

[Effect of *Stationary shoulder* Addition on Tensile Strength and Scanning Electron Microscope (SEM) of Friction Stir Welding (FSW) in 3D Printed Polylactic Acid (PLA) Materials]

[Pengaruh Penambahan *Stationary shoulder* pada Kekuatan Tarik dan Scanning Electron Microscope (SEM) Sambungan *Friction Stir Welding* (FSW) pada Material *Polylactic Acid* (PLA) Hasil 3D Printing]

Muhammat Choirul Wildan¹⁾, Iswanto²⁾

¹⁾Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

Email Penulis Korespondensi: iswanto@umsida.ac.id

Abstract. This study aims to determine the effect of tensile strength and microstructure of Friction Stir Welding (FSW) joints on 3D printed Polylactic Acid (PLA) materials with the addition of a stationary shoulder. The background of this study is the limited size of 3D printed materials so that an effective joining method is needed, one of which is FSW which is a solid phase welding method. The research method used is an experiment with variations in temperature parameters, tool rotation speed, and welding speed. Testing is carried out through tensile tests to determine the joint strength and Scanning Electron Microscope (SEM) tests to analyze the micro morphology and bond quality in the joint area. The characteristics of Polylactic Acid (PLA) material after being exposed to Friction Stir Welding (FSW) based on Scanning Electron Microscope (SEM) testing carried out on the best sample, namely SP9 and samples without heating (STP), there are differences in microstructure influenced by the initial heating temperature. This is because both samples have a welding speed of 75 mm/min and a tool rotation speed of 950 rpm, while the difference is in the heating temperature. Preheating with a temperature of 100°C on SP9 produces a more homogeneous and dense microstructure. Then, the highest tensile strength results were obtained in the SP9 sample of 19.92 MPa at a temperature parameter of 100 °C, Welding Speed (KP) of 75 mm/min, and Tool Rotation Speed (KRT) of 950 rpm. The joint pattern with the optimal stationary shoulder heating system is proven to be much stronger than the Unheated Sample (STP) which only has a tensile strength of 11.3 MPa. Based on Pearson correlation analysis and ANOVA, KRT is the parameter that has the most significant and dominant influence on the tensile strength of the joint ($r = 0.907$; $p < 0.001$). The temperature parameter provides an optimal influence in the range of 100°C with the highest average stress of 15.39 MPa and the lowest standard deviation of 4.07 MPa which produces the highest and most uniform data, while KP has a very weak and insignificant influence.

Keywords – Tensile Strength; Friction Stir Welding; Polylactic Acid; Stationary shoulder ; Scanning Electron Microscope; 3D Printing

Abstrak. Penelitian ini bertujuan mengetahui pengaruh kekuatan tarik dan struktur mikro sambungan *Friction Stir Welding* (FSW) pada material *Polylactic Acid* (PLA) hasil 3D printing dengan penambahan *stationary shoulder*. Latar belakang penelitian adalah keterbatasan ukuran cetak 3D printing sehingga diperlukan metode penyambungan yang efektif, salah satunya FSW yang merupakan metode pengelasan fase padat. Metode penelitian yang digunakan adalah eksperimen dengan variasi parameter suhu, kecepatan putaran *tool*, dan kecepatan pengelasan. Pengujian dilakukan melalui uji tarik untuk mengetahui kekuatan sambungan serta uji *Scanning Electron Microscope* (SEM) untuk menganalisis morfologi mikro dan kualitas ikatan pada daerah sambungan. Karakteristik material *Polylactic Acid* (PLA) setelah terkena pengaruh *Friction Stir Welding* (FSW) berdasarkan pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM) dilakukan pada sampel terbaik yaitu SP9 dan sampel tanpa pemanasan (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 awal dengan suhu 100°C pada SP9 menghasilkan struktur mikro yang lebih homogen dan rapat. Kemudian, hasil kekuatan tarik tertinggi didapatkan pada sampel SP9 sebesar 19,92 MPa pada parameter suhu 100 °C, Kecepatan Pengelasan (KP) 75 mm/menit, dan Kecepatan Rotasi *Tool* (KRT) 950 rpm. Pola sambungan dengan sistem pemanas *stationary shoulder* kondisi optimal ini terbukti jauh lebih kuat dibandingkan Sampel Tanpa Pemanas (STP) yang hanya memiliki kekuatan tarik 11,3 MPa. Berdasarkan analisis korelasi *Pearson* dan ANOVA, KRT merupakan parameter yang paling berpengaruh signifikan dan dominan terhadap kekuatan tarik sambungan ($r = 0,907$; $p < 0,001$). Parameter suhu memberikan pengaruh optimal pada rentang 100°C dengan rata-rata stress tertinggi 15,39 MPa dan standar deviasi terendah 4,07 MPa yang menghasilkan data paling tinggi sekaligus seragam, sedangkan KP memiliki pengaruh yang sangat lemah dan tidak signifikan.

Kata Kunci – Kekuatan Tarik; *Friction Stir Welding*; *Polylactic Acid*; *Stationary shoulder* ; *Scanning Electron Microscope*; Pencetakan 3D

I. PENDAHULUAN

Perkembangan manufaktur aditif di Indonesia, khususnya 3D *printing metode Fused Deposition Modeling* (FDM), semakin pesat dengan penggunaan material *Polylactic Acid* (PLA) yang ramah lingkungan dan memiliki sifat mekanik yang baik. Namun, keterbatasan ukuran print bed menjadi kendala dalam pembuatan komponen besar sehingga diperlukan metode penyambungan yang efektif. Salah satu metode yang mulai dikembangkan untuk material polimer adalah Friction Stir Welding (FSW) [1].

