

# ANALISIS PENGARUH TINGKAT KELEMBABAN FILAMEN PLA TERHADAP NILAI KEKUATAN MEKANIK HASIL CETAK 3D PRINTING

Bima Agung Setyawan<sup>1</sup>, Yatin Ngadiyono<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Jurusan Pendidikan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Yogyakarta  
Email: [bimaagungsetyawan@gmail.com](mailto:bimaagungsetyawan@gmail.com)

## ABSTRACT

*This study aims to determine the effect of Polylactic Acid filament's moisture and nozzle temperature on the mechanical strength of the 3D printed objects. This study uses an experimental RAKL research design. The object under study is a 3D printing filament of the PLA+ type from the SUNLU brand, stored for 30 days in two different places. The filament's moisture value is measured using the gravimetric method. This filament was then used to print the ASTM D638 Type I tensile test specimen and the ASTM D790 bending test specimen, using three different nozzle temperatures. The specimens were then subjected to tensile and bending tests. The result concludes that the PLA filament moisture affects the tensile strength value by 97.1% and the bending strength value by 85.6%. In comparison, the nozzle temperature affects the tensile strength value by 42.7%, while the bending strength value was not affected.*

**Keywords:** 3d printing, fdm, polylactic acid, filament, moisture

## ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh nilai kelembaban filamen 3D printing jenis PLA (*Polylactic Acid*) dan pengaruh temperatur *nozzle* terhadap kekuatan mekanik hasil cetak. Penelitian ini menggunakan jenis penelitian eksperimen dengan desain penelitian RAKL. Objek yang diteliti adalah filamen 3D printing jenis PLA+ merk SUNLU yang telah disimpan selama 30 hari pada dua tempat berbeda. Kemudian filamen tersebut dilakukan pengukuran nilai kelembaban dengan metode gravimetri. Setelah itu filamen digunakan untuk mencetak spesimen pengujian tarik ASTM D638 Tipe I dan spesimen pengujian bending ASTM D790 dengan menggunakan 3 temperatur *nozzle* berbeda. Selanjutnya spesimen dilakukan pengujian tarik dan bending dan hasilnya dianalisis untuk mengetahui pengaruh nilai kelembaban dan temperatur *nozzle* terhadap nilai kekuatan mekanik. Hasil penelitian ini menyimpulkan bahwa nilai kelembaban filamen PLA memberi pengaruh 97,1 % terhadap nilai kekuatan tarik dan memberi pengaruh 85,6 % terhadap nilai kekuatan bending. Sementara temperatur *nozzle* hanya akan memberi pengaruh terhadap nilai kekuatan tariknya sebesar 42,7 %, sedangkan pada nilai kekuatan bending tidak berpengaruh.

**Kata kunci:** 3D Printing, FDM, Filamen, PLA, Kelembaban

## PENDAHULUAN

Teknologi 3D *printing* merupakan salah satu terobosan dalam dunia manufaktur yang berbeda dengan teknologi manufaktur lainnya. Teknologi 3D *printing* ini termasuk dalam jenis *additive manufacturing*, yakni pembentukan objek dengan menambahkan material pada setiap lapisan (*layer*), berbeda dengan *abrasive manufacturing* yang membuang bagian tidak diperlukan pada saat membentuk objek. Selain itu teknologi ini juga dianggap sebagai teknologi *rapid prototyping*.

*Rapid prototyping* merupakan sebuah teknologi dalam membuat suatu produk dengan cepat, yakni dengan mengintegrasikan antara teknologi CAD (*Computer Aided Design*) dan mesin *rapid prototyping* (3D *printing* dan CNC). Menurut Aan Ardian dan Zainur Rofiq (2016), bahwa gambar mesin merupakan bentuk representasi dari suatu objek yang memberikan informasi untuk keperluan manufaktur atau pemeriksaan objek itu sendiri. Pada masa sekarang gambar mesin sudah terintegrasi dalam perangkat komputer dan biasa disebut dengan CAD (*Computer*

*Aided Design*). Dalam hal ini dari gambar mesin yang dibuat dapat direalisasikan menggunakan teknologi manufaktur 3D *printing*.

Berdasarkan metode dalam membentuk suatu objek, 3D *printing* dibedakan menjadi beberapa jenis, diantaranya yang paling banyak digunakan yakni SLA (*Stereolithography*) dan FDM (*Fused Deposition Modelling*). Metode FDM lebih banyak digunakan karena metode ini cenderung lebih mudah prosesnya. Pada 3D *printing* FDM, dalam membentuk suatu objek dengan cara mengekstrusi material berupa plastik filamen diatas sebuah bidang datar (*base plate*). Material yang biasa digunakan pada 3D *printing* jenis FDM yakni plastik jenis *thermoplastic* yang kemudian dalam prosesnya diekstrusi pada *nozzle* pemanas (V. G. Surange dan P. V. Gharat, 2016).

Beberapa plastik jenis *thermoplastic* yang biasa digunakan sebagai bahan filamen 3D *printing* diantaranya yakni PLA, ABS, PETG, TPU, PP, dan Nilon. Beberapa diantaranya sangat rentan terhadap perubahan suhu dan kelembaban ruang penyimpanan karena memiliki sifat higroskopis. Sifat higroskopis merupakan sifat material yang sangat sensitif terhadap perubahan kelembaban udara. Material tersebut akan dengan mudah mengabsorpsi atau menyerap kelembaban udara, sehingga menyebabkan saturasi kelembaban dari material tersebut mengalami peningkatan. Peningkatan kelembaban pada plastik filamen 3D *printing* akan mengurangi kualitas dari hasil cetak 3D *printing* diantaranya yakni menyebabkan hasil cetak yang rapuh dan permukaan kasar. (Jackson O'Connell, 2020).

