

# ***Influence of Parameters on the Mechanical Strength of Friction Stir Welding in High Density Polyethylene*** **[Pengaruh Parameter terhadap Kekuatan Mekanik Pengelasan Friction Stir Welding pada High Density Polyethylene]**

Mohammad Hanif Firmansyah<sup>1)</sup>, Iswanto<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

<sup>2)</sup>Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

\*Email Penulis Korespondensi: iswanto@umsida.ac.id

**Abstract.** *Researchers discuss the Friction Stir Welding (FSW) welding technique for polyethylene material using a milling machine with variations in several parameters. The specimens were determined using the Taguchi and orthogonal array methods, tested using the tensile test and analyzed using the Analysis of Variance (ANOVA) method. The research aims to determine the effect of the FSW process on tensile strength, the influence of parameter contributions to tensile strength. Experimental data was carried out by flatness and tensile tests. Flatness test using a dial gauge and milling machine with an accuracy of  $\pm 0.01$ . The highest tensile strength produces a tensile test value of 7.17 Kgf/mm<sup>2</sup> with tapered cylindrical tool parameters with a spindle speed of 1583 rpm, welding speed of 15 mm/minute, and the lowest tensile strength with a squared tool with a spindle speed of 1200 rpm with a welding speed of 15 mm/minute produces a tensile test value of 6.84 Kgf/mm<sup>2</sup>. Based on the ANOVA results, the tensile test strength of the specimen was influenced by the tool geometry model by 57.78%, influenced by spindle speed by 18.29% and welding speed by 10.91%, and had an error value of 13.02%.*

**Keywords ;** FSW, Polyethylene, Tensile Strength

**Abstrak.** *Peneliti membahas teknik pengelasan Friction Stir Welding (FSW) material polyethylene menggunakan mesin frais divariasikan dengan beberapa parameter. Penentuan spesimen menggunakan metode taguchi dan orthogonal array, pengujiannya menggunakan uji tarik dan dianalisis menggunakan metode Analysis of Varian (ANOVA). Penelitian bertujuan untuk mengetahui pengaruh proses FSW pada kekuatan tarik, pengaruh kontribusi parameter terhadap kekuatan tarik. Data eksperimen dilakukan uji kerataan dan uji tarik. Uji kerataan menggunakan alat dial gauge dan mesin frais dengan ketelitian  $\pm 0,01$ . Kekuatan tarik tertinggi menghasilkan nilai uji tarik sebesar 7,17 Kgf/mm<sup>2</sup> dengan parameter tool tapered cylindrical dengan kecepatan spindle 1583 rpm, kecepatan pengelasan 15 mm/menit, dan kekuatan tarik terendah dengan tool squared kecepatan spindle 1200 rpm dengan kecepatan pengelasan 15 mm/menit menghasilkan nilai uji tarik sebesar 6,84 Kgf/mm<sup>2</sup>. Berdasarkan hasil ANOVA, kekuatan uji tarik pada spesimen dipengaruhi model tool geometry sebesar 57,78%, dipengaruhi oleh kecepatan spindle 18,29% dan kecepatan pengelasan sebesar 10,91%, serta memiliki nilai error sebesar 13,02%.*

**Kata Kunci ;** FSW, Polyethylene, Uji tarik

## **I. PENDAHULUAN**

Teknik pengelasan semakin berkembang seiring dengan perkembangan jenis aplikasi dari material, salah satunya *Friction Stir Welding* (FSW). Metode ini sangat baik untuk pengelasan termoplastik dan logam. Namun saat ini banyak perusahaan manufaktur yang mengganti logam dengan bahan polimer. Hal tersebut disebabkan karena bahan polimer lebih ringan, serta konduktivitas listrik dan termal yang rendah. Bahan polimer juga relatif murah. Salah satu bahan polimer yang sering digunakan dalam industri transportasi, otomotif, tekstil, makanan, dan minuman adalah *polyethylene*.

