

OPTIMALISASI KEKUATAN *BENDING* HASIL 3D PRINTING MENGGUNAKAN METODE *RESPONSE SURFACE* PADA FILAMEN PLA (*POLY LACTIC ACID*)

OPTIMIZATION OF BENDING STRENGTH OF 3D PRINTING RESULTS USING *RESPONSE SURFACE METHOD* ON PLA (*POLY LACTIC ACID*)FILAMENT

Dira Nurfaedah¹, Rifelino², Purwantono³, Febri Prasetya⁴
Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Padang
Kampus Air Tawar, Padang 25131, Indonesia
diranurfaedah@gmail.com
rifelino@ft.unp.ac.id
purwantono_msn@yahoo.com
febriprasetya13@gmail.com

Abstrak

Akhir-akhir ini teknologi baru sudah mengembangkan produksi banyak meragup keuntungan untuk yang membutuhkan teknologi *past prototype*. Printer 3D merupakan teknologi *past prototyping* yang salah satu jenisnya ialah FDM (*Fused Deposition Modelling*) yang terkenal dan terjangkau. PLA memiliki karakteristik transparan, bersifat kaku, berbentuk butiran, memiliki ketahanan terhadap kelembapan serta polimer yang elastis. Pada PLA *nozzle temperature* dan *layer thickness* berpengaruh terhadap keelastisitas produk. pengaruh ketebalan lapisan cetak, *shell thickness* mendapatkan parameter paling mendominasi pada respon *tensile strength*. Akan tetapi dalam hal *flexural strength* dari bahan PLA, parameter ketebalan lapis, *deposition angle*, dan pola infil, dikonfirmasi ketebalan lapis yang sangat memberikan pengaruh pada *bending strength* bahan. Metode permukaan respon merupakan sekumpulan statistika serta kalkulasi teknik dimana berfungsi meningkatkan serta memaksimalkan proses, yang mana banyak parameter bebas mempengaruhi variabel respon. Kekuatan *bending* tertinggi berada pada parameter *layer thickness* 0.3 mm, *nozzle temperature* 205°C, dan *infill percentage* 30% dengan 71.605 MPa. Pada penelitian ini variabel *layer thickness* sangat berpengaruh terhadap kekuatan *bending*, *nozzle temperature* dan *infill percentage* tidak terlalu berpengaruh terhadap kekuatan *bending*. Dalam penentuan nilai optimum berdasarkan hasil analisis varian model orde 2 dengan residual identik menyebar secara acak dan titik residual mendekati garis diagonal untuk uji kenormalan yang berarti memiliki kontribusi terhadap model. Nilai optimum dari variabel bebas menghasilkan nilai *bending strength* optimal yaitu 0.3 mm untuk *layer thickness*, 208,18°C untuk *nozzle temperature* dan 30% untuk *infill percentage* dengan *bending strength* yang paling optimal adalah 72,0443 MPa.

Kata Kunci: Kekuatan, *Response Surface*, *Bending*, 3D Printing, PLA.

Abstract

Lately, new technology has developed a lot of production benefits for those who need *past prototype* technology. 3D printers are *past prototyping* technology, one of which is the well-known and affordable FDM (*Fused Deposition Modeling*). PLA has the characteristics of being transparent, rigid, granular, has a moisture-resistant, and elastic polymer. In PLA *nozzle temperature* and *layer thickness* affect the elasticity of the product. the effect of the thickness of the printed layer, *shell thickness* gets the most dominating parameter on the *tensile strength* response. However, in terms of the *flexural strength* of the PLA material, the parameters of *layer thickness*, *deposition angle*, and *infill pattern*, it is confirmed that the *layer thickness* greatly influences the *bending strength* of the material. The *response surface method* is a collection of statistical and calculation techniques which function to improve and maximize the process, in which many independent parameters affect the response variable. The highest *bending strength* is at *layer thickness* 0.3 mm, *nozzle temperature* 205°C, and *infill percentage* 30% with 71,605 MPa. In this study, the *layer thickness* variable is very influential on the *bending strength*, *nozzle temperature* and *infill percentage* are not very influential on the *bending strength*. In determining the optimum value based on the results of the analysis of variance of the second-order model with identical residuals spreading randomly and the residual point approaching the diagonal line for the normality test, which means it has a contribution to the model. The optimum value of the independent variable produces the optimal *bending strength* value of 0.3 mm for *layer thickness*, 208.18°C for *nozzle temperature* and 30% for *infill percentage* with the most optimal *bending strength* is 72.0443 MPa.

Keywords: Strength, Surface Response, Bending Test, 3D Printing, PLA.

I. Pendahuluan

Akhir-akhir ini teknologi baru sudah mengembangkan produksi banyak meragup keuntungan untuk yang membutuhkan teknologi *past prototype* (Shahi, dkk: 2016). printer 3D merupakan teknologi *past prototyping* yang salah satu jenisnya ialah FDM (*Fused Deposition Modelling*) yang terkenal dan terjangkau (Excel, 2013). Attaran (2017) menerangkan bahwa Teknologi tiga dimensi printer mengarahkan bentuk perkembangan yang berpengaruh didunia manufaktur. Material yang digunakan jenis PLA (*Poly Lactic Acid*) merupakan jenis plastik yang bersifat *biodegradable* yaitu dapat diurai dalam waktu singkat (Garlotta et al., 2019) karena berasal dari SDA yang diperharui yakni gandum, jagung, bit gula dan tapioka (Sujito, dkk: 2013).