Diantara jenis – jenis filamen 3D *printing*, yang paling banyak digunakan yakni jenis PLA (*Polylactic Acid*). Menurut Tomasso Casalini et al. (2019), PLA merupakan *biopolymer* atau polimer yang dihasilkan dari bahan alami yang tentunya bersifat *biodegradable* atau dapat dengan mudah diuraikan. Polimer ini biasa diaplikasikan untuk bidang biomedis seperti

pembuatan benang jahit, sekrup fiksasi tulang, dan perangkat untuk pengiriman obat. Sementara pengaplikasian PLA dalam dunia 3D *printing* menurut Carlota V. (2019) diantaranya yakni untuk kebutuhan *prototype* atau model benda, industri makanan, dan objek – objek yang tidak memerlukan ketahanan mekanik tinggi. Kepopuleran filamen PLA dalam dunia 3D *printing* tidak terlepas dari kemudahan filamen jenis ini untuk dicetak atau diproses. Filamen ini tidak membutuhkan temperatur *nozzle* yang tinggi untuk proses cetaknya. Tidak seperti filamen ABS yang membutuhkan temperatur *nozzle* diatas 230 °C, filamen PLA ini sudah dapat dicetak dengan rentang temperatur *nozzle* 190 – 220 °C. Selain itu dari harga filamen jenis PLA cenderung lebih murah dari filamen jenis lain, sehingga filamen ini cenderung banyak digunakan.

Berbagai kelebihan yang ada pada filamen PLA membuat filamen ini digunakan oleh banyak orang untuk berbagai keperluan dan tidak mementingkan faktor kelemahan dari filamen jenis ini. Seperti yang sudah dijelaskan bahwa filamen ini memiliki sifat higroskopis atau dapat menyerap kelembaban udara. Hal ini juga dijelaskan oleh Carfagna et al. (1982), bahwa sifat higroskopis yang ada pada polimer akan menyebabkan efek plastisasi (*plasticization effect*) yang nantinya akan menurunkan kekuatan mekanik dari hasil pemrosesan polimer tersebut, mengingat PLA juga merupakan salah satu dari berbagai jenis polimer yang ada. Efek plastisasi (*plasticization effect*) yang terjadi pada polimer menurut E. H. Immergut dan H. F. Mark (1965) adalah suatu perubahan sifat mekanik pada suatu polimer yang ditandai dengan penurunan tingkat kekakuan pada temperatur ruang dan semakin mudahnya polimer tersebut terdeformasi.

Permasalahan – permasalahan tersebut tentunya mengakibatkan kerugian bagi pengguna 3D *printing* khususna jenis FDM, dimana plastik filamen akan mengalami penurunan kualitas seiring dengan lamanya waktu penyimpanan. Solusi yang sudah pernah

ada saat ini yakni dengan menyimpan plastik filamen kedalam sebuah *filament box dryer*. Pada prinsipnya *filament box dryer* ini menyimpan filamen di dalam ruang penghangat dengan temperatur antara 40 – 50 °C. Penyimpanan dalam temperatur tersebut dimaksudkan agar filamen selalu dalam kondisi kering, namun tanpa merusak sifat material plastik filamen yang disimpan, sehingga filamen dapat disimpan lebih lama dengan penurunan kualitas yang tidak begitu signifikan.

Perbedaan suhu lingkungan di berbagai belahan dunia juga turut mempengaruhi nilai kelembaban filamen 3D *printing* dan lamanya filamen 3D *printing* untuk dapat disimpan, serta digunakan kembali. Oleh karena itu diperlukan analisa lebih lanjut untuk mengetahui nilai kelembaban dari plastik filamen 3D *printing* dan pengaruhnya terhadap hasil cetak. Dalam penelitian ini nantinya nilai kelembaban filamen PLA diukur dengan menggunakan metode gravimetri. Metode gravimetri merupakan metode yang dilakukan untuk mengetahui kadar suatu unsur dalam sebuah senyawa. Metode ini juga dapat digunakan untuk mengetahui kadar air dalam suatu senyawa. Perlu adanya kajian lebih lanjut terkait hubungan nilai kelembaban plastik filamen 3D *printing* yang diukur dengan metode gravimetri dan pengaruhnya terhadap hasil cetak yang dilihat berdasarkan nilai kekuatan mekanik, yakni nilai kekuatan tarik dan *bending*. Oleh karena itu pada penelitian ini nantinya akan dilakukan analisa terkait pengaruh nilai kelembaban filamen 3D *printing* jenis PLA (*Polylactic Acid*) yang diukur dengan metode gravimetri dan pengaruhnya terhadap nilai kekuatan mekanik hasil cetak berdasarkan nilai kekuatan tarik dan *bending*. Hal ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui bahwa nilai kelembaban filamen PLA dapat diketahui dengan melakukan pengukuran menggunakan metode gravimetri dan untuk mengetahui pengaruhnya terhadap nilai kekuatan mekanik berdasarkan nilai kekuatan tarik dan *bending* pada hasil cetak.

