

Pengaruh Penambahan *Stationary Shoulder* Pada Kekuatan Tarik dan *Scanning Electrone Microscope* (SEM) Sambungan *Friction Stir Welding* (FSW) Pada Material *Polyactic Acid* (PLA) Hasil 3D *Printing*

Oleh:

Muhammat Choirul Wildan (231020200098)

Ir. Iswanto, S.T., M.MT.

Progam Studi Teknik Mesin

Universitas Muhammadiyah Sidoarjo

Juni 2026

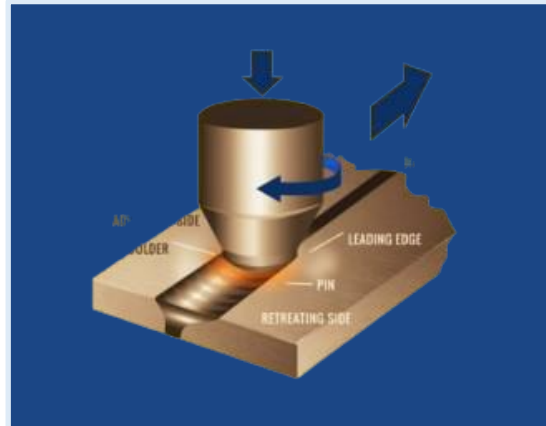


Pendahuluan

Latar Belakang



Perkembangan teknologi 3D printing di Indonesia berkembang pesat, khususnya dengan metode *Fused Deposition Modeling* (FDM) yang banyak menggunakan material *Polylactic Acid* (PLA) karena keunggulannya yang ramah lingkungan dan mudah dicetak (Joseph et al., 2023).



Masalah umum dalam 3D printing adalah keterbatasan ukuran print bed, sehingga dibutuhkan metode penyambungan untuk menggabungkan bagian-bagian cetakan yang besar.



Penelitian sebelumnya terkait FSW fokus pada material logam seperti aluminium dan baja karbon, dan belum ada penelitian yang mengaplikasikan FSW pada material PLA hasil 3D printing.

Rumusan Masalah

Bagaimana

karakteristik material *Polyactic Acid* (PLA) 3D *printing* setelah terkena pengaruh dari *Friction Stir Welding* (FSW)?

Bagaimana

kekuatan tarik dan pola sambungan *Friction Stir Welding* (FSW) dengan material *Polyactic Acid* (PLA) 3D *printing*?

Metode Pengujian

Uji Kekuatan Tarik

1

pengujian ini dilakukan terhadap hasil pengelasan dengan menggunakan metode FSW sesuai dengan standar yang digunakan dalam pengujian ini adalah **standar yang sudah ditetapkan ASTM D038 untuk material *polymer*** yang digunakan untuk mengetahui kekuatan dari suatu material atau spesimen tersebut.



Mesin Uji Tarik

2

Uji *Scanning Electron Microscope* (SEM)

Uji *Scanning Electron Microscope* (SEM) dilakukan untuk menganalisis morfologi permukaan dan struktur mikro pada hasil pengelasan *Friction Stir Welding* (FSW) material *Polylactic Acid* (PLA).

Pengujian ini dilakukan dengan beberapa tahap yaitu

- Persiapan Spesimen : Potongan hasil pengelasan FSW pada material PLA dipotong dengan ukuran tertentu sesuai standar pengujian. Sampel kemudian dibersihkan dari kotoran atau sisa material agar tidak mengganggu kualitas pengamatan.
- Pengamatan dan Dokumentasi : Pengamatan dilakukan pada beberapa area spesifik hasil pengelasan, terutama di zona *nugget*. Setiap visual permukaan direkam untuk dianalisis mengenai struktur mikro sambungan yang kemudian digunakan untuk mengevaluasi kualitas hasil pengelasan FSW pada material PLA.

Metode Olah data

Eksperimen pada penelitian ini menggunakan **metode Desain of Experiment (DOE) Taguchi** yang bertujuan untuk menganalisis data uji coba berdasarkan parameter yang diuji

Parameter yang digunakan dalam penelitian ini adalah **kecepatan putaran tool dengan variasi rpm 730, 950, 1800**. Variasi **kecepatan pengelasan 22, 44, dan 75 mm/menit** dengan suhu 80, 90, 100 oC. Material yang digunakan ***Polyactic Acid* (PLA)**. Tipe sambungan pengelasan yang digunakan yaitu butt joint.

Parameter Uji

1

Parameter Suhu:

- Suhu Pengelasan
- Kecepatan rotasi tool (KRT)
- Kecepatan pengelasan (KP)

2

Parameter tool FSW:

- *Tool geometry pin hexagonal*

Diagram Alir Penelitian

Tahapan penelitian



Metode

Persiapan Alat dan Bahan

Pemanas FSW

Pemanas FSW menggunakan sistem pemanas stationary shoulder FSW yang dirancang untuk meminimalkan panas pada permukaan material khususnya pada material polyactic acid (PLA).

Konsep:

