/10.22260/isarc2017/0035>
- Oluwafemi, J. O., Ofuyatan, O. M., Sadiq, O. M., Oyebisi, S. O., Abolarin, J. S., & Babaremu, K. O. (2018). Review of world earthquakes. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, *9*(9), 440–464.
- Ophiyandri, T. (2011). Community-Based Post-Disaster Housing Reconstruction: Examples from Indonesia. In D. Amaratunga & R. Haigh (Eds.), *Post-Disaster Reconstruction of the Built Environment: Rebuilding for Resilience* (pp. 91–116). <https://doi.org/10.1002/9781444344943.ch6>
- Pettalolo, A. N. Y., Rosid, I. A., & Tontowi, A. E. (2020). Pengembangan Material Reusable Concrete untuk 3DP Building. *Conference SENATIK STT Adisutjipto Yogyakarta*, *6*, 59–66. <https://doi.org/10.28989/senatik.v6i0.414>
- Rosid, I. A., & Tontowi, A. E. (2021). Parameter Optimization of Customized FDM 3D Printer Machine for Biocomposite Material [Sago/PMMA] Using 2k Fractional Factorial Design. *OPSI*, *14*(2), 188–196. <https://doi.org/https://doi.org/10.31315/opsi.v14i2.5352>
- Tay, Y. W. D., Panda, B., Paul, S. C., Noor Mohamed, N. A., Tan, M. J., & Leong, K. F. (2017). 3D Printing Trends in Building and Construction Industry: a Review. *Virtual and Physical Prototyping*, *12*(3), 261–276. <https://doi.org/10.1080/17452759.2017.1326724>
- Wibowo, A. P. (2015). Aplikasi Material Bekas Pakai Pada Rekonstruksi Rumah Tinggal Pasca Bencana Alam Gempa Bumi. *Konferensi Nasional Teknik Sipil 9*, *9*, 601–606.

Makassar: Komda VI BMPTTSSI.

Yin, H., Qu, M., Zhang, H., & Lim, Y. C. (2018). 3D Printing and Buildings: A Technology Review and Future Outlook. *Technology Architecture and Design*, 2(1), 94–111. <https://doi.org/10.1080/24751448.2018.1420968>

Zhao, X., Wang, Q., & Liu, Y. (2013). A review on the properties of bricks prepared with recycled waste materials - Postearthquake waste consideration. *Advanced Materials Research*, 661, 108–111. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.661.108>

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Anggono Supriyambodo selaku Laboran pada Laboratorium Desain Produk and Bioceramics DTMI UGM yang telah membantu menyiapkan fasilitas untuk mendukung penelitian.