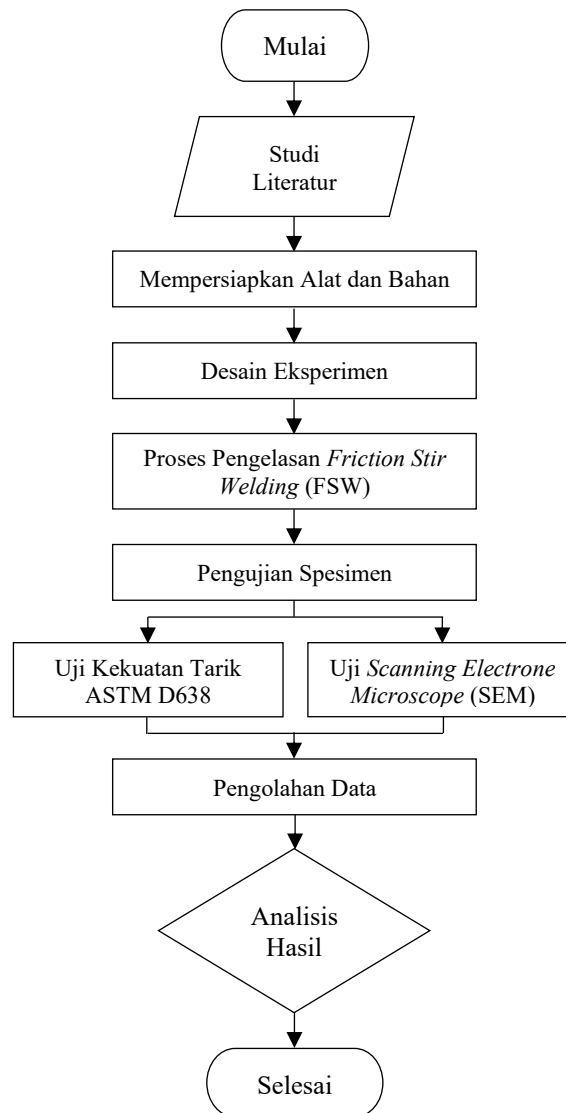
FSW merupakan metode sambungan fase padat (*solid state welding*) yang menggunakan *tool* berputar untuk menghasilkan panas gesekan sehingga material melunak tanpa mencair dan membentuk sambungan yang kuat [2]. Metode ini memiliki keunggulan berupa kebutuhan energi yang rendah, hasil sambungan yang lebih halus, kuat, dan minim porositas, serta mengurangi potensi kegagalan dibandingkan pengelasan konvensional [3]. Penelitian sebelumnya menunjukkan pengaruh parameter FSW terhadap sifat mekanik, seperti pada aluminium paduan dengan tegangan tarik tertinggi 200,8 MPa dan dampak 0,39 J/mm² pada feed rate 180 mm/menit, serta pada Aluminium 6061 dengan kuat tarik terbaik 150,06 MPa pada feed rate 70 mm/min dan dampak tertinggi 0,21 J/mm² pada 30 mm/min. Namun, penelitian FSW masih didominasi pada material logam, dan belum banyak diterapkan pada material manufaktur aditif seperti *Polylactic Acid* (PLA) [4].

Berdasarkan pernyataan *Friction Stir Welding* (FSW) untuk material *Polylactic Acid* (PLA) masih belum dilakukan sehingga pada penelitian ini dilakukannya analisis sambungan FSW pada material *Polylactic Acid* (PLA) hasil 3D *printing* untuk mengetahui kekuatan tarik dan pengujian *Scanning Electrone Microscope* (SEM) untuk mengetahui perubahan morfologi secara mikrostruktur dan mengamati cacat pada daerah sambungan.

II. METODE

A. Diagram Alir Penelitian

Proses penelitian dimulai dari kajian literatur hingga tahap analisis hasil pengujian. Metode penelitian ini adalah studi eksperimental, yaitu melakukan percobaan secara langsung di laboratorium. Diagram alir penelitian “Pengaruh Penambahan *Stationary shoulder* Pada Kekuatan Tarik Dan *Scanning Electrone Microscope* (SEM) Sambungan *Friction Stir Welding* (FSW) Pada Material *Polylactic Acid* (PLA) Hasil 3D *Printing*” ditunjukkan pada **Gambar 1**.



Gambar 1 Diagram alir penelitian

B. Alat dan Bahan Penelitian

Pengelasan dilakukan menggunakan alat mesin *milling*, *tool* pengelasan *Friction Stir Welding* (FSW), material yang digunakan untuk uji coba pengelasan adalah *Polylactic Acid* (PLA) 3D *printing*, serta perlengkapan pendukung lainnya. Berikut merupakan alat dan bahan yang digunakan:

1. Mesin Pembuatan Uji Coba Pengelasan FSW

Mesin yang digunakan untuk pembuatan uji coba pengelasan FSW adalah mesin dengan tipe Frais Universal HOWA SANGYOU yang ditunjukkan **Gambar 2**.



