

PERANCANGAN 3D PRINTING CARTESIAN BERBASIS *FUSED DEPOSITION MODELLING* DENGAN UKURAN 200 X 200 X 200 mm

Herman Budi Harja¹, Erfin Erfiansyah², Novi Saksono³, Risky Ayu Febriansyah⁴ dan Mohammad Fauzi⁵

^{1,2,3,4,5}Politeknik Manufaktur Bandung

¹herman@polman-bandung.ac.id, ²erfin@gmail.com, ³novi@polman-bandung.ac.id, ⁴rizky@polman-bandung.ac.id, ⁵fauzi@polman-bandung.ac.id

Abstrak

Teknologi *adding manufacturing* atau 3D *printing* merupakan salah satu isu utama dalam konsep teknologi 4.0. Rancangan konstruksi dan defleksi konstruksi mesin sangat berpengaruh terhadap capaian kecermatan dimensi dan bentuk hasil produk *printing*. Penelitian ini bertujuan memperoleh rancangan konstruksi mesin 3D printing tipe cartesian berbasis *fused deposition modelling*, serta melakukan verifikasi nilai maksimum defleksi pada aksis mesinnya. Metoda perancangan dilakukan menggunakan VDI222, analisis perhitungan dan simulasi *finite element analysis* (FEA) menggunakan *software* CAE *Solidworks* untuk memverifikasi kekuatan dan defleksi konstruksi rancangan mesin. Hasil kajian perancangan konstruksi mesin 3D printing telah diperoleh sesuai tuntutan. Nilai defleksi masimum telah terverifikasi sebesar 0,036 mm sehingga kesalahan maksimum dimensi dan bentuk hasil proses cetak produk setiap lapisan memenuhi standar. Selain itu nilai defleksi maksimum yang terjadi masih terakomodir oleh nilai kelonggaran *radial* setiap *bearing* aksis mesin yang dipilih.

Kata Kunci: *Adding manufacturing, Defleksi, Kelonggaran radial, Rancangan konstruksi, VDI222.*

Abstract

The technology of adding manufacturing or 3D printing is one of the main issues in the concept of technology 4.0. The construction design of the 3D printing machine and the deflection of its construction significantly affect the accuracy of the dimension and shape the printed product. The study aims to obtain a construction design of a cartesian type 3 D printing machine based on fused deformation modelling, and to verify the maximum value of the deflection of the machine axis. The study method used VDI222, calculation analysis, and Finite Element Analysis (FEA) simulation using CAE Solidworks software to verify the strength and deflection of the machine design construction. The study results show the construction design of 3D printing machine has been obtained according to the requirement. The verified maximum deflection value is 0.036 mm, hence the maximum error in the dimensions and shape of the printed product for each layer will still be within the standard tolerance. In addition, its maximum deflection value is verified within the radial clearance value of each determined machine axis bearing.

Keywords: *Adding manufacturing, Deflection, Radial clearance, Construction design, VDI222.*

I. PENDAHULUAN

Adding manufacturing atau teknologi 3D *printing* merupakan salah satu terobosan inovasi terkini dalam konsep teknologi Industri 4.0. untuk menghasilkan suatu model dasar produk/ prototipe dalam bentuk fisik secara cepat (More, 2013; Gibson, dkk., 2015). Saat ini penerapan mesin 3D *printing* tidak hanya untuk penggunaan proses *rapid prototyping*, tetapi telah digunakan untuk proses pembuatan produk di industri dan bahkan memungkinkan melakukan proses produksi di rumah (Rayna & Striukova, 2016). *Selected Laser Sintering* (SLS) dan *Fused Deposition Modelling* (FDM) merupakan dua teknologi yang umum digunakan di mesin 3D *printing* (Al-Maliki, 2015). Kajian Wohlers memprediksi kebutuhan mesin 3D *printing* di dunia dan termasuk di Indonesia akan semakin meningkat, terutama mesin 3D *printing* tipe *Fused Deposition Modelling* (FDM) yang memiliki kelebihan kemudahan pengoperasian dan harga investasi yang terjangkau (Kusuma, dkk, 2016) (Ismianti & Herianto, 2020).

Teknologi *additive manufacturing* pada tipe FDM adalah berbasis bahan padat (*solid materials*) dengan mekanisme sistem pencetakan menggunakan teknik ekstrusi yang sederhana, biaya investasi terjangkau dan menunjang berbagai macam bahan polimer. Filamen dipanaskan hingga mencapai temperature lebur/leleh dan diekstrusi melalui *nozzle* mesin.

Mesin 3D *printing* berbasis FDM memiliki suatu kelemahan, salah satunya yaitu bahan filamen plastik yang diekstrusi cenderung terdistorsi mengalami penyusutan, melengkung dan bahkan terlepas dari meja cetak (Alsoufi dan Elsayed, 2017). Lengkungan atau bengkokan (*warping*) biasanya terjadi pada lapisan dasar objek cetak dan disebabkan oleh laju pendinginan objek cetak yang tidak merata. Salah satu cara untuk mencegah kemungkinan terjadinya hal tersebut adalah dengan menggunakan meja cetak berpemanas (Redwood, dkk., 2017).