PLA memiliki karakteristik transparan, bersifat kaku, berbentuk butiran, memiliki ketahanan terhadap kelembapan serta polimer yang elastis (Mita:2019). PLA sendiri bersifat termoplastik dengan titik leleh yang cukup tinggi (Kaavessina, 2011) dengan temperatur 190°C sebagai titik leleh terendahnya (babagowda et al, 2018). Pada PLA *nozzle temperature* dan *layer thickness* berpengaruh terhadap keelastisitas produk (Suzen et al., 2020).

Nugroho (2019) meneliti filamen *polylactic acid* dengan variabel yang diteliti adalah *nozzle temperature*, *infill pattern* dan *infill density* bahwa berpengaruh terhadap *tensile strength*. Sukindar dkk (2017) meneliti pada pengaruh ketebalan lapisan cetak, *shell thickness* mendapatkan parameter paling mendominasi pada respon *tensile strength*. Akan tetapi dalam hal *flexural strength* dari bahan PLA, parameter ketebalan lapis, *deposition angle*, dan pola infil, dikonfirmasi ketebalan lapis yang sangat memberikan pengaruh pada *bending strength* bahan. Mesin 3D printer dijalankan secara *computerize*. Berprosesnya 3D printer akan diatur oleh komputer. Karena gerak serta bentuk posisi cetak *nozzle* 3D printer disusun dengan komputer menggunakan perangkat lunak *slicer*, sehingga menciptakan kualitas hasil 3D printer yang berbeda. Perbedaan mekanis itulah dijadikan penelitian untuk menemukan kekuatan dan keelastisan hasil poduksi 3D printer dengan menguji material tersebut.

Uji bahan ditujukan untuk mendapatkan kepastian tentang sifat dan kekuatan bahan. Berdasarkan pengujian yang diteliti untuk mengetahui apakah bahan bisa dimanfaatkan untuk kontruksi tertentu. Beban yang diberikan seperti gaya, toris ataupun gabungan keduanya merupakan atau sifat material. Untuk mendapatkan sifat mekanik bahan maka dilakukan uji mekanik yang umumnya bersifat *destructive test* (gere, dkk. 1996). Untuk memenuhi presisi pengukuran, keahlian mesin, mutu ataupun banyaknya kecacatan pada bahan serta kecermatan memproduksi spesimen maka dilakukan pengujian

yang tepat yang didapatkan pada saat pengujian material (mita, 2019).

Metode permukaan respon merupakan sekumpulan statistika serta kalkulasi teknik dimana berfungsi meningkatkan serta memaksimalkan proses, yang mana banyak parameter bebas mempengaruhi variabel respon (Montgomery, 2009). Gagasan utama dalam metode permukaan respon merupakan menemukan interaksi parameter uji pada variabel terikat, menemukan bentuk keterkaitan parameter uji dengan variabel terikat dan memiliki bentuk langkah pengerjaan yang menciptakan variabel terikat maksimal (radojkovic, dkk: 2012). maka, kelebihan metode permukaan respon yakni tidak membutuhkan data sampel dengan kapasitas yang banyak serta tidak memakan banyak waktu (Iriawan & Astuti, 2006).

Metode permukaan respon merupakan salah satu jenis rencana sampel eksperimen, penyelesaian ini memanfaatkan analisa ANOVA demi memaparkan interaksi parameter yang berpengaruh signifikan terhadap variabel terikatnya (Yulia, 2018). Dalam penelitian ini metode *response surface* dimaksudkan untuk menemukan nilai optimal hasil uji *bending* dari produksi 3D *printing* dengan parameter variasi pada *layer thickness*, *nozzle temperature*, dan *infill percentage*.

II. Metode

A. Jenis Penelitian

Penelitian ini menggunakan jenis eksperimen. (Sugiyono, 2012) mengemukakan bahwa penelitian eksperimen adalah jenis metode yang digunakan dalam mencari pengaruh variable bebas kepada respon. Kegiatan ini memiliki tujuan mendapatkan kekuatan *bending* hasil cetakan 3D *printing* jenis FDM filamen PLA dan nilai optimal dari uji *bending* cetakan 3D *printing* jenis FDM filamen PLA. Metode *response surface* digunakan untuk menemukan daerah atau nilai optimum kekuatan *bending* objek.

B. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian dilakukan bulan Maret – Juli 2021 di laboratorium CNC dan Manufaktur di Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Negeri Padang.

C. Variabel Penelitian

Variabel yang digunakan dalam penelitian ini berdasarkan uraian diatas terdiri dari tiga variabel yaitu variabel bebas yang diberi lambang X dan variabel respon yang akan diberi lambang Y. Variabel control dalam penelitian ini bertujuan agar tidak terpisah dari pengaruh variabel bebas yang ditentukan, selain itu variabel control dimaksudkan agar tidak mempengaruhi variabel terikat dan tidak ikut menentukan ada atau tidaknya variabel terikat.