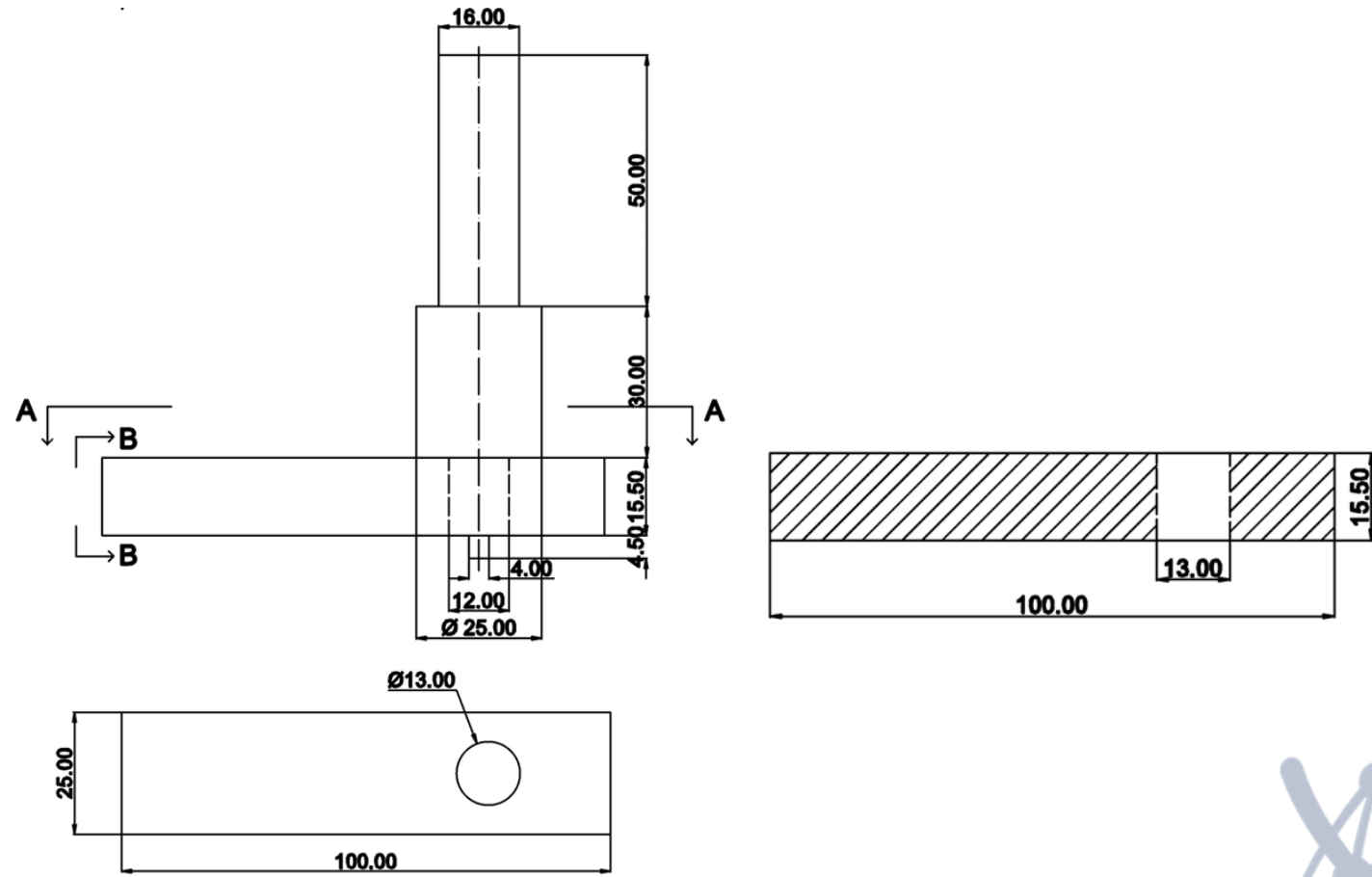
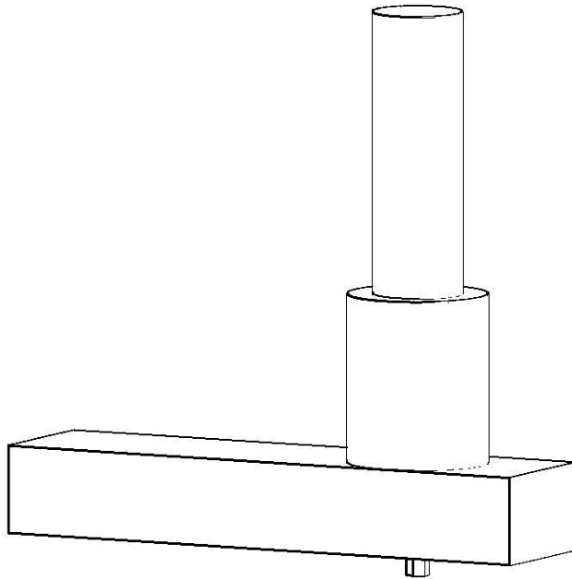
Pada sistem ini, **bagian shoulder alat dibuat stasioner (tidak berputar), sementara pin tetap berputar** untuk menghasilkan panas akibat gesekan.

Tujuan:

Mengurangi panas berlebih pada permukaan sambungan serta menciptakan **distribusi panas yang lebih terkontrol** serta sebagai pendekatan yang penting untuk material PLA yang memiliki rentang suhu titik leleh antara 150o -180o

Metode

Pemanas FSW



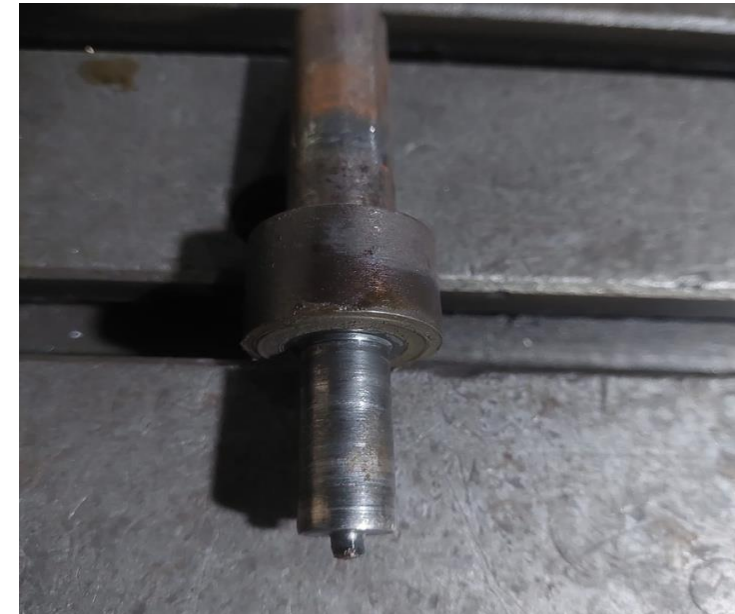
Metode

PERSIAPAN ALAT & BAHAN

Pembuatan Tool Pin FSW

Proses Bubut

- Menggunakan material besi baja SKD61
- Menggunakan mesin bubut L5A
- Lokasi PT Indoprima gemilang



Metode

PERSIAPAN ALAT & BAHAN

Pembuatan Pemanas Stationary Shoulder
Proses Machining & Instalasi

Komponen/part :