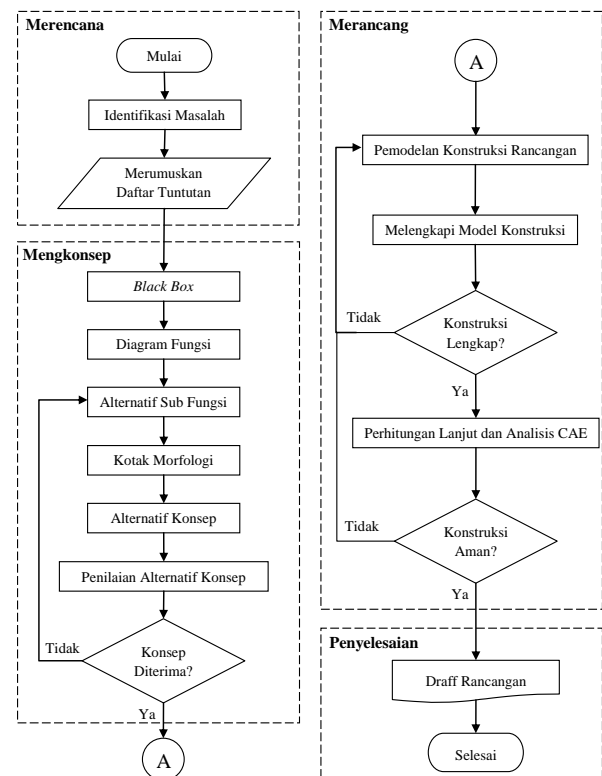
Kajian terhadap topik penelitian mesin 3D *printing* telah banyak dilakukan. Beberapa kajian berfokus pada kecenderungan peningkatan *demand*, tipe teknologi cetak yang sederhana dan terjangkau, hingga kajian permasalahan laju pendinginan obyek cetak. Pada topik penelitian ini belum disajikan kajian perancangan mesin 3D *printing* tipe FDM hingga verifikasi dan nilai defleksi maksimum yang terjadi pada sepanjang pergerakan aksis mesin.

Penelitian ini bertujuan memperoleh rancangan konstruksi mesin 3D *printing* dan melakukan verifikasi nilai defleksi maksimum konstruksi aksis

mesin pada saat bergerak di sepanjang lintasan pergerakan aksis. Hal ini terkait dengan pengaruhnya terhadap (i) capaian kualitas dimensi dan bentuk hasil cetak produk dan (ii) fungsi tumpuan berputar/*bearing* aksis yang memiliki batas maksimum kelonggaran radial.

II. METODE

Setiap tahapan perancangan mesin 3D *printing* dilakukan menggunakan metoda perancangan VDI 2222 (*Verein Deutcher Ingenieure*) mulai dari merencana, mengonsep, merancang dan penyelesaian. Gambar. 1 menunjukkan diagram alir proses perancangan mesin 3D *printing*. Secara detail VDI 2222 mengarahkan perancangan mulai dari identifikasi masalah, memunculkan daftar tuntutan, pemetaan fungsi mesin, membuat alternatif fungsi bagian, membuat alternatif fungsi kombinasi dan menilai serta memilih konsep terbaik, mendetailkan konstruksi dan melakukan verifikasi perhitungan kebutuhan daya penggerak dan termasuk verifikasi nilai maksimum defleksi yang terjadi pada konstruksi aksis mesin. Perhitungan defleksi juga dilakukan melalui simulasi *finite element analysis* menggunakan *software* CAE *Solidworks* (



Gambar 1. Diagram alir proses perancangan mesin 3D *printing*.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

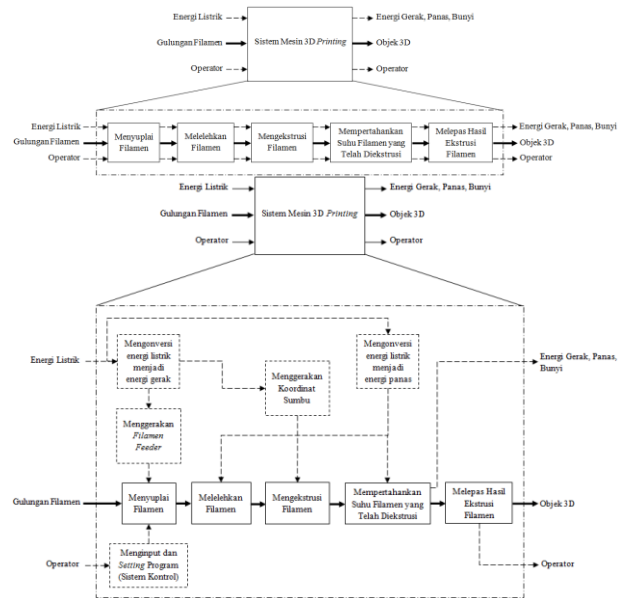
Konstruksi Hasil Perancangan

Pada tahapan pertama dalam metode perancangan VDI 2222 ialah proses perencanaan dengan luaran berupa daftar tuntutan dari identifikasi masalah/kebutuhan yang menjadi acuan dalam mendesain mesin. Pada Tabel 1 ditunjukkan daftar tuntutan pada mesin 3D printing.