Pengelasan sendiri merupakan suatu proses menghubungkan atau menyambungkan dua benda kerja dengan energi panas yang dihasilkan dari ukiran pada bagian material yang akan disambung. Menurut DIN (*Deutsche Industry Normen*), pengelasan adalah proses sambungan pada dua buah material dengan menggunakan energi panas yang dihasilkan dari gesekan benda kerja dalam keadaan mencair atau meleleh melalui penggunaan panas. Teknik pengelasan tidak mampu terlepas dari dunia industri manufaktur karena di waktu ini proses penyambungan menggunakan pengelasan sangat dibutuhkan pada dunia industri seperti manufaktur. Di saat ini pengelasan sangatlah beragam tidak hanya bahan atau material logam saja, melainkan bisa digunakan pada industri yang mengaplikasikan material non logam. Bahkan sekarang ini lebih banyak yang beralih di bahan non-logam mirip material polimer HDPE, dikarenakan material polimer tidak mudah korosi.

*Friction Stir Welding* (FSW) adalah teknologi penggabungan atau pemrosesan solid state yang kompleks FSW telah banyak diterapkan untuk menggabungkan paduan aluminium, paduan titanium dan bahan lain yang sulit dilas dengan fusion welding atau Pengelasan yang menggunakan kawat las tambahan atau yang tidak menggunakan kawat las tambahan dan proses penyambungannya menggunakan titik leleh benda kerja. Beberapa penelitian menyebutkan bahwa FSW sangat berpotensi untuk menggabungkan komposit polimer dengan polimer termoplastik.

*Friction Stir Welding* (FSW) adalah suatu proses penyambungan dua bahan material padat secara bersama-sama ataupun barang kerja yang tidak meleleh dikala dicoba proses penyambungan. Tata cara ini digunakan untuk melindungi watak logam supaya tidak berganti. Proses FSW yang digunakan dalam pengelasan terdapat juga silinder *shoulder* serta pin (*probe*) yang berulir atau tanpa ulir yang kemudian diputar pada kecepatan putar serta kecepatan delapan pengelasan (*feeding*) yang senantiasa konstan dalam kaitannya dengan garis sambungan yang memisahkan dua barang kerja. Bagian-bagian lembaran pelat yang dijepit ke bidang penopang harus kuat agar dapat mencegah posisi sendi bergeser selama proses penyambungan [1].

Panjang pin (*probe*) yang dibutuhkan sedikit lebih pendek dari volume las, dan bahu harus bersentuhan langsung dengan benda kerja, kemudian pin tersebut dipindahkan menuju benda kerja atau menjauh dari benda kerja. Selama proses FSW, panas berasal dari gesekan antara benda kerja dengan alat las yaitu *shoulder* dan pin. Material mengalami interaksi temperatur pelarutan hingga melunak (0,6 hingga 0,8 temperatur leleh) akibat intensitas yang dihasilkan oleh proses pencampuran mekanis dan intensitas yang ada pada material [1].

*Polyethylene*, yang terbuat dari *ethylene monomer*, adalah polimer yang paling banyak digunakan. *Polyethylene* adalah sejenis termoplastik yang dapat dicetak dengan panas secara berulang kali. *Polyethylene* memiliki warna putih dan titik lelehnya antara 110 hingga 137 derajat Celcius. *Polyethylene* dibagi menjadi dua kelompok yaitu *Low Density Polyethylene* (LDPE) dan *High Density Polyethylene* (HDPE) [1].

Material *polyethylene* yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah *High Density Polyethylene* (HDPE). Bentuknya yang linier, bahan ini memiliki sifat yang kuat, rapat, dan struktur yang mudah beradaptasi. Jika dibandingkan dengan LDPE, plastik HDPE memiliki titik leleh yang lebih tinggi. selain memiliki tingkat molekul yang tinggi, padat dan tahan terhadap cuaca, juga memiliki beberapa karakteristik dan sifat.

Tabel 1. Karakteristik HDPE

Sifat fisik dan mekanik	Keterangan
Massa jenis (g/cm <sup>3</sup> )	0,94 – 0,96
Temperatur leleh (°C)	137
Temperatur glass (°C)	-90
Kekuatan tarik (kgf/mm <sup>2</sup> )	2,1 - 3,8
Perpanjangan (%)	15 – 100
Modulus elastis (kgf/mm <sup>2</sup> x10 <sup>2</sup> )	0,4 – 1
Kekuatan tekan (kgf/mm <sup>2</sup> )	2,2
Kekuatan impack (kgm/mm <sup>2</sup> )	0,0042–0,074

Keuntungan penggunaan HDPE dalam penelitian ini yakni, ramah lingkungan, biaya terjangkau, tidak mudah berkarat maupun pecah, serta kekuatannya tidak kalah dibandingkan dengan logam, kayu, atau kaca. Namun, disamping itu *polyethylene* juga memiliki beberapa kekurangan yakni, dapat mengalami deformasi, mudah terbakar dan meleleh sehingga sering kali memicu terjadinya kebakaran.