Gambar 2 Mesin Frais Universal HOWA SANGYOU

Pada percobaan ini, spesimen dijepit menggunakan ragum, yaitu ragum meja datar yang berfungsi sebagai penjepit benda kerja selama proses pengelasan FSW berlangsung. Ragum meja datar tersebut dapat dilihat pada **Gambar 3**.



Gambar 3 Ragum Meja Datar

2. Tool Pengelasan FSW

Tool pengelasan FSW pada eksperimen ini digunakan tipe *Taper Hexagonal* yang memiliki bentuk pin yang berbentuk segi enam. **Gambar 4** menunjukkan *taper hexagonal tool*.

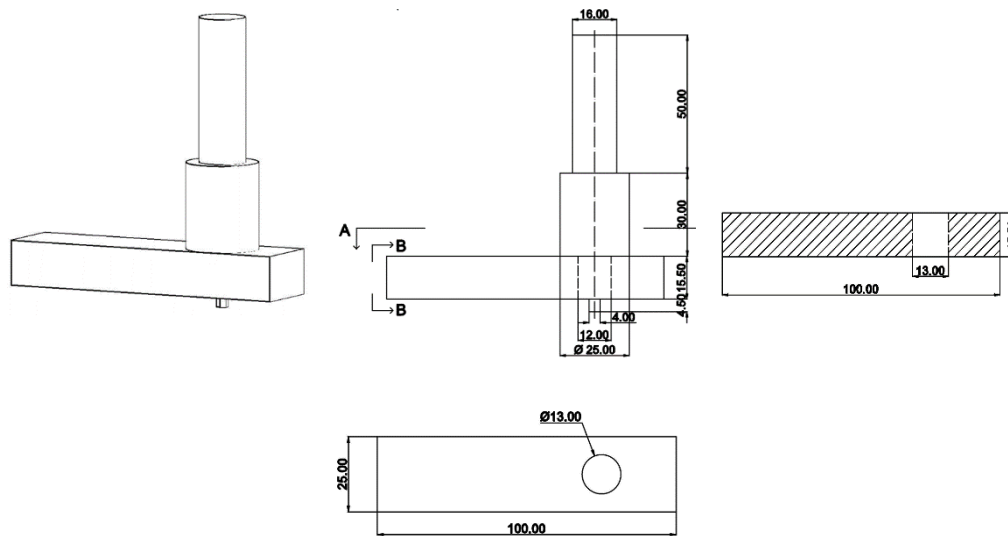


Gambar 4 *Taper Hexagonal Tool*

3. Pemanas FSW

Pemanas FSW menggunakan sistem *stationary shoulder* yang dirancang untuk mengatur panas pada permukaan material saat pengelasan, khususnya *Polylactic Acid* (PLA). Pada sistem ini, shoulder tidak berputar sementara pin tetap berputar untuk menghasilkan panas gesekan, sehingga distribusi panas lebih terkontrol dan mengurangi panas berlebih pada sambungan [5]. Pendekatan ini efektif untuk material PLA yang memiliki titik

leleh 150–180°C dan sensitif terhadap suhu, sehingga suhu proses harus dijaga agar tidak terjadi degradasi termal [6]. Ilustrasi pemanas yang digunakan ditunjukkan pada **Gambar 5**.



(a)



(b)

Gambar 5 (a) Desain Pemanas FSW;(b) Pemanas FSW

4. Material Uji Coba Pengelasan (Spesimen)

Material uji coba atau spesimen yang digunakan adalah *Polylactic Acid* (PLA) 3D printing dengan titik leleh material di suhu 150° -180° ditunjukkan pada **Gambar 6**.



(a)



(b)

Gambar 6 (a) Material *Polylactic Acid* (PLA);(b) *Polylactic Acid* (PLA) 3D Printing

C. Desain Eksperimental

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

1. Parameter mesin

- Suhu pengelasan
 - Kecepatan rotasi *tool* (KRT)
 - Kecepatan pengelasan (KP)
2. Parameter *tool* FSW
- *Tool Geometry Pin Hexagonal*

desain eksperimen pada penelitian ini ditunjukkan pada **Tabel 1**.

Tabel 1 Desain Eksperimen Uji Coba

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

Desain eksperimental parameter tersebut kemudian dilakukan pengolahan data menggunakan metode DOE TAGUCHI ARRAY L9 untuk ditentukannya parameter yang optimal sebelum dilakukan proses pengelasan yang ditunjukkan pada **Tabel 2**.

Tabel 2 Data Eksperimental Metode DOE Taguchi

Taguchi Design

Taguchi Array L9(3⁴)

Factors: 3

Runs: 9

Columns of L9(3⁴) 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			

D. Proses Pengelasan *Friction Stir Welding* (FSW)

Pengelasan menggunakan mesin *Frais* Universal HOWA SANGYOU. Parameter penilitian meliputi kecepatan putaran *tool* dengan variasi rpm 730, 950, 1800. Variasi kecepatan pengelasan 22, 44, dan 75 mm/menit dengan suhu 80, 90, 100 °C. Material yang digunakan *Polylactic Acid* (PLA). Tipe sambungan pengelasan yang digunakan yaitu *butt joint*. Proses pengelasan ditunjukkan pada **Gambar 3**.