Tabel 1. Variabel Bebas dan Kontrol Penelitian

Variabel Bebas		Level variabel		
Kode RSM		-1	0	+1
X ₁	Layer Thickness (mm)	0.1	0.2	0.2
X ₂	Nozzle Temperature (°C)	190	205	220
X ₃	Infill Percentage (%)	10	20	30
Variabel Kontrol				
1	Infill Pattern	Lines		
2	Printing Speed	60 mm/s		
3	Speed Compress UTM	5 mm/s		

D. Instrumen Pengumpulan Data

Kegunaan instrumen penelitian merupakan sebuah alat untuk mengukur sesuatu akan dicermati peneliti (Sugiyono, 2008). Alat pada penelitian hasil cetak 3D printer filamen PLA sesuai standar uji *bending* berbahan thermoplastik yaitu ASTM D790 dengan capaian hasil nilai *flexural strength*.

E. Alat dan Bahan

1. Alat Pengujian

- Mesin 3D printer Jenis FDM (*Fused Deposition Modelling*) tipe Felix Pro 2 Dual
- Mesin UTM (*Universal Testing Machine*) tipe HT 2402.
- Software Autodesk Inventor view 2017 untuk desain spesimen pengujian.
- Software ultimaker cura 4.8.0 untuk *generate G-Code* pada mesin 3D printer.
- Software Minitab 16 untuk olah data optimalisasi hasil uji *bending*

2. Bahan Pengujian

Bahan penelitian adalah filamen PLA (*Poly Lactic Acid*). Filamen PLA yang digunakan ialah produksi dari rajawali 3D dengan spesifikasi filamen sebagai berikut:

Tabel 2. Spesifikasi Filame PLA

Diameter Filament	1.75 mm
Printing Temperature	190 – 220°C
Print Speed	50 – 100 mm/s
length	330 m/kg
Melt Flow Rate	4 – 8 g/10 min (2.16 kg)

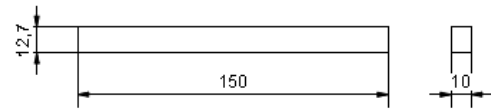
(sumber:www.rajawali3D.com)

**Gambar 1.** Filamen PLA 1.75 mm Warna Hitam

F. Prosedur Penelitian

1. Desain Spesimen

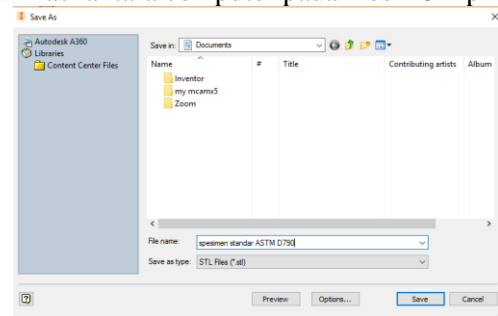
Spesimen uji di desain menggunakan software Inventor 2017 berbentuk balok dengan ukuran 150 mm x 10 mm x 12,7 mm sesuai standar ASTM D790.

**Gambar 2.** Ukuran Spesimen Uji *Bending* Standar ASTM D790

Sumber: (Romli et al., 2020)

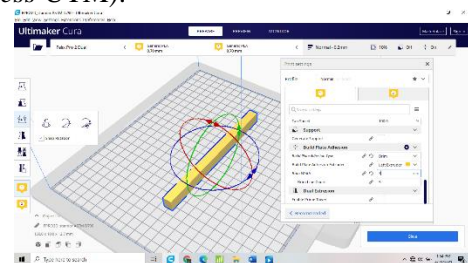
2. Convert File ke ekstensi STL

Setelah mendesain eksperimen sesuai standar uji *bending* ASTM D790. Hasil desain spesimen menggunakan software inventor berupa IPT-file akan di *convert* berupa STL-file. STL-file sebuah format yang bisa dibaca oleh slicer 3D printer saat menghasilkan bahasa program sebagai jembatan komunikasi antara computer pada mesin 3D printer.

**Gambar 3.** Export File CAD Format Dalam STL-File

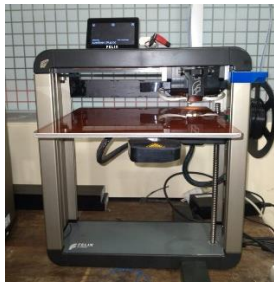
3. G-code Generate

Geometric code dihasilkan dari alat *slicer* seperti *ultimaker cura* secara otomatis dari mode CAD yang merupakan bahasa pemrograman printer 3D. Input eksperimen di lakukan menggunakan software *ultimaker cura* 4.8.0 baik variabel bebas (*layer thickness, nozzle temperature, infill percentage*) dan variable kontrol (*infill patten, printing speed, speed compress UTM*).

**Gambar 4.** Membuat G-code Menggunakan Slicer

4. Pencetakan spesimen

Pencetakan spesimen dilakukan sebanyak 15 spesimen dengan menggunakan mesin 3D printer tipe felix pro 2 Dual.



Gambar 5. Printer FDM Tipe Felix Pro 2 Dual (sumber:Laboratorium CNC Teknik Mesin UNP)

5. Set Up mesin UTM

UTM (*Universal Testing Machine*) adalah sebuah alat pengujian bahan untuk mengetahui sifat mekanis bahan seperti pengujian tarik, pengujian *bending* dan pengujian pengujian *compress*. Mesin yang digunakan dalam penelitian ini yaitu UTM HT-2404. Setting alat dilakukan bertujuan agar mesin bekerja sesuai dengan hasil uji yang di butuhkan.