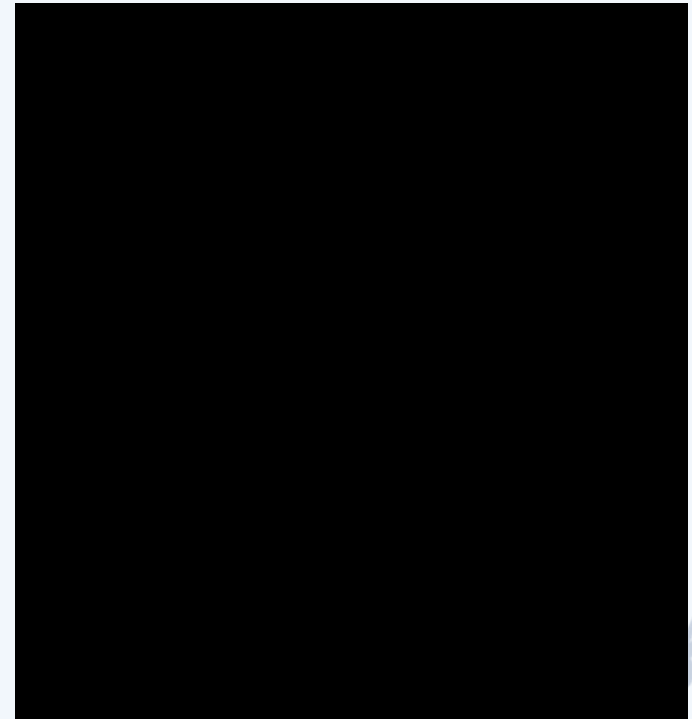
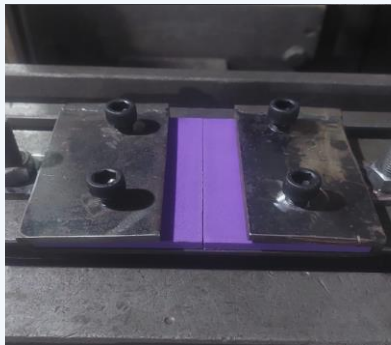
1. Alumunium balok 25X25X200mm
2. Bushing kuningan
3. Bearing tahan panas 6001Z
4. Heater 220v/300w(10X100mm)
5. Thermocouple
6. Thermostat digital



Metode

PERSIAPAN ALAT & BAHAN

Pembuatan Jig Ragum Penjepit Material FSW
Proses Pengelasan dan Assembly part.



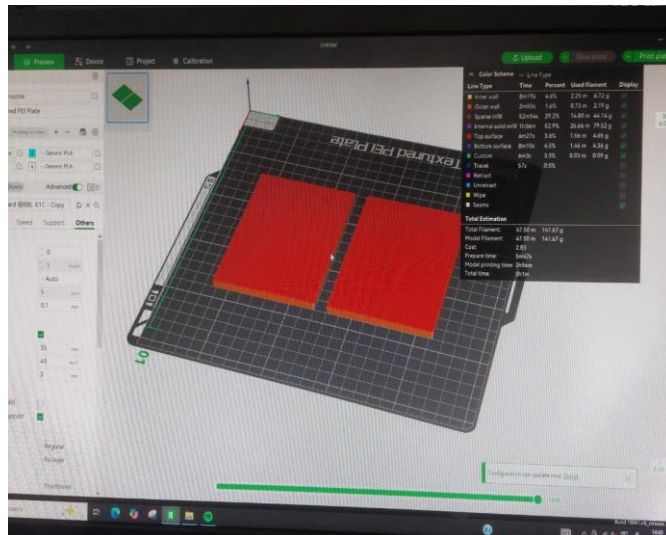
Metode

PERSIAPAN ALAT & BAHAN

Pembuatan Bahan/Cetak Material FSW

Proses cetak material:

- Menggunakan material PLA ELLEGO
- Menggunakan mesin 3D PRINTING BAMBOE LAB ASM P15
- Lokasi cetak Lab mesin umsida



Metode

Desain Eksperimen

No. Spesimen	Suhu (°C)	KP (mm/min)	KRT (rpm)
1	80	22	730
2	80	22	950
3	80	22	1800
4	80	44	730
5	80	44	950
6	80	44	1800
7	80	75	730
8	80	75	950
9	80	75	1800
10	90	22	730
11	90	22	950
12	90	22	1800
13	90	44	730
14	90	44	950
15	90	44	1800
16	90	75	730
17	90	75	950
18	90	75	1800
19	100	22	730
20	100	22	950
21	100	22	1800
22	100	44	730
23	100	44	950
24	100	44	1800
25	100	75	730
26	100	75	950
27	100	75	1800

Metode

Desain Eksperimen

Desain eksperimental parameter tersebut kemudian dilakukan pengolahan data menggunakan metode **DOE TAGUCHI ARRAY L9** untuk ditentukannya parameter yang optimal sebelum dilakukan proses pengelasan.

Dapat dilihat pada tabel tersebut telah terpilih 9 parameter optimal, Yg kemudian siap untuk dilakukannya proses pengelasan menggunakan metode FSW.


Open from
Minitab
Connect®


Open

Taguchi Design

Taguchi Array

L9(3^3)

Factors:

3

Runs:

9

Columns of L9(3^4) array: 1 2 3

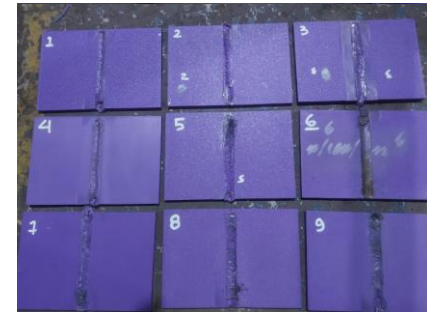
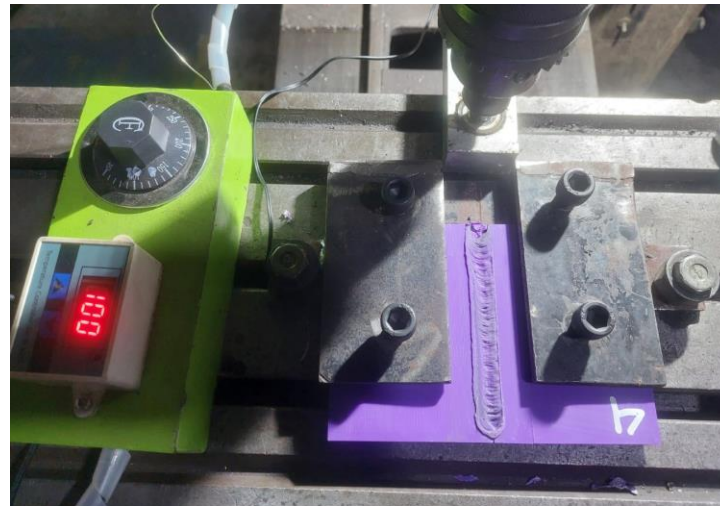
	C1	C2	C3	C4	C5	C6
	SUHU (°C)	KP(mm/min)	KRT (rpm)			
1	80	22	730			
2	80	44	950			
3	80	75	1800			
4	90	22	950			
5	90	44	1800			
6	90	75	730			
7	100	22	1800			
8	100	44	730			
9	100	75	950			

Metode

Pembuatan Sampel Uji Tarik & Uji SEM

Pengelasan FSW:

- Pengelasan 9 spesimen sesuai parameter
- Potong material sesuai standart uji tarik ASTM D638
- Lokasi di PT Indoprima gemilang



Metode

PERSIAPAN ALAT & BAHAN

Pengujian Tarik

Proses uji tarik :

- Menggunakan mesin uji tarik TARNO GROCKI
- Menggunakan standart ASTM D638
- Lokasi pengujian lab teknik mesin Polinema



Metode

Proses pengujian sampel

Pada pengujian tarik, spesimen diberi beban aksial yang meningkat secara kontinu hingga terjadi deformasi dan akhirnya patah. Data yang diperoleh digunakan untuk mengevaluasi kekuatan tarik, elastisitas, plastisitas, serta ketahanan material terhadap beban tarik sampai titik kegagalan.



Hasil dan Pembahasan Penelitian

Data Hasil Uji Tarik

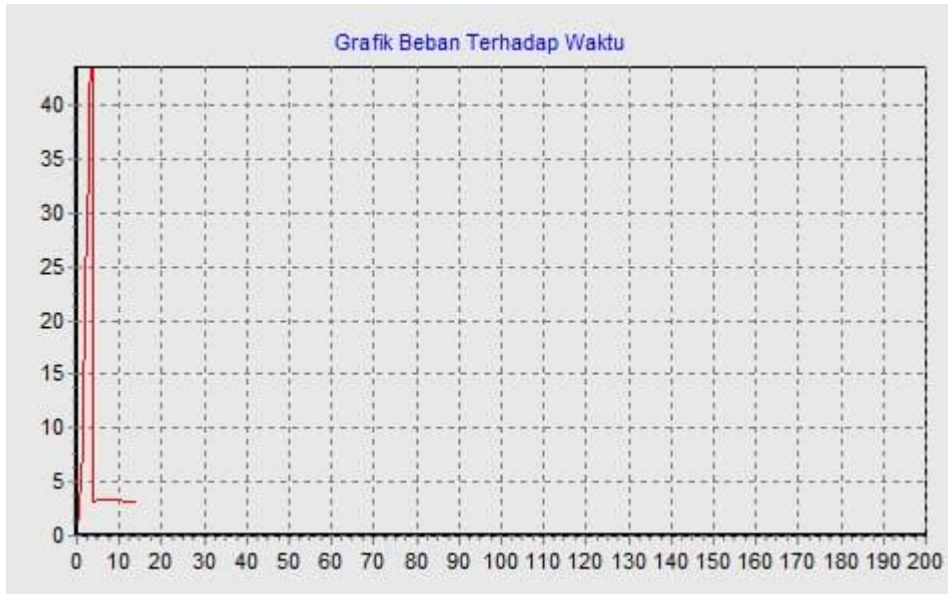
Hasil uji tarik dalam penelitian ini dianalisis untuk menentukan hasil optimal serta sampel yang menggunakan pemanas dibandingkan dengan sampel tanpa pemanas yang berpengaruh terhadap kekuatan tarik. Hasil uji tarik ditunjukkan pada tabel berikut

Kesimpulan Hasil Penelitian

Berdasarkan hasil uji tarik, penggunaan pemanasan terbukti meningkatkan kekuatan tarik material dibandingkan sampel tanpa pemanasan. Kondisi optimal diperoleh pada spesimen **SP9 (100°C, 75 mm/min, 950 rpm)** dengan nilai **stress tertinggi sebesar 19,92 MPa**, beban maksimum **158,4 kg**, dan gaya maksimum **1553,9 N**, sehingga kondisi tersebut direkomendasikan sebagai parameter proses terbaik dalam penelitian ini.