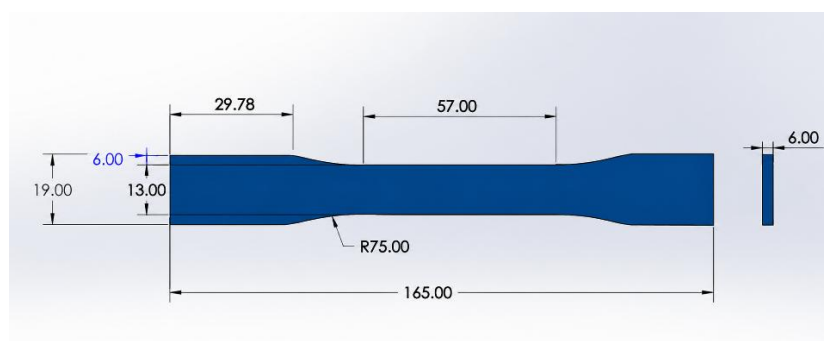


Gambar 7 Proses Pengelasan Metode FSW

E. Pengujian Spesimen

1. Uji Kekuatan Tarik *Friction Stir Welding* (FSW)

Setelah dilakukan pengelasan, selanjutnya spesimen yang sudah di las akan diuji dengan menggunakan uji tarik, pengujian ini dilakukan terhadap hasil pengelasan dengan menggunakan metode FSW sesuai dengan standar yang sudah ditetapkan ASTM D638 untuk material *polymer* yang digunakan untuk mengetahui kekuatan dari suatu material atau spesimen tersebut [7]. Berikut gambar spesimen dan mesin uji tarik yang ditunjukkan pada **Gambar 8**.



(a)



(b)

Gambar 8 (a) Spesimen Uji Tarik ; (b) Mesin Uji Tarik

2. Uji *Scanning Electron Microscope* (SEM)

Uji SEM dilakukan untuk menganalisis morfologi permukaan dan struktur mikro pada hasil pengelasan FSW material PLA. Tujuan pengujian ini adalah memperoleh informasi mengenai kondisi ikatan pada daerah sambungan, termasuk *nugget zone*.

Pengujian ini dilakukan dengan beberapa tahap yaitu

1. 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.

2. 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 dikemudian digunakan untuk mengevaluasi kualitas hasil pengelasan FSW pada material PLA.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Uji Pengelasan *Friction Stir Welding* (FSW)

Hasil dari pengujian data eksperimen menggunakan metode FSW dengan sistem *stationary shoulder* ditunjukkan pada **Gambar 9** dan **Tabel 3**.

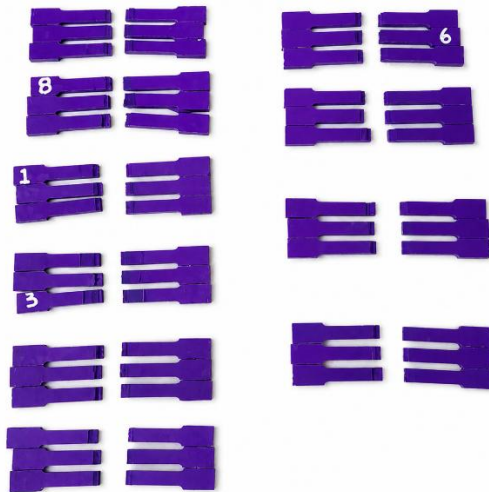
**Gambar 9** Spesimen Hasil Uji Pengelasan**Tabel 3** Hasil Uji Pengelasan FSW

No. Spesimen	Suhu (°C)	KP (mm/min)	KRT (rpm)	Dokumentasi		
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			

No. Spesimen	Suhu (°C)	KP (mm/min)	KRT (rpm)	Dokumentasi		
8	100	44	730			
9	100	75	950			

B. 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 **Gambar 10** dan **Tabel 4**.



Gambar 10 Hasil uji tarik 9 sampel

Tabel 4 Hasil uji tarik

No. Spesimen	Suhu	KP (mm/min)	KRT (Rpm)	Beban (kg)	Jarak / ΔL	Gaya (N)	Strain	Stress (Mpa)
STP	0	75	950	90,20	16,82	884,86	0,08	11,34
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	10,88	653,35	0,066	8,38
SP5	90	44	1800	90,20	13,53	884,86	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	11,92	1553,90	0,072	19,92

Keterangan:

STP: Sampel tanpa pemanas

SP1: Sampel parameter 1

SP2: Sampel parameter 2

SP3: Sampel parameter 3

SP4: Sampel parameter 4

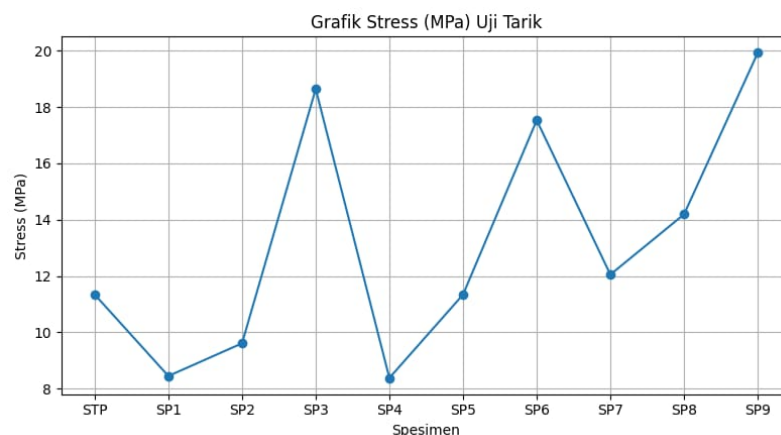
SP5: Sampel parameter 5

SP6: Sampel parameter 6

SP7: Sampel parameter 7

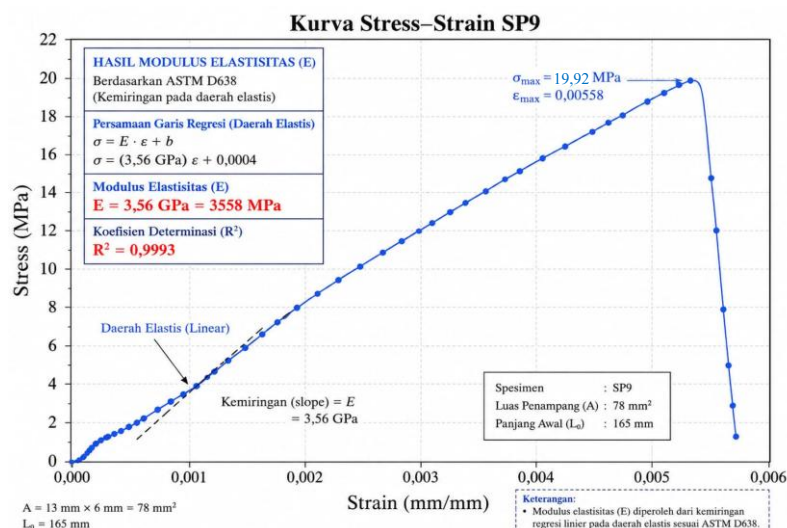
SP8: Sampel parameter 8

SP9: Sampel parameter 9

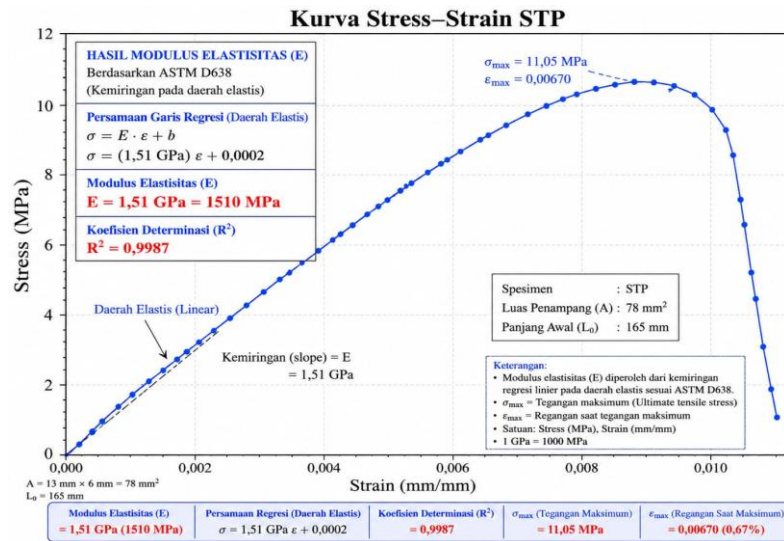


Gambar 11 Grafik Hasil Uji Tarik Spesimen

Gambar 11 menunjukkan perbandingan sampel tanpa menggunakan pemanas dengan sampel 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 sampel lainnya.



Gambar 12 Grafik Stress-Strain SP9



Gambar 13 Grafik Stress-Strain Sampel Tanpa Pemanas (STP)

Berdasarkan data pengujian, **Gambar 12** menunjukkan nilai stress tertinggi sebesar 19,92 MPa diperoleh pada spesimen SP9 dengan parameter suhu 100°C, KP 75 mm/min, dan KRT 950 rpm. Jika dibandingkan dengan spesimen tanpa pemanas (STP) pada **Gambar 13** yang memiliki parameter KP 75 mm/min dan KRT 950 rpm menghasilkan stress 11,30 MPa, terlihat bahwa peningkatan suhu menjadi faktor utama yang meningkatkan kekuatan tarik sambungan. Peningkatan suhu hingga 100°C menghasilkan kekuatan tarik yang lebih tinggi dibandingkan suhu 80°C dan 90°C. Hal ini menunjukkan bahwa pemanasan awal membantu melunakkan material sehingga proses pengadukan menjadi lebih efektif dan ikatan antar material lebih sempurna [8].

Dari sisi kecepatan pengelasan (KP), nilai terbaik diperoleh pada kecepatan 75 mm/min. Kecepatan ini mampu menghasilkan panas yang cukup tanpa menyebabkan pendinginan terlalu cepat, sehingga sambungan yang terbentuk menjadi lebih kuat. Pada KP yang lebih rendah yaitu 22 mm/min dan 44 mm/min, nilai stress cenderung lebih rendah. Sementara itu, berdasarkan kecepatan rotasi tool (KRT), hasil terbaik diperoleh pada 950 rpm. Putaran ini menghasilkan panas dan pengadukan material yang cukup untuk membentuk sambungan yang homogen. Pada putaran yang terlalu rendah (730 rpm), panas yang dihasilkan kurang optimal, sedangkan pada putaran yang terlalu tinggi (1800 rpm) meskipun dapat meningkatkan panas, tidak selalu menghasilkan kekuatan tarik tertinggi karena berpotensi menyebabkan aliran material yang kurang stabil.