Gambar 6. Setting Mesin UTM HT 2402 (sumber: Laboratorium Manufaktur Teknik Mesin UNP)

6. Pengujian

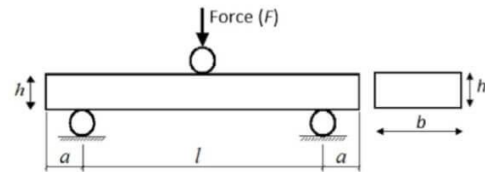
Proses pengujian *bending* bermaksud untuk mengetahui *bending strength* filamen PLA dari hasil cetak 3D printer. Pengujian spesimen berakhir ketika spesimen mengalami patah. Dudukan yang digunakan dalam pengujian *bending* bahan thermoplastik yaitu rol silinder.



Gambar 7. Dudukan uji *bending* jenis rol silinder (Sumber: (Yalcin, 2016))

Dudukan pengujina *bending* menggunakan jenis rol silinder untuk pengujian bahan plastik pada ASTM D790. Berdasarkan standar ASTM D790-17 untuk spesimen uji lentur yang memiliki tebal 3,2 mm atau lebih besar, *support span* (l) harus memiliki dimensi 16 kali tebal dari dimensi spesimen uji lentur atau memiliki rasio (*support span to depth ratio*) 16:1. Panjang (a) 10% dari *support span* (l) atau minimal 6,4 mm (*Astm-D790-17.Pdf*, n.d.), maka panjang $a =$

20 mm dan $l = 110$ mm.



Gambar 8. Skema *Three Point Bending*

III. Hasil dan Pembahasan

A. Data dan Spesimen Uji Bending

Data penelitian yaitu data *bending strength* yang dipengaruhi oleh *layer thickness*, *nozzle temperature*, dan *infill percentage*. *Bending strength* dalam penelitian ini sebagai variabel terikat dan variabel bebas (*layer thickness*, *nozzle temperature* dan *infill percentage*). Kemudian, variabel diatas diuraikan pada tabel 3 yakni sebagai berikut:

Tabel 3. Variabel Penelitian

Variabel	Keterangan
Y	<i>Bending Strength</i>
X ₁	<i>Layer Thickness</i>
X ₂	<i>Nozzle Temperature</i>
X ₃	<i>Infill Percentage</i>

B. Hasil Pengujian

Mengetahui karakteristik bahan yang digunakan dalam pencetakan 3D printer filamen PLA, maka diperlukan pengujian sifat pada bahan. Pengujian *bending* ini dilakukan terhadap hasil cetak 3D printer jenis FDM filamen PLA sesuai standar ASTM D790. Berikut adalah hasil pegujian *bending* filamen PLA seperti terlihat pada tabel 4.

Tabel 4. Hasil Pengujian *Bending* Filamen PLA

No	Variabel Bebas			Max Force (N)	Bending Strength (MPa)
	X ₁	X ₂	X ₃		
1	0,1	190	20	579.823	59.316
2	0,3	190	20	666.99	68.233
3	0,1	220	20	577.94	59.123
4	0,3	220	20	681.64	69.732
5	0,1	205	10	584.43	59.787
6	0,3	205	10	689.91	70.578
7	0,1	205	30	598.03	61.179
8	0,3	205	30	699.95	71.605
9	0,2	190	10	635.388	65.000
10	0,2	220	10	636.64	65.128
11	0,2	190	30	648.78	66.370
12	0,2	220	30	685.2	70.096
13	0,2	205	20	654.22	66.927
14	0,2	205	20	667.119	68.255
15	0,2	205	20	666.989	68.672

Bending strength tertinggi dicapai pada spesimen nomor 8 dengan parameter *layer thickness* 0,3 mm, *nozzle temperature* 205 °C, dan *infill percentage* 30% yaitu 71,605 MPa. Sementara kekuatan *bending* terendah dicapai pada spesimen nomor 3 dengan parameter *layer thickness* 0,1 mm, *nozzle temperature* 220 °C, dan *infill percentage* 20% yaitu 59,123 MPa. Perbedaan *bending strength* ini tentu saja terjadi karena pengaruh parameter yang dicermati. kemudian akan dilanjutkan analisa data memakai metode *response surface* untuk mengetahui parameter yang menunjukkan nilai optimal.

C. Analisa Hasil Spesimen dengan Metode *Response Surface*

1. Rancangan Model Orde 1 (linear)

Percobaan pada penelitian ada tiga variabel bebas yaitu: *layer thickness*: X_1 , *nozzle temperature*: X_2 , dan *infill percentage*: X_3 . level pengujian pada variabel bebas dalam penelitian terdapat tiga, yakni: level maksimal (+1), level minimal (-1), dan level tengah (0).

Analisis ANOVA dilakukan untuk melihat variabel bebas apakah berpengaruh signifikan linear atau tidak, maka dapat dilihat pada pengujian regresi orde 1 sesuai tabel 5 menggunakan perangkat lunak minitab 16. Rancangan model order 1 dan 2 menggunakan rancangan percobaan Box-Behnken desain dengan *center points* 15 atau $k=3$.