Selain itu, parameter proses pencetakan juga berpengaruh terhadap kekuatan mekanik hasil cetak 3D *printing*. Salah satunya yakni temperatur *nozzle* yang merupakan parameter penting yang harus diperhatikan dalam mencetak objek dengan 3D *printing*. Hal tersebut berkaitan dengan temperatur optimal untuk melelehkan filamen yang nantinya akan berpengaruh terhadap kualitas ikatan antar *layer* dalam membangun objek (Z. S. Suzen, dkk., 2020). Dalam penelitian ini nantinya juga dilakukan perbedaan temperatur *nozzle* pada saat proses pencetakan spesimen. Hal ini dilakukan untuk mengetahui temperatur *nozzle* yang dapat menghasilkan nilai kekuatan mekanik yang baik pada hasil cetak menggunakan filamen PLA dengan nilai kelembaban yang berbeda.

## METODE

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen dengan desain penelitian RAKL (Rancangan acak kelompok lengkap). Dalam penelitian ini akan ada 3 (tiga) perlakuan pada objek uji dan setiap perlakuan terdiri dari 3 (tiga) pengulangan. Perbedaan perlakuan yang dilakukan dalam penelitian ini yakni pada penyimpanan filamen PLA dan variasi temperatur *nozzle* pada saat pencetakan spesimen. Tabel 1 merupakan rancangan perlakuan atau operasional variabel bebas yang dilakukan dalam penelitian ini beserta jumlah dari spesimen yang dicetak.

Tabel 1. Rancangan Perlakuan Penelitian

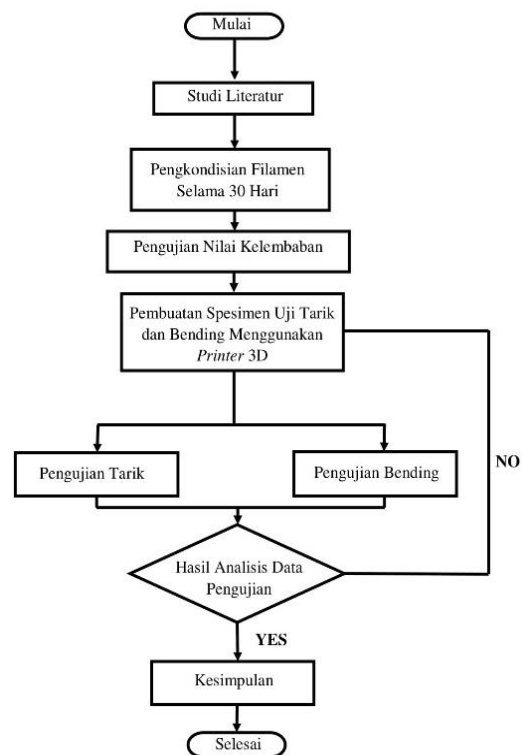
Nama Spesimen	Jumlah
WF190: <i>Wet Filamen, nozzle</i> 190 °C	3 buah spesimen pengujian tarik 3 buah spesimen pengujian <i>bending</i>
WF200: <i>Wet Filamen, nozzle</i> 200 °C	3 buah spesimen pengujian tarik 3 buah spesimen pengujian <i>bending</i>
WF210: <i>Wet Filamen, nozzle</i> 210 °C	3 buah spesimen pengujian tarik 3 buah spesimen pengujian <i>bending</i>
DF190: <i>Dry Filamen, nozzle</i> 190 °C	3 buah spesimen pengujian tarik 3 buah spesimen pengujian <i>bending</i>
DF200: <i>Dry Filamen, nozzle</i> 200 °C	3 buah spesimen pengujian tarik 3 buah spesimen pengujian <i>bending</i>
DF210: <i>Dry Filamen, nozzle</i> 210 °C	3 buah spesimen pengujian tarik 3 buah spesimen pengujian <i>bending</i>

Pada setiap perbedaan perlakuan yang ada pada filamen PLA tersebut kemudian dilakukan pencetakan spesimen uji tarik dan bending. Pencetakan spesimen uji tarik dilakukan sesuai dengan standar ASTM D638 Tipe I, sedangkan pencetakan spesimen uji bending dilakukan sesuai dengan standar ASTM D790. Spesimen dibuat menggunakan filamen PLA+ SUNLU dan dicetak menggunakan 3D printer Ender 3 Pro dengan parameter tetap pencetakan sebagaimana pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Parameter Tetap Pencetakan 3D Printing yang Digunakan

Parameter	Nilai	Parameter	Nilai
Diameter <i>Nozzle</i>	0,4 mm	<i>Infill Patern</i>	<i>Lines</i>
<i>Bed Temperatur</i>	60 °C	<i>Flow</i>	80%
<i>Layer Height</i>	0,2 mm	<i>Fan Speed</i>	100%
<i>Infill Density</i>	100%	<i>Build Plate Adhesion</i>	<i>Brim</i>
<i>Top/Bottom Thickness</i>	1 mm	<i>Skirt/Brim Minimum Lenght</i>	200 mm
<i>Wall Thickness</i>	0,8 mm	<i>Brim Line Count</i>	10

Pada penelitian ini yang menjadi variabel bebas adalah perbedaan nilai kelembaban plastik filamen dan variasi temperatur *nozzle* pada proses cetak spesimen. Sedangkan variabel terikat pada penelitian ini adalah tegangan maksimum (*maximum stress*) pada pengujian tarik dan nilai modulus *bending* (*flexural modulus*) pada pengujian *bending*. Kedua nilai tersebut diukur dalam satuan Mega Pascal (MPa). Dari data – data yang diperoleh kemudian dilakukan analisis rerata. Alur penelitian ini dapat dijabarkan dalam diagram alir penelitian (flow chart) pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