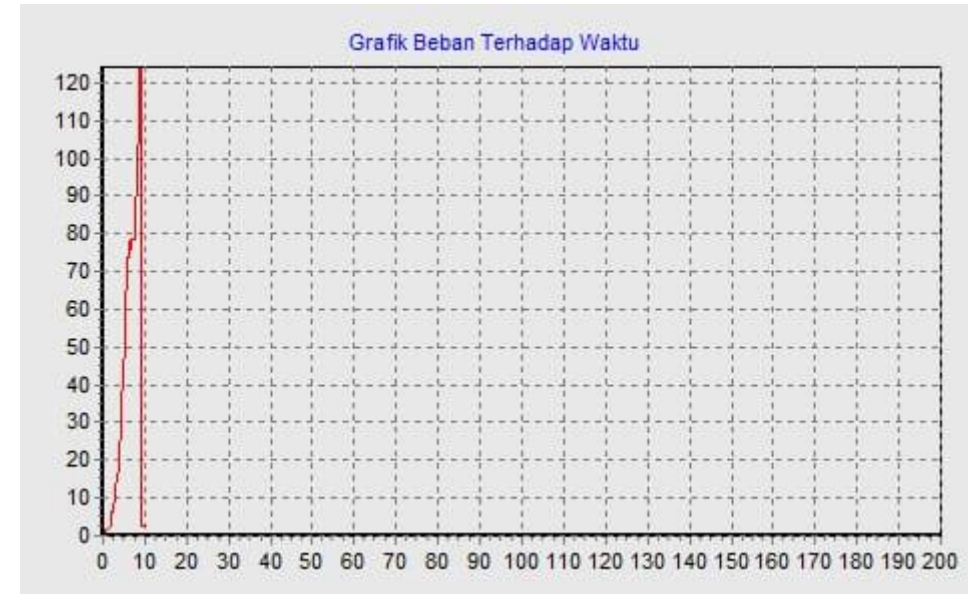
No. Spesimen	Suhu	KP (mm/min)	KRT (Rpm)	Beban (kg)	Jarak / ΔL	Gaya (N)	Strain	Stress (Mpa)
STP	0	75	950	90,20	13,53	884,8	0,08	11,3
SP1	80	22	730	67,20	18,59	659,23	0,113	8,45
SP2	80	44	950	76,40	17,89	749,48	0,108	9,61
SP3	80	75	1800	148,20	12,35	1453,84	0,075	18,64
SP4	90	22	950	66,60	0,88	653,35	0,005	8,38
SP5	90	44	1800	90,20	13,53	884,9	0,082	11,34
SP6	90	75	730	139,40	17,88	1367,51	0,108	17,53
SP7	100	22	1800	95,80	17,53	939,80	0,106	12,05
SP8	100	44	730	112,80	16,94	1106,57	0,103	14,19
SP9	100	75	950	158,40	0,92	1553,90	0,006	19,92

Grafik uji tarik



Spesimen tanpa memanaskan

Grafik beban terhadap waktu menunjukkan bahwa beban meningkat secara bertahap hingga mencapai beban maksimum sebesar 51,8 kg. Setelah mencapai titik maksimum, terjadi penurunan beban secara drastis yang menandakan spesimen mengalami kegagalan atau patah. Setelah patah, beban yang terbaca relatif kecil karena sisa spesimen masih tertahan pada grip mesin pengujian.

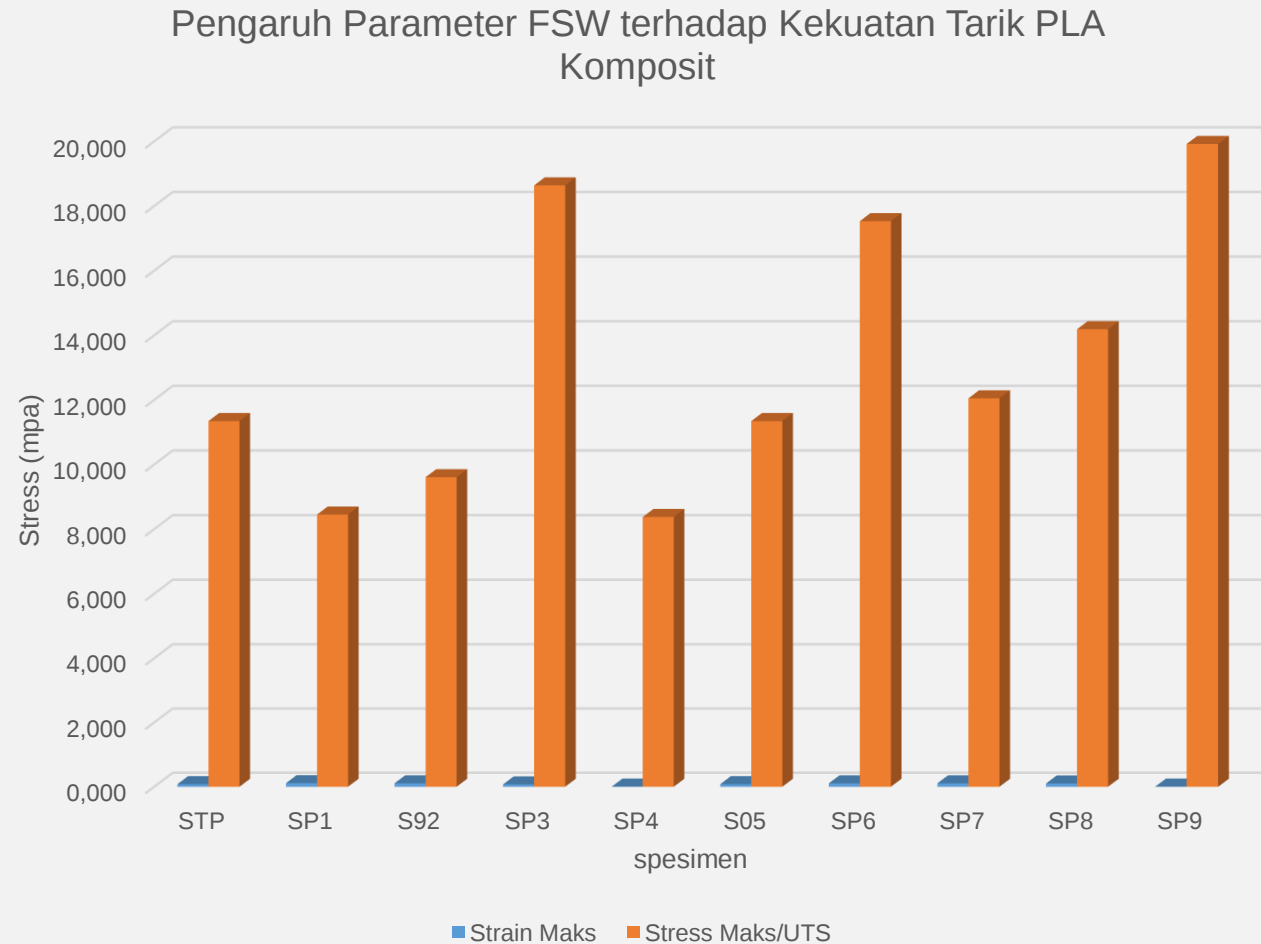
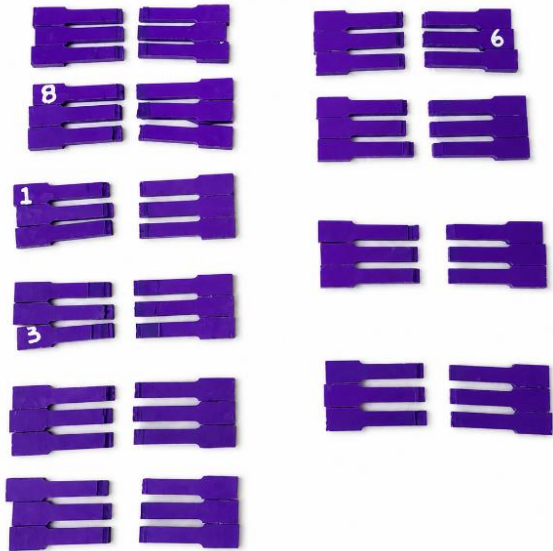