Tabel 5. Output ANOVA Model Orde 1 dengan *Software Minitab 16*

Source	df	SS	MS	F	P
Regression	3	220.413	73.471	22.17	0.000
Linear	3	220.413	73.471	22.17	0.000
Residual	11	36.446	3.313	-	-
Error					
Lack of Fit	9	34.785	3.865	4.65	0.189
Pure Error	2	1.661	0.830	-	-
Total	14	256.859	-	-	-

Hasil analisis data menggunakan perangkat lunak minitab 16 didapatkan nilai yang ditunjukkan pada tabel 5. Nilai F untuk signifikan model bahwa $F_{hitung} = 22,17$ dan berdasarkan tabel statistik untuk memiliki angka F pada tingkat signifikansi 5% maka didapat angka $F_{tabel} = 3,49$ yang berarti $F_{hitung} > F_{tabel}$, maka variabel berpengaruh signifikan terhadap respon.

2. Rancangan Model Orde 2 (Kuadratik)

Rancangan model orde 1 menghasilkan model dengan variabel berpengaruh signifikan terhadap respon, dan dilanjutkan melihat pengaruh variabel signifikan atau tidak pada rancangan model orde 2 dengan analisis ANOVA sebagai berikut:

Tabel 6. Output ANOVA Model Orde 2 dengan *Software Minitab 16*

Source	df	SS	MS	F	P
Regression	6	248.124	41.354	37.87	0.000
Linear	3	220.413	73.471	67.29	0.000
Quadratic	3	27.711	9.237	8.46	0.007
Residual	8	8.735	1.092	-	-
Error					
Lack of Fit	6	7.074	1.179	1.442	0.469
Pure Error	2	1.661	0.830	-	-
Total	14	-	-	-	-

Hasil analisis ANOVA untuk model orde 2 bahwa nilai nilai $F_{hitung} = 8,46$ dan didapat $F_{tabel} = 3,49$ yang berarti bahwa $F_{hitung} > F_{tabel}$, maka variabel berpengaruh secara signifikan pada variabel terikat.

3. Uji *Lack of Fit*

Pengujian *lack of fit* dilakukan untuk memastikan bahwa model yang dirancang benar-benar sesuai dengan model orde 1 atau orde 2. Hipotesis yang digunakan pada pengujian *lack of fit* adalah:

H_0 = Tidak ada *lack of fit* dalam model orde.

H_1 = ada *lack of fit* dalam model orde.

a. *Lack of fit* orde 1

Hasil ANOVA pada tabel 5 dengan memeriksa *lack of fit* nilai F dimana $F_{hitung} = 4.65 > F_{tabel} = 2.80$, maka H_0 tidak dapat diterima yang bermakna bahwa ada *lack of fit* dengan model orde 1.

b. *Lack of fit* orde 2

Hasil ANOVA pada tabel 6 dengan memeriksa *lack of fit* nilai F dimana $F_{hitung} = 1.442 < F_{tabel} = 3.00$, maka H_0 diterima yang bermakna bahwa tidak ada *lack of fit* dengan model orde 2.

Rancangan orde 1 terdapat *lack of fit* dalam model dan rancangan orde 2 tidak terdapat *lack of fit* dalam model, maka dapat dikatakan bahwa ada kesesuaian atau kecocokan antara model yang dibangun dengan model Orde 2.

D. Pengujian Model Eksperimen

1. Uji koefisien regresi secara serentak

Koefisien regresi secara serentak dapat ditinjau pada hasil ANOVA pada tabel 6 guna mencermati nilai regresi pada analisa model orde kedua yang mana nilai F dengan hipotesis yang digunakan sebagai berikut:

$H_0: \sum_{i=1}^3 \beta_i = 0$ (tidak terdapat kelengkungan atau *curvature*)

$H_1: \sum_{i=1}^3 \beta_i \neq 0$ (terdapat kelengkungan atau *curvature*)

Dimana, β_i = nilai koefisien regresi

$i = 1,2,3,\dots,k$

Nilai regresi hasil ANOVA pada tabel 6 didapat $F_{hitung} = 37,87 > F_{tabel} = 3,00$ bermakna bahwa H_0 tidak dapat diterima. Artinya, kontribusi signifikan diberikan oleh variabel bebas pada variabel respon. Atau dengan kata lain *layer thickness*, *nozzle temperature* dan *infill percentage* mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap kekuatan *bending strength*.

Estimated Regression Coefficients for Bending Strength (MPa)

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	67.9513	0.6033	112.634	0.000
Layer Thickness (mm)	5.0929	0.3694	13.785	0.000
Nozzle Temperature (oC)	0.6450	0.3694	1.746	0.119
Infill Percentage (%)	1.0946	0.3694	2.963	0.018
Layer Thickness (mm)*	-2.3558	0.5438	-4.332	0.003
Layer Thickness (mm)				
Nozzle Temperature (oC)*	-1.4945	0.5438	-2.748	0.025
Nozzle Temperature (oC)				
Infill Percentage (%)*	0.1917	0.5438	0.353	0.734
Infill Percentage (%)				

S = 1.04493 PRESS = 32.0337
 R-Sq = 96.60% R-Sq(pred) = 87.53% R-Sq(adj) = 94.05%