C. Metode ANOVA Taguchi

Analisis menggunakan metode ANOVA Taguchi dilakukan menggunakan software minitab untuk mengetahui seberapa besar pengaruh masing-masing parameter terhadap nilai kekuatan tarik. Kemudian, pengaruh terhadap respon tersebut dievaluasi melalui Analisis Varians (ANOVA) dan percobaan konfirmasi dilakukan untuk memvalidasi hasil optimal. Sebelum analisis ANOVA taguchi dilakukan pemeriksaan kelengkapan data yang ditunjukkan pada **Tabel 5**

Tabel 5 Case Processing Summary

		Cases				Total	
		Valid	Missing				
	Suhu	N	Percent	N	Percent	N	Percent
Stress (Mpa)	80	3	100,0%	0	0,0%	3	100,0%
	90	3	100,0%	0	0,0%	3	100,0%
	100	3	100,0%	0	0,0%	3	100,0%

Berdasarkan **Tabel 5** seluruh data pengujian stress (MPa) pada variasi suhu 80°C, 90°C, dan 100°C dapat digunakan dalam analisis. Setiap tingkat suhu memiliki 3 data pengujian yang valid (100%) dan tidak terdapat data yang hilang (0%). Dengan demikian, seluruh data yang diperoleh lengkap dan memenuhi syarat untuk dilakukan analisis statistik lebih lanjut tanpa perlu mengeluarkan atau mengganti data yang hilang.

Tabel 6 Hasil 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

Stress (MPa) Stem-and-Leaf Plot for
Suhu = 80

Frequency	Stem & Leaf
2,00	0 . 89
1,00	1 . 8

Stem width : 10,00000
Each leaf : 1 case (s)

Stress (MPa) Stem-and-Leaf Plot for
Suhu = 90

Frequency	Stem & Leaf
1,00	0 . 8
2,00	1 . 17

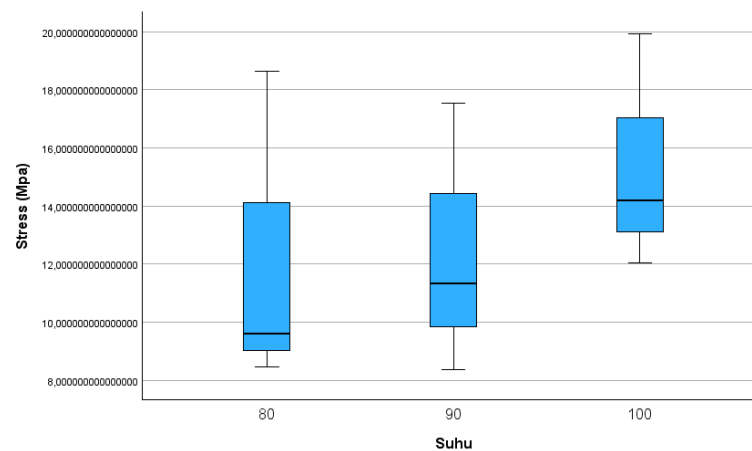
Stem width : 10,00000
Each leaf : 1 case (s)

Stress (MPa) Stem-and-Leaf Plot for
Suhu = 100

Frequency
2,00
1,00
Stem width : 10,00000
Each leaf : 1 case (s)

Stem & Leaf
0 . 24
1 . 9

Tabel 6 menunjukkan bahwa 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. Kondisi ini mengindikasikan bahwa peningkatan suhu hingga 100°C mampu menghasilkan ikatan material yang lebih baik sehingga meningkatkan kekuatan tarik sambungan [9]. Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian oleh Buchmann et al. (2022) yang melaporkan bahwa penggunaan *stationary shoulder* dengan kontrol temperatur pada proses *Friction Stir Welding* (FSW) polimer mampu meningkatkan kualitas sambungan karena distribusi panas yang lebih terkendali dan material menjadi lebih mudah mengalami plastisasi selama proses pengelasan [10]. Suhu 100°C dapat dianggap sebagai kondisi yang paling optimal pada penelitian ini karena menghasilkan nilai stress tertinggi sekaligus penyebaran data yang lebih kecil dibandingkan suhu 80°C dan 90°C [11].



Gambar 14 Boxplot Nilai Stress terhadap Variasi Suhu

Berdasarkan **Gambar 14**, nilai stress meningkat seiring kenaikan suhu. Suhu 100°C menghasilkan median stress tertinggi, sehingga memberikan kekuatan tarik terbaik dibandingkan suhu 80°C dan 90°C. Selain itu, tidak terdapat perbedaan yang signifikan pada data.

Tabel 7 Korelasi Pearson Parameter

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

Berdasarkan **Tabel 7** 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)

Tabel 8 Korelasi Pearson Parameter

Variable	Mean	Std. Deviation	N
Stress (Mpa)	13,34551282	4,441258826	9
Suhu	90	8,66	9
KRT (Rpm)	47	23,06	9
KP (mm/min)	1160	489,362	9

Tabel 8 merupakan hasil statistik deskriptif, nilai rata-rata stress yang diperoleh adalah 13,35 MPa dengan standar deviasi 4,44 Mpa. Variabel suhu memiliki rata-rata 90°C, KRT sebesar 47 RPM, dan KP sebesar 1160 mm/min. Variasi data terbesar terdapat pada KP, sedangkan suhu menunjukkan variasi yang paling kecil. Seluruh analisis dilakukan terhadap 9 sampel pengujian.

Tabel 9 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

Tabel 9 menunjukkan 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 [12].