Spesimen terbaik menggunakan pemanas

Grafik beban terhadap waktu menunjukkan bahwa beban meningkat secara bertahap hingga mencapai beban maksimum sebesar 158,40 kg. Setelah mencapai titik maksimum, terjadi penurunan beban secara drastis yang menandakan spesimen mengalami kegagalan atau patah. Setelah patah, beban yang terbaca relatif kecil karena sisa spesimen masih tertahan pada grip mesin pengujian.

Grafik hasil

Dari perbandingan Spesimen tanpa menggunakan pemanas dengan spesimen menggunakan pemanas, dapat disimpulkan bahwa SP9 menghasilkan nilai stress tertinggi sebesar 19,92 MPa pada parameter suhu 100°C, kecepatan pengelasan 75 mm/min, dan putaran tool 950 rpm. Hal ini menunjukkan bahwa kombinasi parameter tersebut menghasilkan kualitas sambungan FSW yang paling baik dibandingkan spesimen lainnya.



Hasil pengolahan data menggunakan IBM SPSS

Dengan dilakukannya 6 pengujian yakni:

1. Statistik Deskriptif

Deskriptives					
Suhu				Statistic	Std. Error
Stress (MPa)	80	Mean		12,23315385	3,220292712
		95% Confidence Interval for Mean	Lower Bound	-1,62264738	
		95% Confidence Interval for Mean	Upper Bound	26,08895508	
		Median		9,608769231	
		Variance		31,111	
		Std. Deviation		5,577710593	
		Minimum		8,451692308	
		Maximum		18,639	
		Range		10,18730769	
		Skewness		1,649	1,225
	90	Mean		12,41761539	2,697032456
		95% Confidence Interval for Mean	Lower Bound	0,813221324	
		95% Confidence Interval for Mean	Upper Bound	24,02200945	
		Median		11,34438462	
		Variance		21,822	
		Std. Deviation		4,671397244	
		Minimum		8,376230769	
		Maximum		17,53223077	
		Range		9,156	
		Skewness		0,979	1,225

100	Mean		15,38576923	2,350520412
	95% Confidence Interval for Mean	Lower Bound	5,272296164	
	95% Confidence Interval for Mean	Upper Bound	25,4992423	
	Median		14,18676923	
	Variance		16,575	
	Std. Deviation		4,071220778	
	Minimum		12,04869231	
	Maximum		19,92184615	
	Range		7,873153846	
	Skewness		1,21	1,225

Nilai rata-rata stress tertinggi diperoleh pada suhu 100°C sebesar 15,39 MPa, lebih tinggi dibandingkan suhu 90°C yaitu 12,42 MPa dan 80°C yaitu 12,23 MPa. Selain itu, nilai standar deviasi pada suhu 100°C juga paling rendah yaitu 4,07 MPa yang menunjukkan bahwa hasil pengujian lebih seragam dan konsisten.

Hasil pengolahan data menggunakan IBM SPSS

2. Korelasi Pearson

Parameter	Statistik	Suhu	KRT (Rpm)	KP (mm/min)	Stress (Mpa)
Suhu	Pearson Correlation	1	0.000	0.000	0.307
	Sig. (2-tailed)		1.000	1.000	0.421
	N	9	9	9	9
KRT (Rpm)	Pearson Correlation	0.000	1	0.000	0.907**
	Sig. (2-tailed)	1.000		1.000	<0.001
	N	9	9	9	9
KP (mm/min)	Pearson Correlation	0.000	0.000	1	0.096
	Sig. (2-tailed)	1.000	1.000		0.806
	N	9	9	9	9
Stress (Mpa)	Pearson Correlation	0.307	0.907**	0.096	1
	Sig. (2-tailed)	0.421	<0.001	0.806	
	N	9	9	9	9

KRT (RPM) dengan Stress memiliki korelasi sangat kuat dan positif ($r = 0,907$; $p < 0,001$), sehingga semakin tinggi KRT (RPM), maka nilai stress cenderung semakin tinggi. Hubungan ini signifikan secara statistik. Suhu dengan Stress memiliki korelasi positif lemah ($r = 0,307$; $p = 0,421$), sehingga pengaruh suhu terhadap stress tidak signifikan. KP (mm/min) dengan Stress memiliki korelasi sangat lemah ($r = 0,096$; $p = 0,806$), sehingga hampir tidak ada hubungan antara KP dan stress. Antar faktor Suhu, KRT, dan KP tidak terdapat korelasi ($r = 0,000$), menunjukkan bahwa masing-masing faktor berdiri sendiri dan tidak saling memengaruhi.