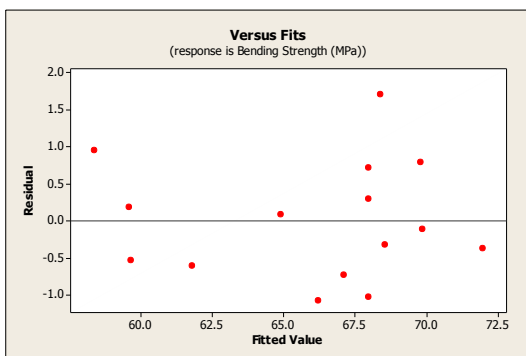
Gambar 9. Hasil Taksiran Model Orde 2 Terhadap Respon *Bending Strength* (Sumber: *Software Minitab 16*)

Hasil estimasi variabel bebas model dari analisa didapat persamaan model orde 2 sebagai berikut:

$$\hat{Y} = 67.9513 + 5.0929X_1 + 0.6450X_2 + 1.0946X_3 - 2.3558X_1^2 - 1.4945X_2^2 + 0.1917X_3^2$$

2. Uji identik

Uji identik dilakukan untuk memeriksa varian residual asal model yang didapat sama penyebarannya. Pada gambar 10 memaparkan hubungan plot residual dengan *fitted value*. Dari gambar dibawah residual tidak membentuk pola tertentu dan beredar acak. Artinya asumsi residual terpenuhi.

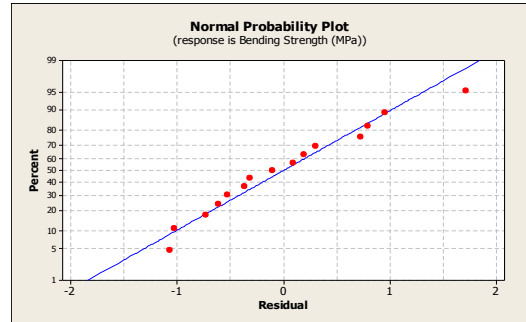


Gambar 10. Uji Identik Residual Versus *Fitted Value*

3. Uji distribusi normal

Pengujian distribusi normal dilakukan untuk mengamati penyimpangan model percobaan pada model. Residual dikatakan sudah mengikuti distribusi normal apabila ada plot kenormalan

residual, jika titik residual sudah mendekati garis diagonal maka hasil dapat dikatakan sesuai. Gambar 11 memaparkan garis diagonal didekati oleh titik-titik residual artinya untuk uji kenormalan sudah berdistribusi normal.

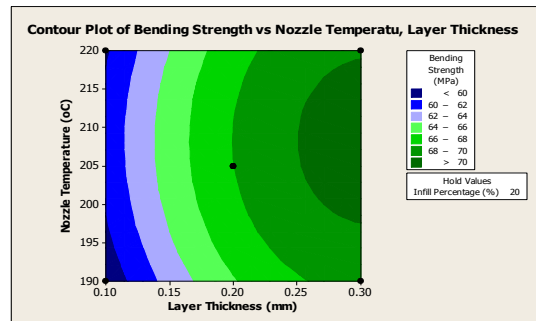


Gambar 11. Hasil Uji Distribusi Normal

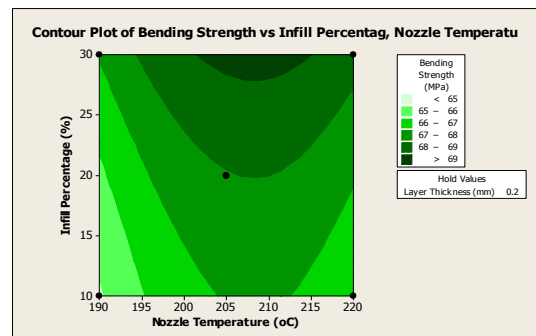
E. Analisis Karakteristik Permukaan Respon

1. Plot Kontur dan Permukaan

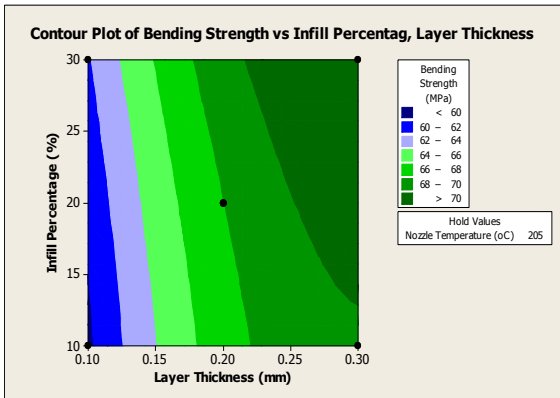
Model permukaan respon ditandai dengan mendapatkan plot kontur berdasarkan respon berbentuk kekuatan lentur atau *bending strength* sebagai variabel respon dipengaruhi oleh tiga variabel bebas yakni *layer thickness*, *nozzle temperature*, dan *infill percentage*. Hasil analisis menggunakan perangkat lunak Minitab 16 menghasilkan 6 gambar berupa grafik *contour* dan *surface* yang ditunjukkan pada gambar dibawah ini.