Tabel 1. Daftar Tuntutan

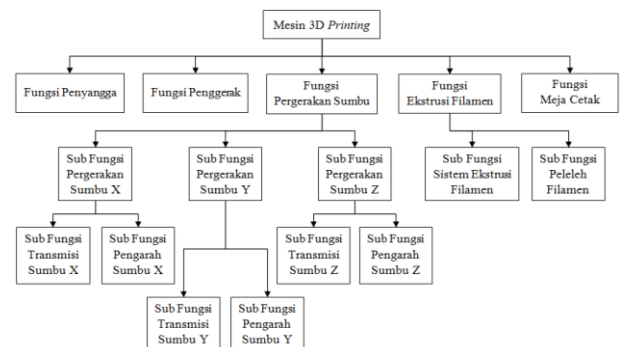
No	Tuntutan	Kualifikasi	Prioritas
1	Tuntutan kriteria mesin		
	Teknologi Mesin	FDM	***
	Tipe Mesin	Cartesian	***
	Jumlah Sumbu	3	***
	Diameter Filamen	1,75 mm	***
2	<i>Travelled axis</i>		
	Bobot konstruksi	Ringan dan kuat	**
	<i>Travelled axis (X, Y, Z) mm</i>	220, 220, 220	**
	<i>Bed mesin</i>	Berpemanas	**
	<i>Feed rate arah horizontal</i>	40-100 mm/detik	**
	<i>Feed rate arah vertical</i>	4-10 mm/detik	**
	Kesalahan dimensi produk	0,1 mm	***
3	Tuntutan lainnya		
	Part mesin <i>available</i>	Part penyusun available di pasaran	**
	<i>Manufacturable</i>	Memungkinan dapat dibuat	**
	Mudah dalam perakitan	Jenis ikatan antar part mudah dirakit	**

Daftar tuntutan prioritas utama ialah yang bernotasi *** yang artinya harus terpenuhi, dan daftar tuntutan prioritas menengah merupakan tuntutan yang sebaiknya tercapai. Berdasarkan daftar tuntutan yang ada, maka pada tahapan konsep diperoleh *black box* dan diagram fungsi yang merepresentasikan input, proses dan output. Hal ini ditampilkan pada Gambar 2.

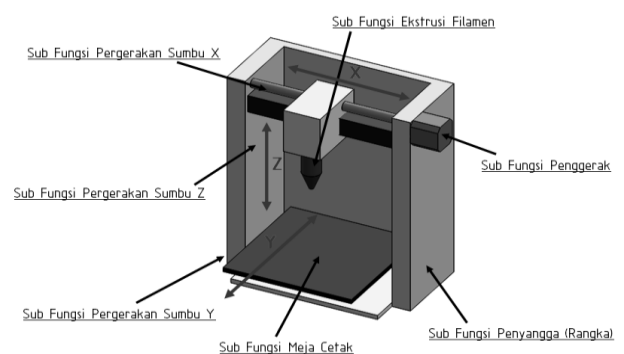


Gambar 2. Black box mesin 3D printing.

Mesin 3D printing terdapat beberapa bagian yang memiliki fungsi tertentu untuk mendukung kinerjanya. Pada Gambar. 3 dan Gambar. 4 diilustrasikan skema diagram fungsi bagian mesin dan konsep rancangan mesin 3D printing. Beberapa fungsi bagian mesin adalah seperti fungsi penyangga, fungsi penggerak sumbu, fungsi ekstrusi filamen dan fungsi pemanas meja cetak.





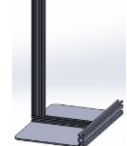
Gambar 3. Diagram fungsi bagian



Gambar 4. Konsep rancangan mesin 3D printing


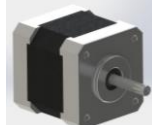
Bagian penyangga sebagai rangka utama memiliki tiga alternatif yang terdiri dari A1 *Fixed gantry*, A2 *Bridge gantry* dan A3 *single column gantry* seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Alternatif Fungsi Bagian Penyangga

No	Gambar	Keterangan
A1		<i>Fixed gantry</i> sebagai alternatif 1
A2		<i>Bridge gantry</i> sebagai alternatif 2
A3		<i>single column gantry</i> sebagai alternatif 3


Tabel 3 menampilkan dua alternatif bagian penggerak yang memungkinkan yaitu B1 motor servo dan B2 motor *stepper*. Bagian fungsi penggerak merupakan *prime mover* bagian aksis mesin sehingga kepala cetak mesin 3D *printing* dapat bergerak sesuai lintasan program.