Pearson Correlations

- Highly Positive:** (KRT (Rpm) <---> Stress (MPa))
- Positive:** (Suhu <---> Stress (MPa)), (KP (mm/min) <---> Stress (MPa))
- No Linear Correlation:** (Suhu <---> (KRT (Rpm))), (Suhu <---> KP (mm/min)), (KRT (Rpm) <---> KP (mm/min))
- Negative:** (None)
- Highly Negative:** (None)

Hasil pengolahan data menggunakan IBM SPSS

2. Hasil Uji Korelasi Pearson

		Stress (Mpa)	Suhu	KRT (Rpm)	KP (mm/min)
Pearson Correlation	Stress (Mpa)	1.000	0.307	0.907	0.096
	Suhu	0.307	1.000	0.000	0.000
	KRT (Rpm)	0.907	0.000	1.000	0.000
	KP (mm/min)	0.096	0.000	0.000	1.000
Sig. (1-tailed)	Stress (Mpa)	.	0.211	<0.001	0.403
	Suhu	0.211	.	0.500	0.500
	KRT (Rpm)	0.000	0.500	.	0.500
	KP (mm/min)	0.403	0.500	0.500	.
N	Stress (Mpa)	9	9	9	9
	Suhu	9	9	9	9
	KRT (Rpm)	9	9	9	9
	KP (mm/min)	9	9	9	9

Data korelasi yang diperoleh, nilai stress paling dipengaruhi oleh KRT (RPM) dengan koefisien korelasi 0,907 dan nilai signifikansi $p < 0,001$. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan KRT cenderung diikuti oleh peningkatan nilai stress secara nyata. Sementara itu, suhu ($r = 0,307$; $p = 0,211$) dan KP ($r = 0,096$; $p = 0,403$) memiliki hubungan yang lemah dan tidak signifikan terhadap stress. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa KRT merupakan faktor yang paling berpengaruh terhadap nilai stress, sedangkan suhu dan KP tidak memberikan pengaruh yang berarti pada rentang pengujian yang dilakukan.

Pearson Correlations

- Highly Positive:** (KRT (Rpm) <---> Stress (MPa))
- Positive:** (Suhu <---> Stress (MPa)), (KP (mm/min) <---> Stress (MPa))
- No Linear Correlation:** (Suhu <---> (KRT (Rpm))), (Suhu <---> KP (mm/min)), (KRT (Rpm) <---> KP (mm/min))
- Negative:** (None)
- Highly Negative:** (None)

Hasil pengolahan data menggunakan IBM SPSS

2. Hasil ANOVA (F)

ANOVA

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	146,225	3	48,742	21,058	0,003 ^b
	Residual	11,573	5	2,315		
	Total	157,798	8			

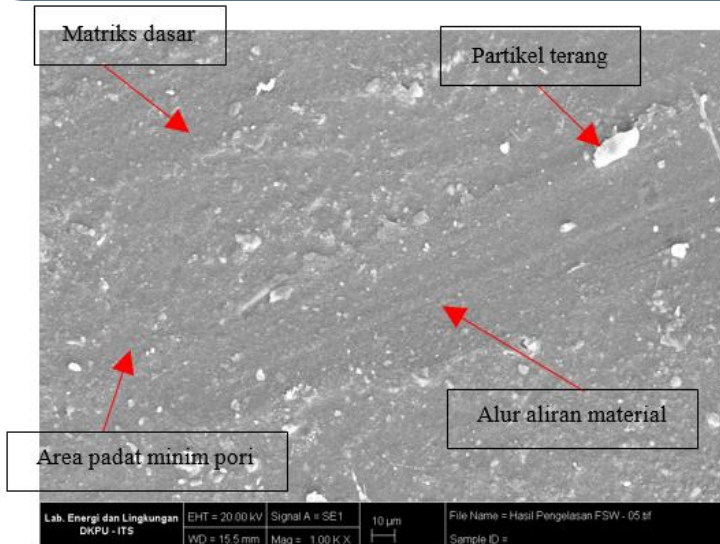
ANOVA regresi yaitu nilai $F = 21,058$ menunjukkan bahwa model regresi memiliki pengaruh yang cukup kuat terhadap variabel Stress (MPa). Nilai Signifikansi (Sig.) = 0,003. Karena $0,003 < 0,05$, maka model regresi signifikan. Secara bersama-sama variabel KP (mm/min), KRT (rpm), dan Suhu berpengaruh signifikan terhadap Stress (MPa). Tetapi pada tabel nilai koefisien, KRT (rpm) merupakan parameter yang berpengaruh signifikan dan paling dominan terhadap Stress (MPa).

Coefficients (Uji t (pengaruh masing-masing parameter) dan persamaan regresi)

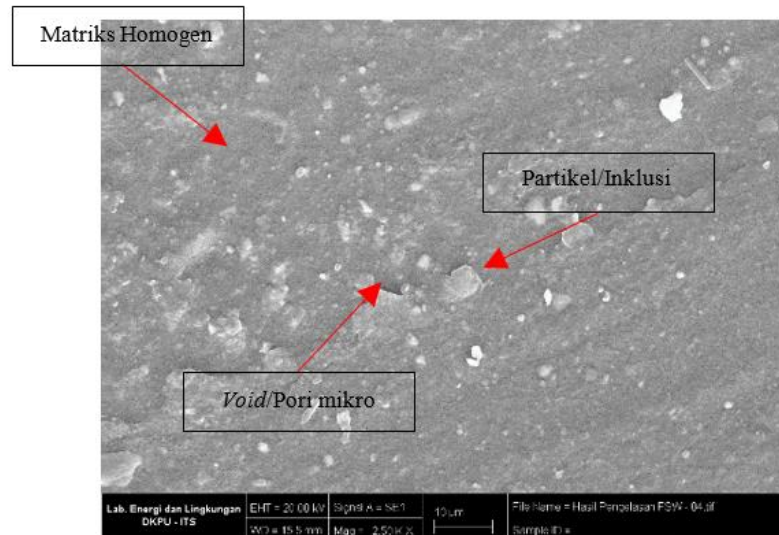
Model		Unstandardized B	Coefficients Std. Error	Standardized Coefficients Beta	t	Sig.	95,0% Confidence Interval for B	
							Lower Bound	Upper Bound
1	(Constant)	-10,062	5,859		-1,717	0,147	-25,125	5,000
	Suhu	0,158	0,062	0,307	2,538	0,052	-0,002	0,317
	KRT (Rpm)	0,175	0,023	0,907	7,490	< 0,001	-0,115	0,235
	KP (mm/min)	0,001	0,001	0,096	0,791	0,0465	-0,002	0,004

Hasil Pengujian SEM

Hasil pengamatan SEM menunjukkan bahwa daerah sambungan hasil Friction Stir Welding memiliki morfologi yang relatif homogen dengan distribusi partikel penguat yang cukup merata pada matriks PLA. Meskipun masih ditemukan beberapa void dan aglomerasi partikel, secara umum struktur permukaan menunjukkan ikatan yang baik antar material. Kondisi ini sejalan dengan hasil uji tarik dimana SP9 menghasilkan nilai kekuatan tarik tertinggi sebesar 19,92 MPa. Sebaliknya, keberadaan void dan ketidakseragaman distribusi partikel diduga menjadi penyebab rendahnya kekuatan tarik pada sampel tanpa pemanas (STP) dengan hasil 11,3 Mpa.