Pengujian tarik adalah penerapan gaya atau tegangan pada suatu material untuk menentukan resistensi suatu material. Pengujian ini dilakukan dengan menarik benda uji atau bahan menggunakan gaya tarik yang dilakukan secara terus menerus sedemikian rupa sehingga perpanjangan bahan bertambah dan konstan sampai bahan putus. Dengan cara ini, nilai tarik dan jumlah perpanjangan material diketahui. Uji tarik juga menunjukkan fenomena patah getas dan patah ulet. Fraktur ulet umumnya lebih disukai karena material memiliki keuletan dan ketangguhan yang baik. Sedangkan patah getas berbanding terbalik dengan patah ulet karena patah getas tidak mengalami deformasi plastis pada material uji [2]. Uji Tarik tersebut akan menghasilkan bagaimana hubungan antara tegangan dan regangan yang disebabkan oleh proses penarikan yang dilakukan. Alat eksperimen untuk uji tarik harus mempunyai cengkaman dengan kekuatan yang tinggi.

Menurut [3], pengelasan gesek memiliki pengaruh yang signifikan terhadap kecepatan putar, kecepatan pengelasan, *tool geometry*, serta sudut kemiringan *tool*. Selain itu, temperatur juga berimbas pada peningkatan kualitas sambungan pengelasan [4]. Oleh karena itu, dilakukan penelitian untuk memastikan parameter pengelasan FSW yang optimal untuk *polyethylene*. Selain itu, permintaan plastik juga meningkat setiap tahunnya meningkat, mengingat kebiasaan hidup kebanyakan orang dimana plastik digunakan sepanjang waktu. Sering terjadi kontak fisik langsung dengan bahan kimia, produk harus tetap tahan terhadap kimia tersebut, hal ini juga menjadi latar belakang dilakukannya penelitian ini.

Penelitian yang dilakukan oleh [5] yang membahas tentang pengaruh rotasi kecepatan dalam pengelasan bahan polimer yaitu material *Polyethylene*. Dengan memakai metode pengelasan FSW menggunakan variasi kecepatan pahat, *feed rate* dan bentuk pin pahat. Setelah dilakukan pengelasan selanjutnya dilakukan pengujian kekuatan tarik buat melihat elastisitas kekuatan benda. Variasi parameter yang dipergunakan dalam FSW buat material *Polyethylene* yaitu kecepatan rotasi pahat 500 rpm, 750 rpm, 1000 rpm dan kecepatan gerak makan 5 mm/min menggunakan pahat *threaded cylindrical*.

Hal ini sudah terlihat dalam penelitian yang telah dilakukan bahwa kekuatan sambungan spesimen yang memakai pahat *threaded cylindrical* lebih tinggi daripada bentuk pin pahat yang lainnya. *Tool threaded cylindrical* memiliki sifat mekanik yang lebih tinggi di masing-masing kecepatan rotasi dan kecepatan gerak makan. Kecepatan rotasi pahat yang rendah menyebabkan panas gesekan yang tidak mencukupi pada daerah las akibatnya material yang disambung menghasilkan kekuatan las yang rendah. Semakin bertambahnya kecepatan rotasi panas yang dihasilkan semakin tinggi sehingga kapasitas beban tarik semakin baik dikarenakan melebarnya *welding zone* [6]. Kecepatan rotasi yang terlalu tinggi menyebabkan masukan panas pengelasan ekstra dan gaya inersia yang terbentuk cacat di daerah pengelasan dan akibatnya mengurangi kekuatan sambungan. Kekuatan Tarik maksimum 63.69 MPa yang diperoleh pada kecepatan rotasi pahat 750 rpm dan kecepatan gerak makan 5 mm/min dengan *tool threaded cylindrical*.