## HASIL DAN PEMBAHASAN

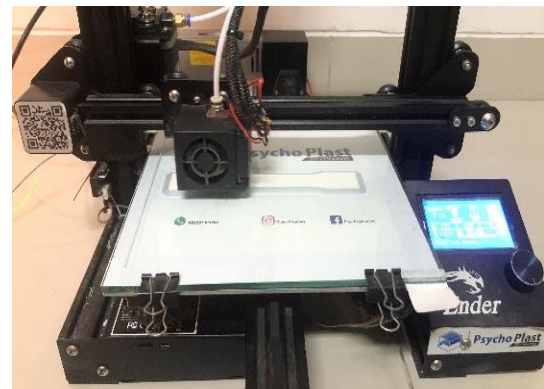
Berdasarkan pengujian tingkat kelembaban filamen diketahui nilai kelembaban dari masing – masing filamen PLA. Tabel 3 merupakan hasil dari pengujian kelembaban filamen. Dari hasil pengujian nilai kelembaban didapatkan perbedaan nilai kelembaban sebesar 0,2% dengan filamen yang disimpan pada temperatur ruang terkontrol lebih tinggi nilainya. Hal ini sesuai dengan teori dari Mitch Walleser (2018) yang menyatakan bahwa filamen PLA memiliki

sifat higroskopis atau menyerap kelembaban udara yang mengakibatkan filamen ini tidak dapat bertahan lama di udara bebas dengan saturasi kelembaban yang tinggi. Selain itu dari hasil pengujian kelembaban filamen juga sesuai dengan teori dari Carfagna et al. (1982) yang menyebutkan bahwa kemampuan mengabsorpsi kelembaban yang ada pada polimer akan menyebabkan efek plastisasi (*plasticization effect*) yang nantinya akan menurunkan kekuatan mekanik dari hasil pemrosesan polimer tersebut.

Tabel 3. Hasil Uji Nilai Kelembaban dengan Metode Gravimetri

No.	Kode Sampel	Krus Kosong (gr) A	Berat sampel (gr) B	Berat 100% (gr) C	Kadar Air (%)	Rerata (%)
1	Sampel 1	34,0214	2,5360	36,5373	0,79	0,79
		31,9427	2,5621	34,4848	0,78	
2	Sampel 2	32,8992	2,5492	35,4331	0,60	0,59
		32,1512	2,5549	34,6914	0,58	

Tahap pembuatan spesimen uji dimulai dengan proses desain CAD. Menurut Dicky Seprianto (2011), *software* CAD (*Computer Aided Design*) merupakan *software* pemodelan 3D menggunakan komputer, dimana memungkinkan pengguna untuk merevisi kembali desain apabila terdapat kesalahan pada desain 3D yang dibuat. Selanjutnya dari desain CAD dilanjutkan dengan proses *slicing*, yakni menerapkan parameter pencetakan. Dari proses *slicing* dihasilkan file *g.code* yang dapat dibaca oleh 3D *printer* untuk dicetak. Gambar 2 merupakan proses pencetakan spesimen, sedangkan gambar 3 dan gambar 4 merupakan hasil cetakan spesimen uji tarik dan uji *bending*.