Gambar 12. *Contour Plot of Bending Strength vs Layer Thickness, Nozzle Temperature*

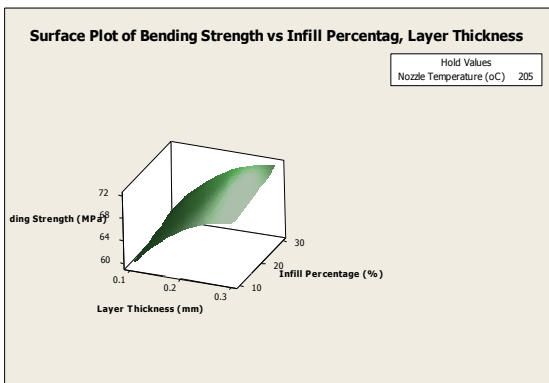


Gambar 13. *Contour Plot of Bending Strength vs Infill Percentage, Nozzle Temperature*

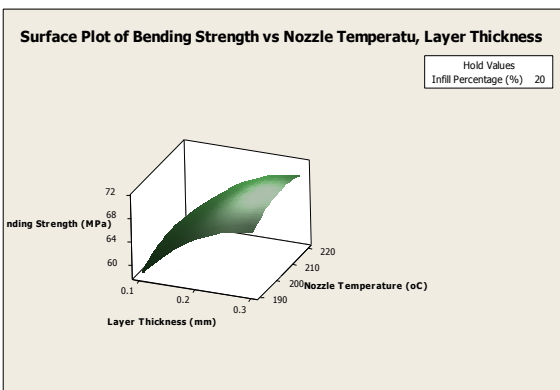


Gambar 14. Contour Plot of Bending Strength vs Layer Thickness, Infill Percentage

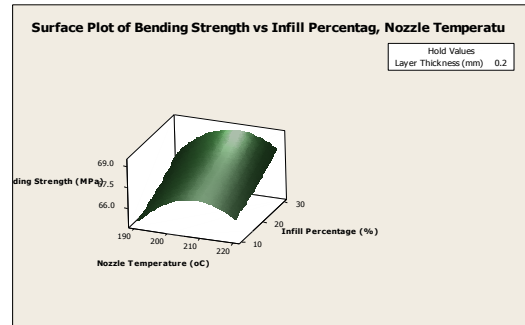
Gambar 12, 13 dan 14 memaparkan plot kontur dihasilkan dari bermacam warna. Dimana dari bermacam warna menerangkan range variabel terikat yang didapatkan, warna hijau tua menunjukkan kondisi paling optimal pada plot kontur. Gambar 12 dan 14 kondisi paling optimal berada diatas 70 dan gambar 13 kondisi paling optimal berada diatas 69. *Bending strength* akan semakin optimal jika *layer thickness* dengan variasi dari 0,2 mm keatas, *nozzle temperature* dengan variasi antara 200°C sampai 220°C dan *infill percentage* dengan variasi 20% keatas. Untuk melihat dari sisi permukaan, maka dapat dilihat pada gambar 15, 16 dan 17.



Gambar 15. Surface Plot of Bending Strength vs Infill Percentage, Layer Thickness



Gambar 16. Surface Plot of Bending Strength vs Nozzle Temperature, Layer Thickness

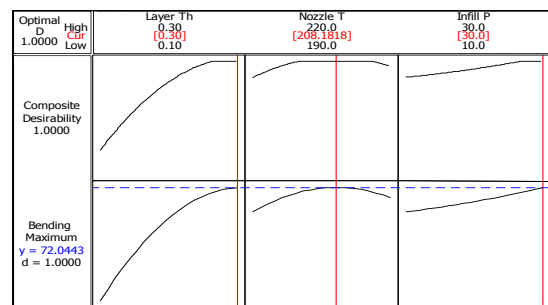


Gambar 17. Surface Plot of Bending Strength vs Infill Percentage, Nozzle Temperatur

Gambar 15, 16, dan 17 menunjukkan plot permukaan berbentuk tiga dimensi. Nilai tersebut hanya berbentuk hanya taksiran kasar, dan kesulitan mengenali variabel bebas mana yang sangat berpengaruh terhadap respon (*layer thickness*, *nozzle temperature* dan *infill percentage*). Untuk melihat nilai optimal dari variabel bebas diatas maka dilanjutkan pada tahap *optimization plot* menggunakan perangkat lunak minitab 16.

2. Plot Optimasi

Variabel respon yang optimum ditentukan dari variasi level variabel bebas yang dapat dilakukan menggunakan fitur *optimazation plot* pada perangkat lunak Minitab 16 dengan menyeluruh pada *contour center optimum*. Variasi level ini bersumber pada analisa data pada model orde 2 dengan model linear sehingga bisa diperoleh variasi tiap variabel *layer thickness*, *nozzle temperature* dan *infill percentage* yang hendak menciptakan respon yang paling optimal.



Gambar 18. Hasil Plot Optimum

Hasil plot optimum ditunjukkan dengan jelas pada gambar 18 bahwa tiap variabel bebas akan menciptakan variabel respon paling besar. Variabel *layer thickness* sebesar 0.3 mm, sedangkan variabel *nozzle temperature* sebesar 208,18°C dan *infill percentage* sebesar 30%. Dilihat dari plot optimum yang membuat kurva yang tidak terlalu melengkung pada variabel *nozzle temperature* dan *infill percentage* yang artinya tidak begitu memberikan pengaruh terhadap respon serta dengan penambahan variabel *nozzle temperature* (kecil dari 0.2 mm) dan *infill percentage* (kecil dari 20%) menurunkan respon yang didapatkan. Namun dalam pencetakan 3D printer

nozzle temperature adalah salah satu input utama dalam pencetakan produk, jadi *nozzle temperature* dan *infill percentage* harus tetap berkontribusi pada pencetakan produk menggunakan filamen PLA. Maka untuk menghasilkan *bending strength* yang optimal dengan itu digunakan *nozzle temperature* 208,18°C dan *infill percentage* 30%.