Penelitian yang dilakukan oleh [7] parameter yang dipilih dalam variasi kecepatan tool, kecepatan pengelasan sangat berbeda – beda. Dengan lima kecepatan rotasi pahat yaitu 500, 710, 1000, 1400, 2000 (rpm), dan tiga kecepatan pengelasan berbeda 20, 40, 63 (mm/menit). Ketika kecepatan rotasi meningkat, kekuatan tarik perlahan meningkat dan kemudian menurun. Dengan kata lain semua kecepatan transversal terdapat kecepatan putar optimum dimana benda uji yang dilas dapat memperoleh nilai kuat tarik tertinggi. Pada kecepatan pengelasan yang lebih tinggi dengan kecepatan pengelasan yang lebih cepat, panas gesekan yang dihasilkan akan berkurang dan tidak cukup untuk mengubah bentuk material secara plastis. Namun untuk kompensasi kekurangan dalam pembangkitan panas diperlukan adanya kecepatan rotasi yang lebih tinggi. Panas ini cukup untuk mencapai kekuatan tarik yang lebih tinggi. Namun, dengan adanya peningkatan dalam kecepatan rotasi lebih banyak panas yang dihasilkan dapat merusak lembaran *polyethylene* yang dilas dan menurunkan kekuatan tarik.

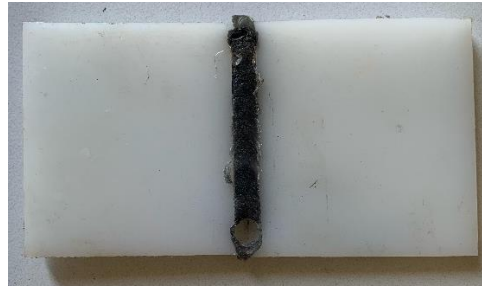
Dalam penelitian yang dilakukan oleh [8] tentang pengelasan FSW dengan menggunakan bahan HDPE. Penelitian menggunakan parameter dengan kecepatan putaran 900, 1200, 1500 (rpm) dan kecepatan pengelasan terhadap benda kerja 45, 60 mm/menit dengan standart yang dipakai dalam penelitian ini menggunakan standart ASTM D412, menghasilkan kekuatan tarik yang terjadi memiliki berbagai macam kekuatan tergantung pada parameter yang digunakan. Hasilnya bahwa kekuatan tarik yang tertinggi dihasilkan pada kecepatan putaran 900 (rpm) dan kecepatan pengelasan 45 (mm/menit) dengan nilai kekuatan sebesar 12,8 (Mpa) setelah mendapatkan hasil ditambah dengan parameter hingga 1500 (rpm) dan pemakanan 60 (mm/menit) mengakibatkan penurunan kekuatan dari material HDPE sebesar 8,6 (Mpa) ketika parameter ditambahkan sampai fase akhir mengakibatkan gesekan yang terjadi pada pin tool dengan benda kerja terlalu panas dan melebihi kekuatan maksimal yang diterima pada benda kerja, sehingga membuat kekuatan benda kerja menurun pada kecepatan putar 1500 rpm dengan kecepatan pengelasan 60 mm/menit. Disimpulkan dalam penelitian ini kecepatan spindle 900 (rpm) dengan kecepatan pengelasan 45 (mm/menit) memiliki kekuatan yang baik.

Melihat penelitian yang terdahulu, tentang proses pengelasan *Friction Stir Welding* (FSW) mempunyai banyak faktor yang bisa dipengaruhi oleh seperti kecepatan putar *tool*, *feed rate*, pengaruh *plunge depth* dan *preheat*, dan sudut kemiringan *tool*. Penelitian ini akan membahas tentang bagaimana pengaruh setiap parameter kecepatan rotasi, kecepatan pengelasan, dan *tool geometry* dalam pengelasan FSW terhadap kekuatan tarik. Penelitian ini juga akan memperhitungkan berapa pengaruh kontribusi parameter kecepatan rotasi, kecepatan pengelasan, dan *tool geometry* terhadap kekuatan tarik tertinggi. Penelitian ini juga memiliki batasan dimana pengelasan hanya menggunakan material *High Density Polyethylene* (HDPE) dengan metode *Friction Stir Welding* (FSW). Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh proses FSW pada kekuatan tarik, dan mengetahui pengaruh kontribusi masing-masing parameter terhadap kekuatan tarik.