Tabel 3. Alternatif Fungsi Bagian Penggerak

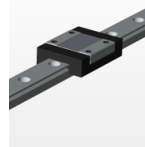
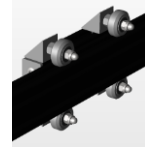

No	Gambar	Keterangan
B1		Motor servo sebagai alternatif 1
B2		Motor <i>stepper</i> sebagai alternatif 2

Bagian fungsi pergerakan sumbu ialah elemen system transmisi yang mengubah gerak putar poros motor penggerak menjadi gerak linier meja atau kepala cetak mesin. Pada Table 4 ditampilkan tiga alternatif yaitu C1 *lead screw*, C2 *ball screw* dan C3 *timing belt*. Sedangkan pada Tabel 5 ditunjukkan tiga alternatif sub fungsi bagian pengarah yang terdiri dari D1 *Linear guide block*, D2 *V-slot & wheel* dan D3 *Linear guide rod*. Sub fungsi bagian pengarah berfungsi untuk mengarahkan pergerakan aksis mesin.

Tabel 4. Alternatif Fungsi Bagian Pergerakan Aksis

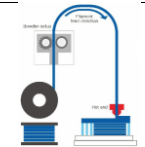
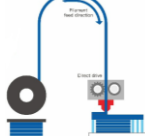
No	Gambar	Keterangan
C1		<i>Lead screw</i> sebagai alternatif 1
C2		<i>Ball screw</i> sebagai alternatif 2
C3		<i>Timing belt</i> sebagai alternatif 3

Tabel 5. Alternatif Sub Fungsi Bagian Pengarah Pergerakan Aksis

No	Gambar	Keterangan
D1		<i>Linear guide block</i> sebagai alternatif 1
D2		<i>V-slot & wheel</i> sebagai alternatif 2
D3		<i>Linear guide rod</i> sebagai alternatif 3




Sub bagian ekstrusi filamen merupakan bagian yang mengekstruksi material filamen. Pada Tabel 6 ditunjukkan dua alternatif pilihan yaitu E1 *bowden* dan E2 *direct drive* untuk bagian sub fungsi ini.

Tabel 6. Alternatif Sub Fungsi Bagian Ekstrusi Filamen

No	Gambar	Keterangan
E1		<i>Bowden</i> sebagai alternatif 1
E2		<i>Direct drive</i> sebagai alternatif 2



Pada Tabel 7 ditampilkan tiga alternatif sub fungsi peleleh filamen (*hot end*) yang terdiri dari E1 *single filament paths*, F2 *double filament paths with single nozzle* dan F3 *double filament paths with double nozzle*.

Tabel 7. Alternatif Sub Fungsi Bagian Peleleh Filamen

No	Gambar	Keterangan
F1		<i>Single filament paths</i> sebagai alternatif 1
F2		<i>Double filament paths with single nozzle</i> sebagai alternatif 2
F3		<i>Double filament paths with double nozzle</i> sebagai alternatif 3

Bagian fungsi meja cetak merupakan area tempat lelehan filamen dari *nozzle* untuk membentuk sebuah objek produk. Meja cetak mesin 3D *printing* dilengkapi dengan pemanas (*heated print bed*) yang membantu menjaga kestabilan temperature obyek cetak. Tabel 8 menunjukkan dua alternatif meja cetak mesin yaitu G1 *PCB heated bed* dan G2 *silicone heated bed*.

Tabel 8. Alternatif Fungsi Bagian Meja Cetak

No	Gambar	Keterangan
G1		<i>PCB heated bed</i> sebagai alternatif 1
G2		<i>Silicone heated bed</i> sebagai alternatif 2

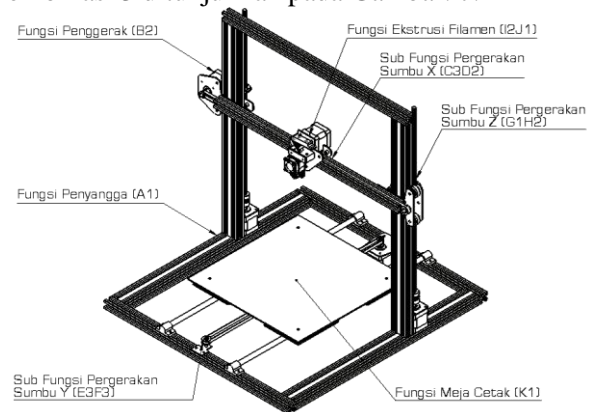
Tahapan selanjutnya adalah melakukan penilaian sesuai daftar tuntutan mesin untuk setiap fungsi bagian mesin. Penilaian dilakukan menggunakan metoda VDI 222 untuk memberikan pembobotan yang relative adil terhadap vareasi konsep dengan mempertimbangkankriteria teknis maupun ekonomis, sehingga didapatkan kombinasi pilihan terbaik. Aspek penilaian diambil dari daftar tuntutan atau konsep spesifikasi mesin. Pemberian bobot pada aspek penilaian melalui tingkat penilaian dengan notasi angka 0-4 yang merepresentasikan pendekatan mutu, dimana 0 tidak baik, 1 kurang