IV. Kesimpulan

Hasil pembahasan diatas, maka dapat disimpulkan bahwa:

1. Kekuatan *bending* tertinggi berada pada parameter *layer thickness* 0.3 mm, *nozzle temperature* 205°C, dan *infill percentage* 30% dengan 71.605 MPa.
2. Model regresi *response surface* optimal pada *bending strength* dari hasil cetak 3D printer filamen PLA (*Poly Lactic Acid*) yaitu:

$$\bar{Y} = 67.9513 + 5.0929X_1 + 06450X_2 + 1.0946X_3 - 2.3558X_1^2 - 1.4945X_2^2 + 0.1917X_3^2$$
 Model ini diperoleh berdasarkan rancangan metode *response surface* orde 2.
3. Nilai optimum dari variabel bebas menghasilkan nilai *bending strength* optimal yaitu 0.3 mm untuk *layer thickness*, 208,18°C untuk *nozzle temperature* dan 30% untuk *infill percentage* dengan *bending strength* yang paling optimal adalah 72,0443 MPa

Referensi

Astm-D790-17.Pdf. (n.d.).

Attaran, M. (2017). The rise of 3-D Printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing. *bUSSINER hORIZON*, 677-788.

Babagowda, R. S. Kadadevara Math, R. Goutham, and K. R. Srinivas Prasad. (2018) "Study of Effects on Mechanical Properties of PLA Filament which is blended with Recycled PLA Materials," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 310(1).

Excel, J. (2013). *The rise of additive manufacturing*. The Engineer.

Garlotta, D., Rubber, A., & Company, P. (2019). *A Literature Review of Poly (Lactic Acid) A Literature Review of Poly (Lactic Acid)*. June. <https://doi.org/10.1023/A>.

Gere., Timoshenko, dan H. J. W. (1996). *Mekanika Bahan Edisi kedua jilid 1*. Erlangga.

Iriawan, N., dan Astuti, S.P. (2006). *Mengolah Data Statistik dengan Mudah Menggunakan*

Minitab 14. Yogyakarta. Penerbit ANDI.

Kaavessina, M . (2011). *Plastik Ramah Lingkungan. Arab Saudi* : King Saud University (KSU) Riyadh, Saudi Arabia.

Mita Umami Waziirah. (2019). "Kekuatan Tarik dan Bending Bahan mikrokomposit berpenguat serat sabut kelapa dan polylactic acid (PLA) resin". Skripsi. Fisika. MIPA. Universitas Jember.

Montgomery, DC. (2009). "*Design and Analysis of Experiment*", 7th Edition. New York: Wiley.

Nugroho, A.W., Mahardika, A.H., and B. (2019). Improving the tensile properties of 3D printed PLA by optimizing the processing parameter. *JEMMME (Journal of Energy, Mechanical, Material, and Manufacturing Engineering)*, 4(1), 29–36.

Radojkovic, M., Zekovic, Z., Jokic, S., and Vidovic, S. (2012). Determination of optimal extraction parameters of mulberry leaves using Response Surface Methodology (RSM). *Romanian Biotechnological Letters*. 17(3): 7295.

Romli, Seprianto, D., Putra, D. P., Zamheri, & Rasid, M. (2020). The Effect of Parameters on the Process of Making Objects with Rapid Prototyping Digital Light Processing Technology on the Bending Stress. *Journal of Physics: Conference Series*, 1500(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1500/1/012027>.

Shahi, Baljinder Singh. (2016) "Advanced Manufacturing Techniques (3D Printing)", BBSBEC Fatehgarh Sahib.

Sugiyono. (2008). *Metode Penelitian Pendidikan*. CV. Alfabet.

Sugiyono. (2012). *Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif dan R&D*. ALFABETA.

Sujito, Hanim Munawaroh, Endhah Purwandari. (2013). sifat-sifat mekanik dan kemampuan biodegrasi bahan biokomposit poly lactic acid dengan penguat lembaran tipis bambu dan kayu sengon. *ILMU DASAR*. 14(2).

Suzen, Z. S., Hasdiansah, & Yuliyanto. (2020). Pengaruh Tipe Infill Dan Temperatur Nozzle Terhadap Kekuatan Tarik Produk 3D Printing Filamen Pla + Esun. *Manutech : Jurnal Teknologi Manufaktur* 12(02).

Yalcin, D. (2016). Bend Testing Equipment Guide. *Research Gate, February*, 1–11.

Yulia Merdekawati. (2018). “Penerapan Metode Permukaan Respon Untuk Optimalisasi Kualitas Produk (Studi kasus : Pengembangan Produk Cake Dengan Subtitusi Tepung Kacang Merah”. Skripsi. Matematika. Sains dan Teknologi. Universitas Islam Negeri Alauddin.