Tabel 10 ANOVA (Uji F)

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			

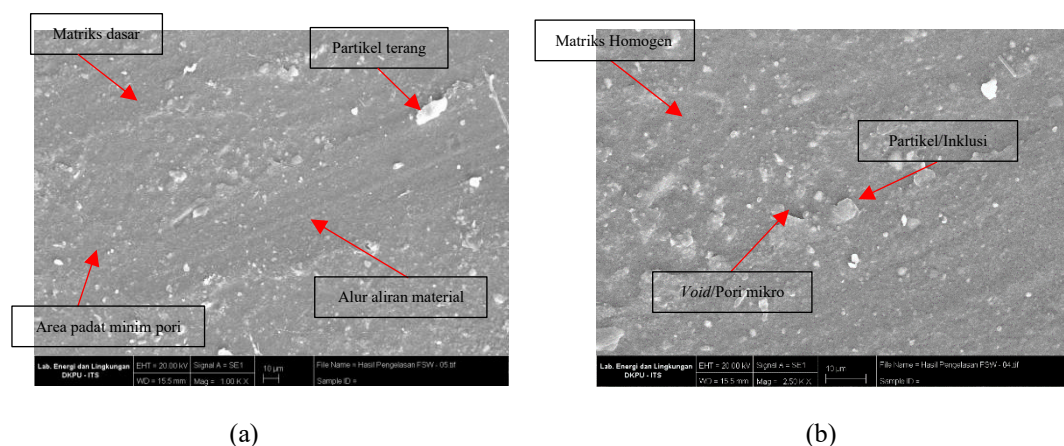
Berdasarkan **Tabel 10** ANOVA regresi yaitu nilai $F = 21,058$ menunjukkan bahwa model regresi memiliki pengaruh yang cukup kuat terhadap variabel Stress (MPa). Nilai Signifikansi ($Sig.$) = 0,003. Karena $0,003 < 0,05$, maka model regresi signifikan. Secara bersama-sama variabel KP (mm/min), KRT (rpm), dan Suhu berpengaruh signifikan terhadap Stress (MPa). Tetapi pada **Tabel 11** yaitu tabel nilai koefisien, KRT (rpm) merupakan parameter yang berpengaruh signifikan dan paling dominan terhadap Stress (MPa).

Tabel 11 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

D. Data Hasil Uji *Scanning Electrone Microscope* (SEM)

Hasil uji SEM dilakukan di Lab. Energi dan Lingkungan DKPU-ITS. Hasil uji SEM diambil dari parameter dengan hasil uji tarik yang terbesar dari 9 parameter yaitu SP9 dengan hasil uji tarik 19,92 MPa dibandingkan dengan hasil uji tarik sampel tanpa pemanas (STP) dengan hasil 11,3 MPa. Hasil uji SEM ditunjukkan pada **Gambar 15**.

**Gambar 15** (a) Uji SEM SP9, (b) Uji SEM sampel tanpa pemanas (STP)

Hasil uji SEM Spesimen SP9 menunjukkan struktur mikro yang relatif homogen, rapat, dan memiliki jumlah cacat yang sangat sedikit. Struktur yang homogen dan rapat inilah yang membuat sambungan lasnya menjadi sangat kuat [13]. Sambungan terikat secara fisik dengan batas *interface* yang terlihat jelas di tengah, tanpa adanya cacat makro yang ekstrem seperti rongga besar (*void*) atau retakan (*crack*) yang masif. Partikel terang tersebar cukup merata dengan jumlah pori yang rendah. Kondisi ini mengindikasikan bahwa proses pengadukan material selama FSW berlangsung secara efektif. Kombinasi suhu pemanasan awal 100°C, kecepatan pengelasan 75 mm/min dan kecepatan rotasi *tool* 950 rpm menghasilkan aliran material yang baik sehingga terbentuk ikatan metalurgi yang lebih sempurna. Struktur yang padat dan homogen tersebut sejalan dengan hasil uji tarik yang menunjukkan nilai stress tertinggi sebesar 19,92 MPa. Terdapat bagian-bagian yang terlihat dari hasil pengamatan yaitu:

1. Matriks dasar : Area abu-abu gelap dan merata, material yang mengalami deformasi dan pencampuran yang baik selama proses pengelasan.
2. Partikel terang : Bintik-bintik putih yang tersebar pada matriks, fase terang tampak tersebar merata pada Matriks yang menunjukkan distribusi partikel yang cukup homogen.
3. Area padat minim pori : Daerah yang tidak menunjukkan adanya rongga atau retakan yang signifikan.
4. Alur-aliran material : Garis-garis halus memanjang yang menunjukkan arah deformasi/pengadukan material selama FSW.