baik, 2 cukup baik, 3 baik dan 4 sangat baik. Pada Table 9 ditunjukkan alternatif kombinasi untuk kemudian dianalisis untuk menghasilkan produk dengan nilai efisiensi prinsip solusi sub fungsi tertinggi (Wittel, dkk., 2017).

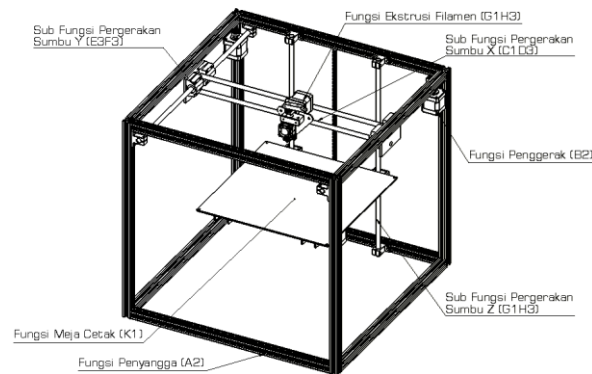
Tabel 9. Alternatif Fungsi Kombinasi

Fungsi atau Sub Fungsi Bagian	Alternatif Fungsi Bagian		
	Alternatif 1	Alternatif 2	Alternatif 3
A Fungsi Penyangga	A1	A2	A3
B Fungsi Penggerak	B1	B2	-
C Sub Fungsi Transmisi			
Sumbu X	C1	C2	C3
Sumbu Y	C1	C2	C3
Sumbu Z	C1	C2	C3
D Sub Fungsi Pengarah			
Sumbu X	D1	D2	D3
Sumbu Y	D1	D2	D3
Sumbu Z	D1	D2	D3
I,J Fungsi Ekstrusi Filamen	E1F1	E2F1	-
K Fungsi Meja Cetak	G1	G2	-
Alternatif Fungsi Kombinasi	AFK1	AFK2	AFK3

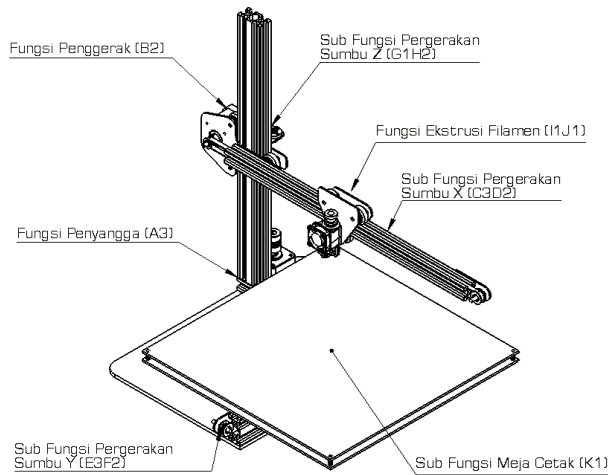
Pada Gambar 5 ditampilkan visualisasi alternatif fungsi kombinasi 1, alternatif fungsi kombinasi 2 diilustrasikan pada Gambar. 6, serta alternatif fungsi kombinasi 3 ditunjukkan pada Gambar. 7.



Gambar 5. Alternatif fungsi kombinasi 1



Gambar 6. Alternatif fungsi kombinasi 2



Gambar 7. Alternatif fungsi kombinasi 3

Pada Alternatif Fungsi Kombinasi 1, model rangka konstruksi mesin berupa *fixed gantry* yang memiliki dua buah tiang yang terpasang tetap (*fixed*) dan menahan rakitan elemen sumbu X. Meja cetak bergerak pada arah sumbu Y saja, dan kepala cetak dapat bergerak pada arah sumbu X dan Z. Elemen transmisi sumbu X dan Y menggunakan sabuk dan puli, dan sumbu Z menggunakan ulir transportir (*leadscrew*). Pengarah sumbu X menggunakan poros pengarah (*linear guide rod*), serta pengarah sumbu Y dan Z menggunakan *v-slot wheel*.

Pada alternatif fungsi kombinasi 2, model rangka konstruksi mesin berupa *bridge gantry* dengan rakitan elemen gerak sumbu X dan Y menggantung pada rangka. Gerakan pada arah sumbu Z dilakukan oleh meja cetak dan gerakan pada arah sumbu Y dan X dilakukan oleh kepala cetak. Elemen transmisi sumbu X dan Y menggunakan sabuk dan puli, serta sumbu Z menggunakan ulir transportir (*leadscrew*). Semua pengarah sumbu gerak menggunakan poros pengarah (*linear guide rod*).