Gambar 2. Proses Cetak Spesimen



Gambar 3. Hasil Cetak Spesimen Uji Tarik

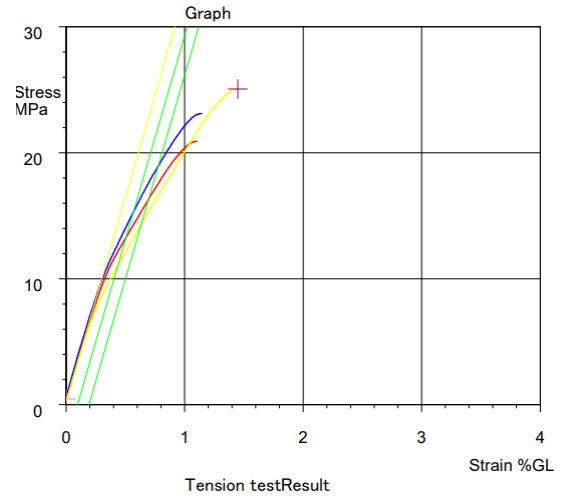


Gambar 4. Hasil Cetak Spesimen Uji Bending

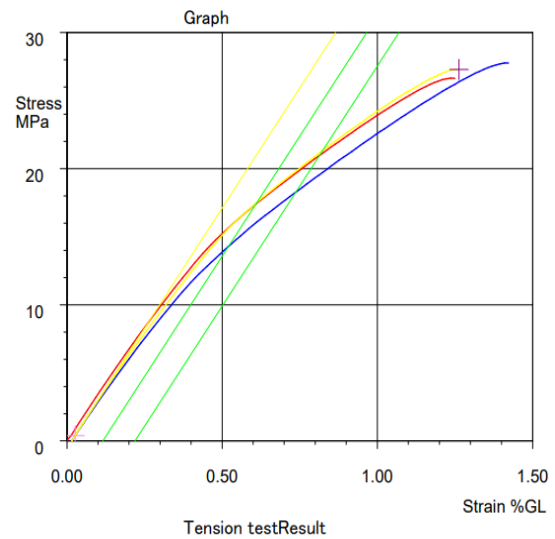
Spesimen yang telah dicetak kemudian dilakukan pengujian tarik dan *bending*. Gambar 5 merupakan proses pengujian tarik. Dari pengujian tarik didapatkan grafik pengujian tarik, yakni grafik yang menjelaskan hubungan antara tegangan dan regangan. Gambar 6 merupakan grafik hasil pengujian tarik spesimen WF190, gambar 7 merupakan grafik hasil pengujian tarik spesimen WF200, gambar 8 merupakan grafik hasil pengujian tarik spesimen WF210, gambar 9 merupakan grafik hasil pengujian tarik spesimen DF190, gambar 10 merupakan grafik hasil pengujian tarik spesimen DF200, dan gambar 11 merupakan grafik hasil pengujian tarik spesimen DF210.



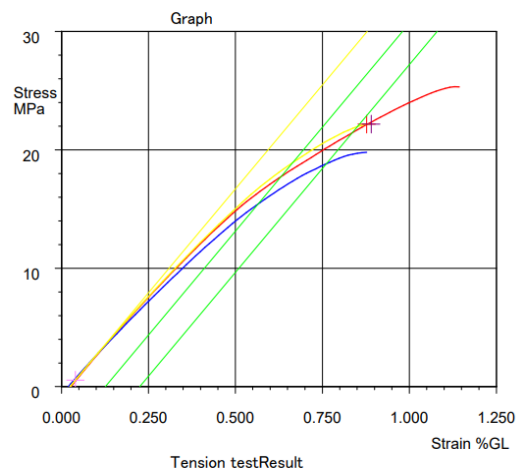
Gambar 5. Proses Pengujian Tarik



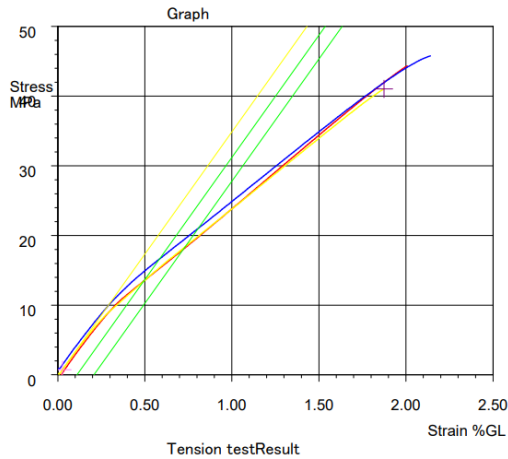
Gambar 6. Grafik Pengujian Tarik Spesimen WF190



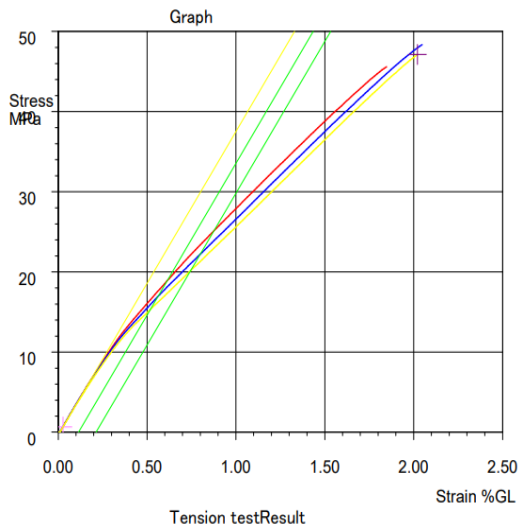
Gambar 7. Grafik Pengujian Tarik Spesimen WF200



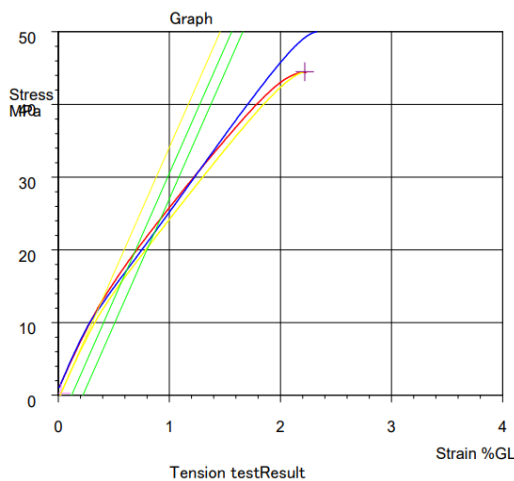
Gambar 8. Grafik Pengujian Tarik Spesimen WF210