## II. METODE

Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah kuantitatif, dan yang menjadi objek penelitian adalah parameter pengelasan FSW pada HDPE. Data yang digunakan diperoleh dan dikumpulkan dari hasil eksperimen yang dilakukan oleh peneliti. Teknik pengumpulan data pada penelitian ini menggunakan metode studi literasi dan eksperimen laboratorium. Eksperimen yang dilakukan akan menggunakan desain *taguchi orthogonal array*. Sebelum itu, peneliti juga akan mempersiapkan alat dan bahan yakni, *polyethylene*, *tool* pengelasan, dan mesin *milling* atau *frais*.

*Polyethylene* adalah polimer yang terdiri dari rantai panjang monomer etilen. Dalam industri polimer, *Polyethylene* ditulis dengan singkatan PE, perlakuan yang sama dilakukan oleh *Polystyrene* (PS) dan *Polypropylene* (PP). Molekul etilen  $C_2H_4$  adalah  $CH_2=CH_2$ . Dua gugus  $CH_2$  bergabung dengan ikatan ganda.



Gambar 1. *Polyethylene*

*Tool* yang akan digunakan dalam pengelasan ada 3 variasi yaitu *Tapered Cylindrical*, *Squared*, *Threaded Cylindrical Tool* yang masing-masing dibantu dengan adanya *stationery shoulder* yang digunakan untuk menghantarkan panas ke bidang *polyethylene*. Penelitian ini menggunakan material baja S45c yang memiliki sifat konduktivitas thermal dan kekuatan mekanik yang tinggi. Menggunakan kombinasi *tool* dan *stationery shoulder* memberikan permukaan panas yang dapat memperlambat laju pendinginan lava, agar pengelasan memberikan panas yang maksimal [9]. Material *stationery shoulder* menggunakan bahan material aluminium. Sedangkan mesin *milling* atau *frais* yang digunakan pada penelitian ini adalah alat Mesin Frais Universal X6332C Weida.



Gambar 2. Alat Penghantar Panas



Gambar 3. *Tool Geometry*



Gambar 4. Mesin *frais*

Metode *taguchi* adalah pendekatan baru untuk rekayasa. Pendekatan ini bertujuan untuk mengurangi biaya dan sumber daya sesedikit mungkin sekaligus meningkatkan kualitas produk dan proses. *Robust design* adalah istilah yang digunakan untuk menggambarkan pendekatan ini, yang memiliki banyak tujuan, satu di antaranya adalah membuat produk kedap suara. *Taguchi* mendefinisikan kualitas sebagai kerugian publik yang terjadi sejak produk dikirim. Pengendalian kualitas preventif sebagai desain produk atau proses sebelum mencapai tingkat pemasaran adalah apa yang dikendalikan oleh metode *taguchi* itu sendiri.

*Orthogonal Array* (OA) merupakan salah satu kontribusi yang diberikan ketika menggunakan metode *taguchi*. Dimana dapat digunakan untuk merancang eksperimen yang efektif dan menganalisis data eksperimen yang akan digunakan. Selain itu, OA digunakan untuk menentukan jumlah minimum percobaan yang dapat memberikan informasi sebanyak mungkin tentang semua faktor yang mempengaruhi parameter. Pemilihan kombinasi level untuk setiap variabel adalah bagian terpenting dari OA. Baris dan kolom digunakan untuk mengatur elemen. Kolom adalah faktor yang dapat diubah selama percobaan, sedangkan baris adalah status faktor.

Dalam penelitian ini, benda uji yang digunakan *polyethylene* (HDPE) yang berbentuk persegi panjang dengan dimensi panjang 70 mm, lebar 65 mm, dan tebal 10 mm Dengan parameter yang digunakan adalah sebagai berikut :

1. Kecepatan spindel
  - a. 1200 rpm
  - b. 1583 rpm
  - c. 1900 rpm
2. Kecepatan pengelasan
  - a. 15 mm/menit
  - b. 24 mm/menit
  - c. 43 mm/menit
3. Tool geometri
  - a. *Threaded Cylindrical*
  - b. *Tapered Cylindrical*
  - c. *Squared*

Pengujian dilakukan dalam eksperimen ini adalah menggunakan uji tarik, dengan variasi kecepatan rotasi *tool* yakni 1200, 1583, dan 1900 (rpm), serta kecepatan pengelasan yakni 12, 24, dan 43 (mm/menit), sehingga bisa diketahui spesimen yang memiliki keuletan dan kekuatan yang baik daripada yang lain. Setelah pengelasan, spesimen yang telah dilas akan diuji menggunakan uji tarik, pengujian ini dilakukan pada hasil pengelasan menggunakan metode FSW sesuai standar yang digunakan dalam pengujian ini adalah standar yang telah ditentukan ASTM D638 (*American Society for Testing and Materials*) type IV, untuk mengetahuinya kekuatan bahan atau spesimen yang akan di uji tarik.