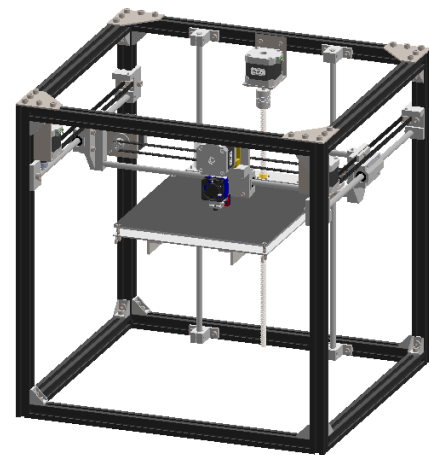
Pada alternatif fungsi kombinasi 3, model rangka konstruksi mesin berupa *single* yang berfungsi menahan rakitan elemen sumbu X. Meja cetak bergerak pada arah sumbu Y saja, sedangkan kepala cetak bergerak pada arah sumbu X dan Z. Elemen transmisi sumbu X dan Y menggunakan sabuk dan puli, serta sumbu Z menggunakan ulir transportir (*leadscrew*). Semua pengarah sumbu gerak menggunakan *v-slot wheel*.

Selanjutnya dilakukan penilaian alternatif fungsi kombinasi menggunakan metoda penilaian VDI 2225 untuk memperoleh fungsi kombinasi terbaik. Pembobotan pada setiap alternatif diberikan berdasarkan kriteria penilaian yang ditampilkan pada Gambar 7.

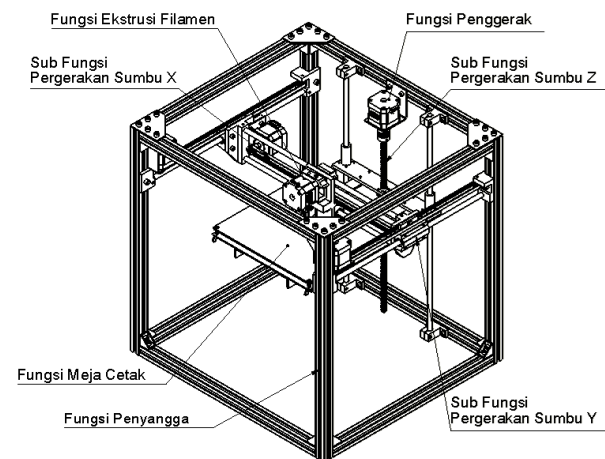
NO	ASPEK PENILAIAN	BOBOT	AFK1	AFK2	AFK3	NILAI IDEAL				
1	Penilaian Teknis	Pencapaian Fungsi	25	4	100	4	100	100		
2		Konstruksi	15	3	45	4	60	1	15	60
3		Pengoperasian	10	3	30	3	30	3	30	40
4		Pembuatan	15	3	45	3	45	4	60	60
5		Perakitan	10	3	30	3	30	4	40	40
6		Perawatan	5	3	15	3	15	3	15	20
7	Penilaian Ekonomis	Biaya	10	4	40	3	30	4	40	40
8		Penggunaan Komponen Standar	10	3	30	3	30	3	30	40
Nilai Total		100	335	340	330	400				
Persentase			83,75%	85,00%	82,50%	100%				

Gambar 7. Penilaian alternatif fungsi kombinasi.

Berdasarkan hasil tahapan penilaian, dimana terpilih alternatif fungsi kombinasi 2 yang paling memenuhi spesifikasi yang telah ditetapkan. Selanjutnya dibuat perancangan secara detail terhadap bentuk dan geometri semua elemen fungsi mesin termasuk elemen pendukung lainnya. Pada Gambar 8 dan Gambar 9 ditampilkan model dan draft rancangan mesin 3D *printing*.



Gambar 8. Model mesin 3D printing



Gambar 9. Draft rancangan mesin 3D printing

Verifikasi Nilai Defleksi Hasil Perhitungan Manual dan Simulasi

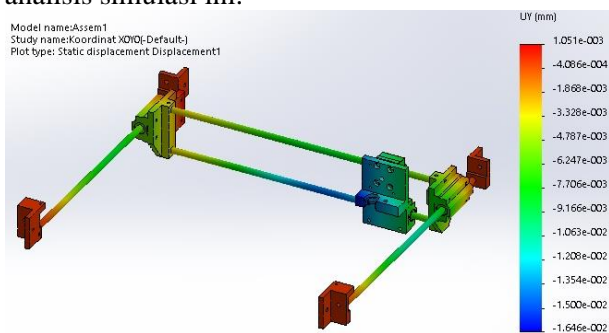
Pada Tabel 10 ditampilkan tabel defleksi konstruksi (rakitan) mesin hasil perhitungan manual saat kepala cetak (*nozzle*) pada beberapa posisi koordinat aksis (X, Y) mesin yaitu (0, 0), (0, 110), (0, 220), (110, 0), (110, 110), (110, 220), (220, 0), (220, 110), dan (220, 220).