Gambar 9. Grafik Pengujian Tarik Spesimen DF190



Gambar 10. Grafik Pengujian Tarik Spesimen DF200

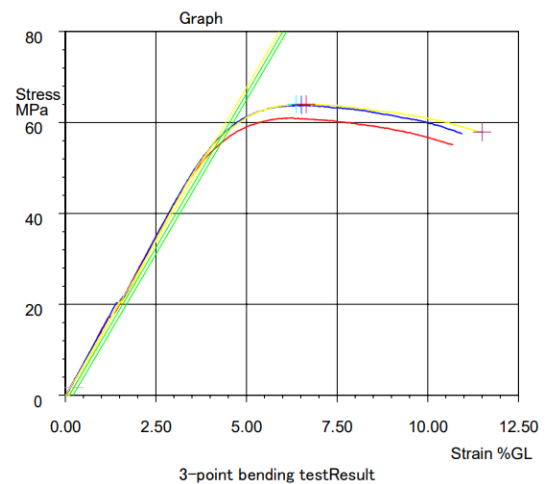


Gambar 11. Grafik Pengujian Tarik Spesimen DF210

dan regangan. Gambar 12 merupakan proses pengujian *bending*. Sementara gambar 13 merupakan grafik hasil pengujian *bending* spesimen WF190, gambar 14 merupakan grafik hasil pengujian *bending* spesimen WF200, gambar 15 merupakan grafik hasil pengujian *bending* spesimen WF210, gambar 16 merupakan grafik hasil pengujian *bending* spesimen DF190, gambar 17 merupakan grafik hasil pengujian *bending* spesimen DF200, dan gambar 18 merupakan grafik hasil pengujian *bending* spesimen DF210.

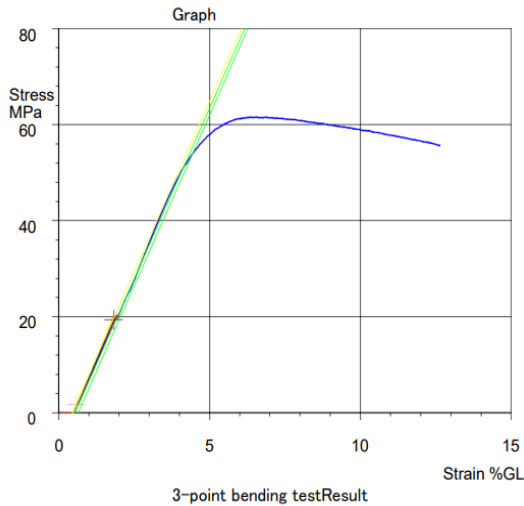


Gambar 12. Proses Pengujian *Bending*

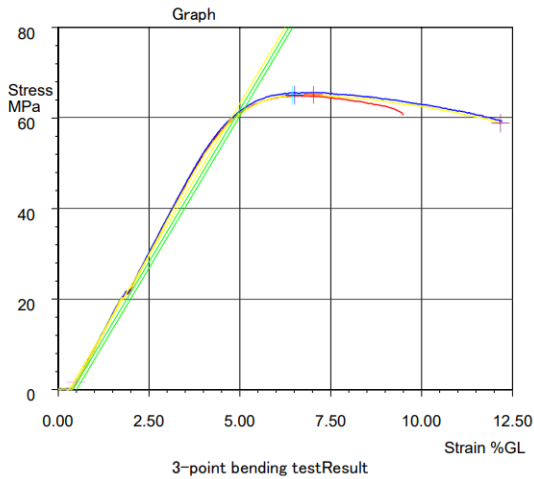


Gambar 13. Grafik Pengujian *Bending* Spesimen WF190

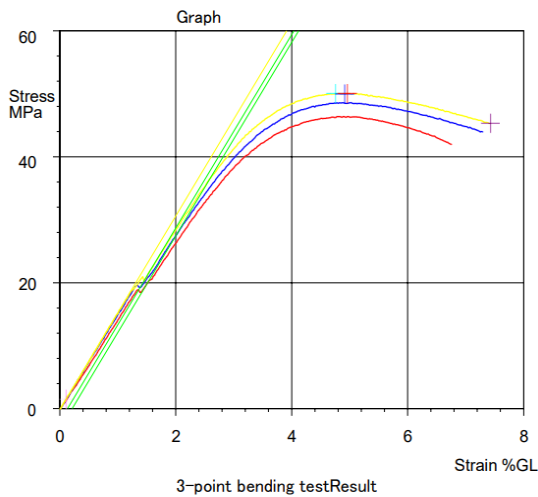
Sementara itu dari pengujian *bending* didapat juga grafik hubungan antara tegangan



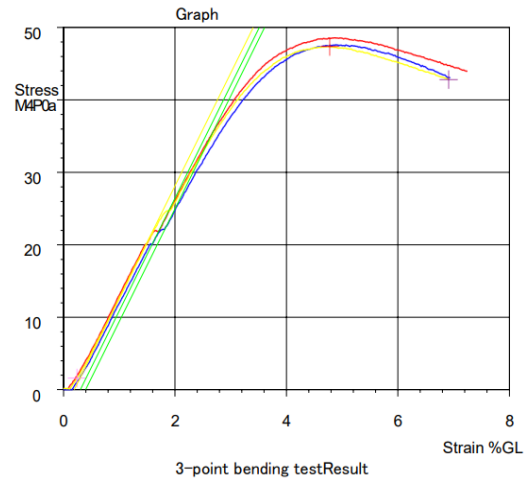
Gambar 14. Grafik Pengujian *Bending* Spesimen WF200



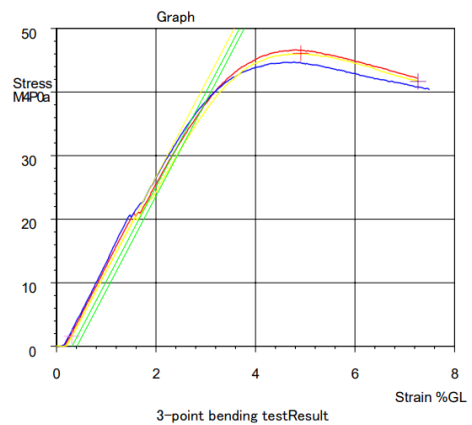
Gambar 15. Grafik Pengujian *Bending* Spesimen WF210