SP9



STP

Hasil uji SEM spesimen SP9 menunjukkan struktur mikro yang homogen, rapat, dan memiliki cacat yang sangat sedikit. Struktur ini membuat sambungan las menjadi sangat kuat. Batas interface terlihat jelas tanpa adanya cacat makro seperti void atau retakan yang signifikan. Partikel terang tersebar merata dengan jumlah pori yang rendah, menandakan proses pengadukan material selama FSW berlangsung efektif. Kombinasi suhu pemanasan awal 100°C, kecepatan pengelasan 75 mm/min, dan kecepatan rotasi tool 950 rpm menghasilkan aliran material yang baik.

Sementara itu, hasil uji SEM sampel tanpa pemanas (STP) menunjukkan struktur mikro yang kurang homogen dibandingkan SP9. Partikel terang tersebar tidak merata dan terdapat beberapa area yang mengindikasikan ikatan material belum sempurna. Kondisi ini diduga terjadi karena tidak adanya pemanasan awal, sehingga pelunakan material hanya bergantung pada panas gesekan tool dan menyebabkan aliran serta pengadukan material kurang optimal selama proses FSW. Meskipun menggunakan kecepatan pengelasan 75 mm/min dan kecepatan rotasi tool 950 rpm yang sama dengan SP9, ketiadaan pemanasan awal membuat energi panas yang diterima material lebih rendah, sehingga proses rekristalisasi dinamis dan pembentukan butir halus tidak seoptimal sampel dengan pemanasan awal.

Kesimpulan

1. Karakteristik material *Polyactic Acid* (PLA) setelah terkena pengaruh *Friction Stir Welding* (FSW) berdasarkan pengujian *Scanning Eletron Microscope* (SEM) dilakukan pada sampel terbaik yaitu SP9 dan sampel tanpa pemanas (STP) terjadi perbedaan mikrostruktur yang dipengaruhi oleh suhu pemanasan awal. Hal ini karena kedua sampel memiliki kecepatan pengelasan 75 mm/min dan kecepatan rotasi tool 950 rpm yang sama, sedangkan perbedaannya terdapat pada suhu pemanasan. Pemberian pemanasan dengan suhu awal 100°C pada SP9 menghasilkan struktur mikro yang lebih homogen dan rapat.
2. Kekuatan tarik tertinggi didapatkan pada sampel SP9 dengan nilai kekuatan tarik (*stress*) sebesar 19,92 MPa dengan parameter suhu 100°C, Kecepatan Pengelasan (KP) 75 mm/menit, dan Kecepatan Rotasi Tool (KRT) 950 rpm. Pola sambungan yang menggunakan sistem pemanas *stationary shoulder* pada kondisi optimal terbukti jauh lebih kuat dibandingkan dengan sampel tanpa pemanas (STP), yang hanya memiliki kekuatan tarik sebesar 11,3 MPa. Kemudian, berdasarkan analisis korelasi Pearson dan ANOVA, Kecepatan Rotasi Tool (KRT) merupakan parameter yang paling berpengaruh signifikan dan dominan terhadap kekuatan tarik sambungan ($r = 0,907; p < 0,001$). Sementara itu, parameter suhu memberikan pengaruh optimal dengan rata-rata stress tertinggi sebesar 15,39 MPa pada rentang 100°C karena menghasilkan data kekuatan tarik yang paling tinggi sekaligus seragam dengan standar deviasi terendah sebesar 4,07 MPa. Sebaliknya, Kecepatan Pengelasan (KP) memiliki pengaruh yang sangat lemah dan tidak signifikan terhadap kekuatan sambungan.

Saran

Adapun saran pada penelitian ini yaitu:

Perlu dilakukan pengembangan parameter pengelasan untuk variasi Kecepatan Rotasi *Tool* (KRT) lebih dari 1800 rpm untuk mengetahui batas maksimal kekuatan tarik, serta variasi Kecepatan Pengelasan (KP) lebih lambat atau lebih cepat

Referensi

- [1] Buchmann, E., Erdmann, M., Köberl, M., & Höfer, P. (2022). A stationary shoulder with fluid temperature control for friction stir welding of polymers. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 121(9–10), 5901–5911.
- [2] Hadi, S., Setiawan, A., Nugroho, P. W., Hermansyah, A. D., & Alfisahri, A. (2020). *Effect of FSW Heating Base Temperature on Tensile Strength and Hardness of AA 1100 Welds*. *INTEK: Jurnal Penelitian*, 7(2).
- [3] Joseph, T. M., Kallingal, A., Suresh, A. M., Mahapatra, D. K., Hasanin, M. S., Haponiuk, J., & Thomas, S. (2023, March 1). 3D printing of polylactic acid: recent advances and opportunities. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH.
- [4] Liu, J.-F., Zhou, Y.-G., Chen, S.-J., Ren, S.-Q., & Zou, J. (2023). Effects of friction stir welding on the mechanical behaviors of extrusion-based additive manufactured polymer parts. *Polymers*, 15(15), 3288.
- [5] Mishra, R. S., & Ma, Z. Y. (2005). Friction stir welding and processing. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 50(1-2), 1-78.
- [6] Rajabi, A., Rostami, S., & Aliha, M. R. M. (2021). Optimization of properties for 3D printed PLA material using Taguchi, ANOVA and multi-objective methodologies. *Procedia Structural Integrity*, 34, 71–77.
- [7] Zhang, H., Liu, H., & Yu, L. (2017). Effects of preheating treatment on temperature distribution and material flow of aluminum alloy and steel friction stir welds. *Journal of Manufacturing Processes*, 29, 29–40.