Sementara itu, hasil uji SEM sampel tanpa pemanas (STP) menunjukkan bahwa struktur mikro yang terlihat relatif kurang homogen dibandingkan SP9. Terlihat adanya partikel-partikel terang yang tersebar tidak merata serta beberapa area yang menunjukkan indikasi ikatan material yang belum sempurna. Hal tersebut kemungkinan terjadi tidak adanya pemanasan awal menyebabkan material dasar memiliki suhu awal yang rendah sehingga pelunakan material (*thermal softening*) yang terjadi hanya bergantung pada panas gesekan dari *tool* [14]. Akibatnya, material menjadi lebih sulit mengalir dan teraduk secara sempurna selama proses FSW. Kondisi ini dapat menyebabkan distribusi material yang kurang merata dan masih tersisa partikel atau fasa yang belum tercampur sempurna pada daerah sambungan. Meskipun menggunakan kecepatan pengelasan 75 mm/min dan kecepatan rotasi *tool* 950 rpm yang sama dengan SP9, tidak adanya pemanasan awal membuat total energi panas yang diterima material lebih rendah. Akibatnya, proses rekristalisasi dinamis dan pembentukan butir halus tidak optimal seperti sampel yang diberi pemanasan awal [15]. Ikatan antar material sambungan dapat dikatakan baik karena struktur permukaan tidak terdapat indikasi cacat makro yang signifikan. Pori mikro yang jumlahnya sedikit diperkirakan tidak terlalu mempengaruhi kualitas sambungan secara keseluruhan, meskipun tetap berpotensi menjadi titik konsentrasi tegangan jika jumlahnya meningkat.

IV. SIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

1. Karakteristik material *Polylactic Acid* (PLA) setelah terkena pengaruh *Friction Stir Welding* (FSW) berdasarkan pengujian *Scanning Electron 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.

B. Saran

Adapun saran dalam penelitian ini yaitu:

1. 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.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan banyak terima kasih kepada Universitas Muhammadiyah Sidoarjo (UMSIDA), terutama Program Studi Teknik Mesin, atas kesempatan yang diberikan. Terima kasih penulis ucapkan juga kepada para dosen yang telah memberikan bimbingan, kepada keluarga yang telah memberikan dukungan, serta teman-teman yang telah berkontribusi dalam penyelesaian penelitian ini.

REFERENSI

- [1] T. M. Joseph, A. Kallingal, A. M. Suresh, D. K. Mahapatra, M. S. Hasanin, J. Haponiuk, and S. Thomas, "3D printing of polylactic acid: Recent advances and opportunities," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Mar. 2023.
- [2] J.-F. Liu, Y.-G. Zhou, S.-J. Chen, S.-Q. Ren, and J. Zou, "Effects of friction stir welding on the mechanical behaviors of extrusion-based additive manufactured polymer parts," *Polymers*, vol. 15, no. 15, Art. no. 3288, 2023.
- [3] A. Rajabi, S. Rostami, and M. R. M. Aliha, "Optimization of properties for 3D printed PLA material using Taguchi, ANOVA and multi-objective methodologies," *Procedia Structural Integrity*, vol. 34, pp. 71–77, 2021.
- [4] A. Nurhafid, S. Jokosisworo, and U. Budiarto, "Analisa pengaruh perbedaan feed rate terhadap kekuatan tarik dan dampak Aluminium 6061 metode pengelasan friction stir welding," *Jurnal Teknik Perkapalan*, vol. 5, no. 2, 2017.
- [5] C. M. Davies, W. M. Thomas, J. P. Martin, and P. B. Prangnell, "Stationary shoulder FSW for joining high strength aluminum alloys," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 221, pp. 187–196, 2015.
- [6] M. A. R. Pereira, A. M. Amaro, P. N. B. Reis, and A. Loureiro, "Effect of friction stir welding techniques and parameters on polymers joint efficiency—A critical review," *Polymers*, vol. 13, Art. no. 2056, 2021.
- [7] ASTM International, *ASTM D638-22: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2022.
- [8] H. Zhang, H. Liu, and L. Yu, "Effects of preheating treatment on temperature distribution and material flow of aluminum alloy and steel friction stir welds," *J. Manuf. Process.*, vol. 29, pp. 29–40, 2017.
- [9] S. Hadi, A. Setiawan, P. W. Nugroho, A. D. Hermansyah, and A. N. Alfisahri, "Effect of FSW heating base temperature on tensile strength and hardness of AA1100 welds," *INTEK: Jurnal Penelitian*, vol. 7, no. 2, pp. 116–121, 2020.
- [10] E. Buchmann, M. Erdmann, M. Köberl, and P. Höfer, "A stationary shoulder with fluid temperature control for friction stir welding of polymers," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 121, no. 9–10, pp. 5901–5911, 2022.
- [11] B. Nugroho, Triyono, and N. Muhayat, "Pengaruh plunge depth dan preheat terhadap sifat mekanik sambungan friction stir welding polyamide," *Jurnal Teknik Mesin Indonesia*, vol. 11, no. 2, pp. 77–82, 2016.
- [12] M. B. N. Rahman, A. W. Nugroho, and B. S. Wardhana, "Pengaruh feed rate dan kecepatan putar pin tool friction stir welding (FSW) terhadap kekuatan tarik dan kekerasan aluminium 5052," *JMPM (Jurnal Material dan Proses Manufaktur)*, vol. 2, no. 2, pp. 83–95, 2019.
- [13] R. S. Mishra and Z. Y. Ma, "Friction stir welding and processing," *Mater. Sci. Eng. R Rep.*, vol. 50, no. 1–2, pp. 1–78, 2005.
- [14] F. Lambiase, H. A. Derazkola, and A. Simchi, "Friction stir welding and friction spot stir welding processes of polymers—State of the art," *Materials*, vol. 13, no. 10, Art. no. 2291, 2020.
- [15] M. Aydin, "Effects of welding parameters and pre-heating on the friction stir welding of UHMW-polyethylene," *Polym.-Plast. Technol. Eng.*, vol. 49, no. 6, pp. 595–601, 2010.

Conflict of Interest Statement:

The author declares that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.