Gambar 16. Grafik Pengujian *Bending* Spesimen DF190



Gambar 17. Grafik Pengujian *Bending* Spesimen DF200



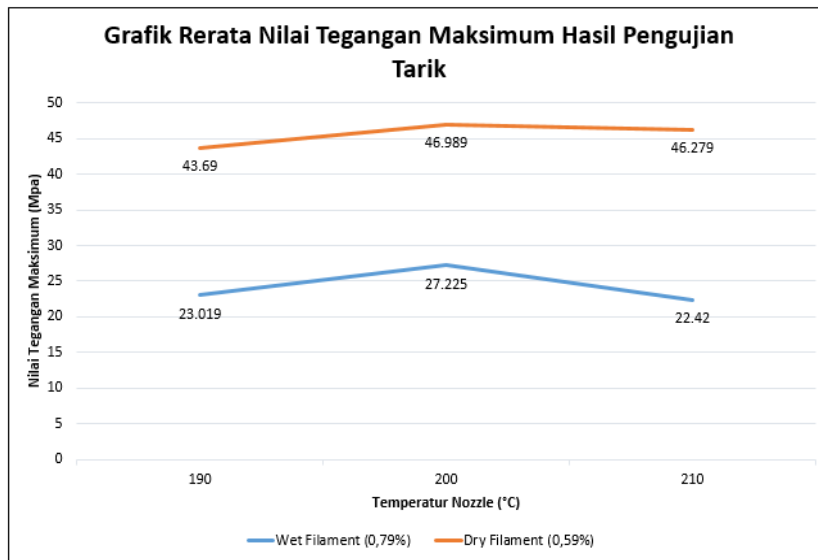
Gambar 18. Grafik Pengujian *Bending* Spesimen DF210

Dari pengujian tarik dan *bending* yang dilakukan diambil nilai tegangan maksimum (*maximum stress*) dan nilai modulus *bending* (*flexural modulus*). Tabel 4 merupakan nilai tegangan maksimum dan flexural modulus dari masing – masing pengujian. Dari data yang dihasilkan kemudian dilakukan analisis rerata. Didapatkan grafik pada gambar 19 yang menjelaskan pengaruh nilai kelembaban filamen dan temperatur *nozzle* terhadap nilai kekuatan tarik dan grafik pada gambar 20 yang menjelaskan pengaruh nilai kelembaban filamen dan temperatur *nozzle* terhadap nilai *flexural modulus* dari spesimen.

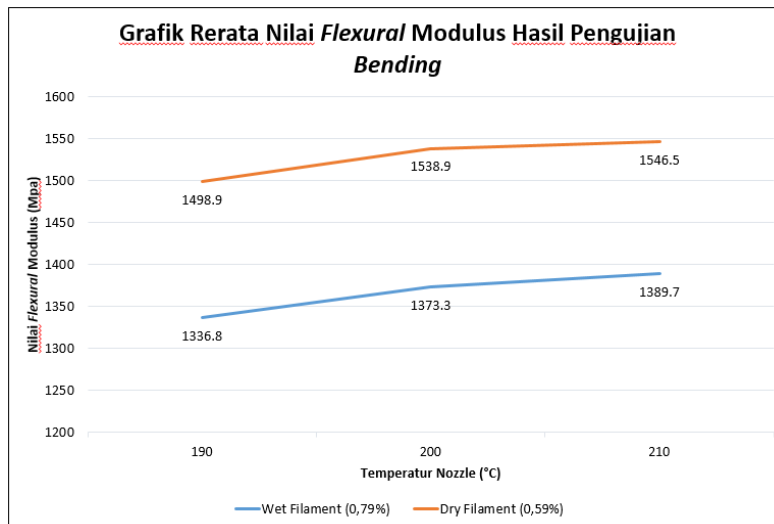
Tabel 4. Nilai Tegangan Maksimum dan Flexural Modulus dari Pengujian



Nama Spesimen	Tegangan Maksimum (MPa)	Rata – rata Tegangan Maksimum (MPa)	Flexural Modulus (MPa)	Rata – rata Flexural Modulus (MPa)
WF 190	20,896	23,019	1320,9	1336,8
	23,107		1331,4	
	25,058		1358,1	
WF 200	26,641	27,225	1352,7	1373,3
	27,749		1345,4	
	27,284		1421,9	
WF 210	25,326	22,420	1398,8	1389,7
	19,775		1424,8	
	22,160		1345,7	
DF 190	44,315	43,690	1467,4	1498,9
	45,752		1492,8	
	41,003		1536,7	
DF 200	45,562	46,989	1565,9	1538,9
	48,318		1494,2	
	47,089		1556,7	
DF 210	44,387	46,279	1553,5	1546,5
	49,974		1600,2	
	44,473		1485,8	



Gambar 19. Grafik Rerata Nilai Tegangan Maksimum Hasil Pengujian Tarik



Gambar 20. Grafik Rerata Nilai *Flexural* Modulus Hasil Pengujian *Bending*

Dari hasil analisa rerata yang dilakukan pada hasil pengujian tarik dan *bending* diketahui bahwa nilai kelembaban pada filamen PLA memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai kekuatan tarik (tegangan maksimum) dan nilai kekuatan *bendingnya* (*flexural* modulus). Hal ini sesuai dengan teori Jackson O’Connell (2020) yang menyatakan bahwa filamen PLA yang telah menyerap kelembaban akan menghasilkan kualitas hasil cetak yang buruk, salah satunya yakni penurunan pada kekuatan mekaniknya. Lebih lanjut bahwa hasil analisa ini juga menjawab teori Carfagna et al. (1982) yang menyebutkan bahwa kelembaban yang ada pada polimer akan menyebabkan efek plastisasi (*plasticization effect*) yang nantinya akan menurunkan kekuatan mekanik dari hasil pemrosesan polimer tersebut.