Tabel10. Nilai Defleksi Aksis Mesin Hasil Perhitungan Manual

		Koordinat sumbu X Mesin		
		220	110	0
Koordinat sumbu Y	0	0,0196	0,0279	0,0145
	110	0,0608	0,0581	0,0488
	220	0,0315	0,0363	0,025
Selisih (Max-Min)		0,0463		

Nilai defleksi maksimum terjadi pada posisi koordinat aksis X220 dan Y 110 sebesar 0,0608 mm, serta nilai defleksi minimum pada posisi koordinat aksis X0 dan Y0 sebesar 0,0145 mm. Sehingga nilai selisih defleksi sebagai nilai perbedaan kesalahan geometri dimensi ketinggian hasil cetak benda kerja maksimum adalah sebesar 0,0463 mm.

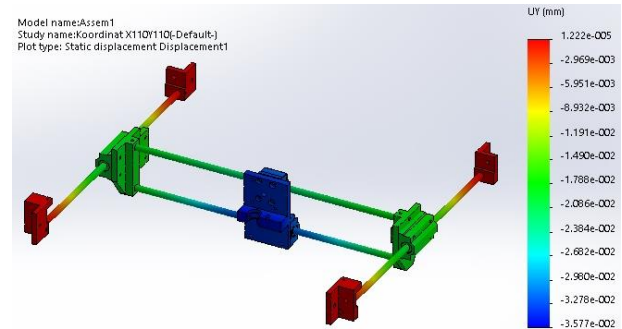
Selain melalui perhitungan manual, verifikasi nilai defleksi pada setiap posisi koordinat dianalisis menggunakan simulasi *software CAE solidworks*. Setiap obyek komponen mesin digambar dan disematkan atribut *properties* secara lengkap termasuk berat jenis materialnya. Selain itu jenis *matching/ joining* antar part mesin dan jenis pembebanan gaya terdefinisi secara detail pada analisis simulasi ini.



Gambar 10. Nilai defleksi minimum hasil simulasi pada koordinat X0 dan Y0.

Pada Gambar 10 ditunjukkan nilai defleksi minimum hasil simulasi sebesar 0,016 mm yaitu pada koordinat X0 Y0. Sedangkan nilai defleksi maksimum diperoleh sebesar 0,036 pada posisi koordinat X110 dan Y110 seperti yang diilustrasikan pada Gambar 11. Sehingga nilai

selisih defleksi sebagai nilai perbedaan kesalahan geometri dimensi ketinggian hasil cetak benda kerja maksimum adalah sebesar 0,018 mm.



Gambar 11. Nilai defleksi maksimum hasil simulasi pada koordinat X110 dan Y110.

Nilai defleksi hasil simulasi *finite element analysis* pada tiga posisi koordinat aksis (X, Y) mesin secara lengkap dapat dilihat pada Tabel 11.

Tabel 11. Tabel Nilai Defleksi Aksis Mesin Hasil Simulasi *Finite Element Analysis*

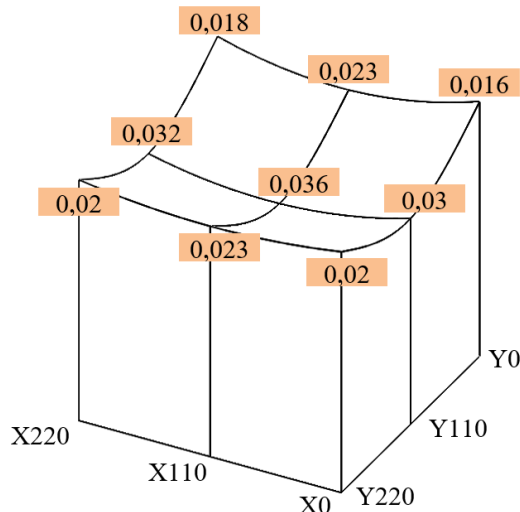
		Koordinat sumbu X Mesin		
		220	110	0
Koordinat sumbu Y	0	0,018	0,023	0,016
	110	0,032	0,036	0,03
	220	0,02	0,023	0,02
Selisih (Max-Min)		0,018		

Berdasarkan verifikasi nilai defleksi yang ditunjukkan pada Tabel 10 dan Tabel 11 diperoleh bahwa terdapat perbedaan nilai defleksi hasil perhitungan terhadap hasil simulasi. Nilai defleksi hasil perhitungan manual lebih besar dibandingkan nilai defleksi hasil simulasi. Hal tersebut dikarenakan adanya asumsi pembebanan gaya berat yang terpusat (titik) sehingga menyebabkan nilai defleksi yang terjadi cenderung lebih besar.