Berdasarkan analisa yang dilakukan juga menyebutkan bahwa variasi temperatur *nozzle* pada proses pencetakan berpengaruh signifikan terhadap nilai kekuatannya. Hal ini sesuai dengan teori dari Z. S. Suzen, dkk. (2020) yang menyatakan bahwa parameter pada proses cetak nantinya akan mempengaruhi kekuatan tarik hasil cetaknya. Parameter tersebut salah satunya adalah temperatur *nozzle* atau temperatur pencetakan. Hal tersebut berkaitan dengan kualitas ikatan antar layer yang terjadi pada objek cetak. Berdasarkan analisa hasil kekuatan tarik

diketahui bahwa temperatur *nozzle* 200 °C menghasilkan nilai kekuatan tarik yang paling tinggi diantara ketiga variasi temperatur *nozzle* pada proses cetak dengan menggunakan filamen PLA+ SUNLU. Namun pada hasil kekuatan *bending* paling tinggi dihasilkan pada temperatur *nozzle* 210 °C.

## SIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang dilakukan dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut. Hasil rerata pada data yang diperoleh dari pengujian tarik dan *bending* diketahui bahwa nilai kelembaban pada proses cetak menggunakan filamen PLA berpengaruh signifikan terhadap nilai tegangan maksimum dan *flexural* modulus yang dihasilkan. Filamen dengan nilai kelembaban 0,79% menghasilkan nilai tegangan maksimum dan *flexural* modulus yang lebih rendah dari filamen dengan nilai kelembaban 0,59%. Ini menunjukkan bahwa filamen dengan nilai kelembaban tinggi akan mengurangi kekuatan mekanik dari hasil cetakan filamen tersebut. Rerata dari data hasil pengujian tarik dan *bending* juga dapat disimpulkan bahwasanya variasi temperatur *nozzle* pada proses pencetakan spesimen pengujian tarik dan *bending* berpengaruh terhadap nilai tegangan maksimum dan *flexural* modulus yang dihasilkan. Hal tersebut berkaitan dengan kualitas ikatan antar layer

yang terjadi pada objek cetak. Berdasarkan analisa hasil kekuatan tarik diketahui bahwa temperatur *nozzle* 200 °C menghasilkan nilai tegangan maksimum yang paling tinggi diantara ketiga variasi temperatur *nozzle* yang digunakan. Sementara pada nilai *flexural* modulus dari pengujian *bending*, nilai paling tinggi dihasilkan pada temperatur *nozzle* 210 °C.

## DAFTAR RUJUKAN

- Ardian, Aan & Rofiq Zainur. (2016). Pengaruh Strategi Pengorganisasian Elaborasi dan Gaya Kognitif Spasial Mahasiswa Terhadap Hasil Belajar Gambar Mesin. *Jurnal Dinamika Vokasional Teknik Mesin*.
- Carfagna, C., Apicella, A., & Nicolais, L. (1982). The effect of the prepolymer composition of amino-hardened epoxy resins on the water sorption behavior and plasticization. *Journal of Applied Polymer Science*.
- Casalini, Tommaso et al. (2019) A Perspective on Polylactic Acid – Based Polymers Use for Nanoparticles Synthesis and Applications. Diambil pada tanggal 17 Februari 2022, dari [https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fbioe.2019.00259/full#:~:text=Polylactic%20acid%20\(PLA\)%2C%20classified,just%20to%20scratch%20the%20surface](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fbioe.2019.00259/full#:~:text=Polylactic%20acid%20(PLA)%2C%20classified,just%20to%20scratch%20the%20surface).
- Immergut, E. H., & Mark, H. F. (1965). Principles of plasticization. Diambil pada tanggal 18 Januari 2022, dari <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/ba-1965-0048.ch001#:~:text=Plasticization%2C%20in%20general%2C%20refers%20to,the%20elongation%20to%20break%20at>.
- O'Connell, Jackson. 2020. Hygroscopy (3D Printing): What It Is & How to Deal With It. Diambil pada tanggal 10 Januari 2022, dari <https://all3dp.com/2/hygroscopy-3d-printing-guide/>.
- Surange, V. G., & Gharat, P. V. (2016). 3D Printing Process Using Fused Deposition Modelling (FDM). *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*.
- 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*.
- V., Carlota. (2019). All You Need to Know About PLA for 3D Printing. Diambil pada tanggal 17 Februari 2022, dari <https://www.3dnatives.com/en/pla-3d-printing-guide-190820194/#>.
- Walleser Mitch. (2018). 3D Printer Filament Storage: Is Humidity A Silent Killer for 3D Printed Parts?. Diambil pada tanggal 8 Agustus 2021, dari <https://blog.gotopac.com/2018/03/01/how-3d-printer-filament-storage-cabinets-instantly-improve-3d-print-part-quality/>.