Kesalahan bentuk produk hasil cetak 3D *printing* secara signifikan akan dipengaruhi oleh nilai defleksi konstruksi mesin di area (kerja) pergerakan aksis mesin. Harga selisih nilai defleksi maksimum terhadap nilai defleksi minimum, dimana pada hasil perhitungan manual dan hasil simulasi diperoleh sebesar 0,0463 mm dan 0,018 mm. Nilai kesalahan dimensi perbedaan ketinggian benda kerja hasil cetak mesin 3D *printing* akibat defleksi dapat diterima (*in tolerance*) karena tidak melebihi nilai yang direkomendasikan yaitu di bawah 0,127 mm (Chua, dkk., 2010).

Pada Gambar 12 ditampilkan ilustrasi kesalahan geometri akibat defleksi yang terjadi pada obyek

produk berbentuk kubus dengan ukuran 220 x 220 mm sesuai travel aksis sumbu X dan Y.



Gambar 12. Nilai defleksi maksimum hasil simulasi pada koordinat X110 dan Y110.

IV. PENUTUP

Kesimpulan

Rancangan konstruksi mesin 3D *printing* tipe cartesian berbasis *fused deposition modelling* dengan ukuran 200 x 200 x 200 mm telah diperoleh menggunakan metoda perancangan VDI222. Rancangan konstruksi terpilih yaitu dengan fungsi kombinasi berikut; (i) model rangka konstruksi mesin *bridge gantry* dengan rakitan elemen gerak sumbu X dan Y menggantung pada rangka, (ii) gerakan pada arah sumbu Z dilakukan oleh meja cetak, serta arah sumbu Y dan X dilakukan oleh kepala cetak, (iii) elemen transmisi sumbu X dan Y menggunakan sabuk dan puli, serta sumbu Z menggunakan ulir transportir (*leadscrew*), (iv) semua pengarah sumbu gerak menggunakan poros pengarah (*linear guide rod*). Nilai defleksi konstruksi aksis mesin pada beberapa posisi di sepanjang lintasan pergerakan aksis telah terverifikasi menggunakan analisis perhitungan dan simulasi *finite element analysis*. Nilai defleksi maksimum terverifikasi sebesar 0,036 mm sehingga kesalahan maksimum dimensi dan bentuk hasil proses cetak produk setiap lapisan memenuhi standar. Selain itu nilai defleksi maksimum yang terjadi masih terakomodir oleh nilai kelonggaran *radial* setiap *bearing* aksis mesin yang dipilih.

Saran

Kajian lanjutan pada penelitian ialah perancangan sistem kendali mesin dan pembuatan prototipe mesin 3D *printing* sesuai rancangan, kemudian melakukan

kajian *assessment* terhadap kinerja fungsi mesin 3D *printing*.

V. DAFTAR PUSTAKA

- Al-Maliki, J. Q., 2015. The processes and Technologies of 3D Printing. *International Journal of Advances in Computer Science and Technology*. 4(10), 161-165.
- Alsoufi, M. S., & Elsayed, A. E. 2017. Warping deformation of desktop 3D printed parts manufactured by open source fused deposition modeling (FDM) system. *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*, 17(4), 7–16.
- Chua, C.K., Leong, K.F., & Lim, C.S. 2010. Rapid Prototyping: Principles and Applications, world Scientific, River Edge.
- Gibson, dkk., 2015. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct digital Manufacturing (2nd ed). New York: Springer.
- Ismianti, & Herianto. 2020. Adoption of 3D Printing in Indonesia and Prediction of Its Application in 2025. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 722(1).
- Kusuma, I. E., Dewi, D. S., & Gunarta, I. K. 2016. Penerapan Product Service System (PSS) Pada Pengembangan Model Bisnis Printer Tiga Dimensi (3D). *Prosiding Seminar Nasional Manajemen Teknologi XXIV, 2014*, 1–8.
- More, M. P. 2013. 3D Printing Making the digital Real. *International Journal of Engineering science & Research Technology*, ISSN 2277-9655, 1822-1925.
- Mwema, F. M., Akinlabi, E. T., & Fatoba, O. S. (2019). Visual assessment of 3D printed elements: A practical quality assessment for home-made FDM products. *Materials Today: Proceedings*, 26(xxxx), 1520–1525.
- Rayna, T., & Striukova, L. (2016). From rapid prototyping to home fabrication: How 3D printing is changing business model innovation. *Technological Forecasting and Social Change*, 102, 214–224.
- Redwood, B., Schoffer, F., & Garret, B. 2017. The 3D Printing Handbook: Technologies, design and applications. Amsterdam: 3D Hubs.
- Wittel, H., Jannasch, D., Voßiek, J., & Spura, C. (2017). Roloff / Matek Maschinenelemente. In *Roloff / Matek Maschinenelemente* (23 ed.). Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-8348-9406-9>