Gambar 5. Mesin Uji Tarik

Pengujian tarik dilakukan di Balai Latihan Kerja Indonesia (BLKI) Surabaya menggunakan mesin dengan spesifikasi sebagai berikut:

<i>Loadcell Capacity</i>	: 10.000 N
<i>Weight</i>	: 155 Kg
<i>Max Stroke Lenght</i>	: 50 mm
<i>Frame Stiffness</i>	: 50 kn/mm
<i>Speed Range</i>	: 0,00005 mm/s – 500 mm/ms
<i>Height</i>	: 1260 mm
<i>Width</i>	: 750 mm
<i>Depth</i>	: 310 mm

Berikut Ini hubungan antara tegangan (*stress*) dan regangan (*strain*) :

1. Tegangan (*stress*)

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad (1)$$

Keterangan :

P = Beban (Kgf)

A<sub>0</sub> = Luas Penampang awal (mm<sup>2</sup>)

σ = Tegangan (Kgf/mm<sup>2</sup>)

2. Regangan (*strain*)  
Dengan Rumus berikut :

$$s = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100\% \quad (2)$$

Keterangan :

$\Delta L$  = Selisih pertambahan panjang

$L_0$  = Panjang awal

$\varepsilon$  = Regangan (%)

3. *Modulus Elastis*  
Dengan persamaan berikut :

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3)$$

Keterangan :

$\sigma$  = Tegangan (Kgf/mm<sup>2</sup>)

$\varepsilon$  = Regangan (%)

Pengujian yang dilakukan untuk mendapatkan hasil penelitian dilakukan dengan menggunakan metode *Analysis of Varian* (ANOVA). Uji tes yang digunakan adalah *General Linear Model* untuk mengetahui kontribusi setiap parameter terhadap nilai uji tarik. Tujuan uji ANOVA digunakan untuk mengetahui signifikansi parameter proses yang mempengaruhi respon yang berbeda dari sambungan FSW [10]. Setelah data berhasil didapatkan, yang dilakukan selanjutnya adalah analisis dan pembahasan mengenai data – data tersebut. Pembahasan data tersebut mengacu pada rumus yang telah ditetapkan pada pengujian tarik. Tujuannya agar pembahasan ini mendapatkan hasil yang optimal dari pengujian tersebut.

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### A. Desain *Taguchi Orthogonal Array*

Tabel 2. Desain Eksperimen

No	<i>Tool Geometry</i>	Kecepatan <i>spindle</i> (rpm)	Kecepatan Pengelasan (mm/menit)
1.	<i>Squared</i>	1200	15
2.	<i>Squared</i>	1583	24
3.	<i>Squared</i>	1900	43
4.	<i>Threaded Cylindrical</i>	1200	24
5.	<i>Threaded Cylindrical</i>	1583	43
6.	<i>Threaded Cylindrical</i>	1900	15
7.	<i>Tapered Cylindrical</i>	1200	43
8.	<i>Tapered Cylindrical</i>	1583	15
9.	<i>Tapered Cylindrical</i>	1900	24

Pada **Tabel 2**, desain eksperimen menggunakan metode *taguchi orthogonal array* yang bertujuan untuk mendesain percobaan dan menganalisa data percobaan, serta digunakan untuk menentukan jumlah minimum eksperimen yang didapat dan memberikan informasi pada faktor yang mempengaruhi parameter.

### B. Proses Pengelasan




Proses pengelasan dilakukan menggunakan metode *Friction Stir Welding* (FSW) pada material HDPE, dimana penyambungan atau pengelasan terjadi karena panas gesekan akibat perputaran *tool*, serta dibantu oleh *stationary shoulder*. *Tool* yang digunakan ada 3 variasi yaitu *Tapered Cylindrical*, *Squared*, *Threaded Cylindrical* (gambar 3). Material *stationery shoulder* menggunakan bahan material aluminium (gambar 2). Sedangkan mesin *milling* atau *frais* yang digunakan adalah Mesin Frais Universal X6332C Weida (gambar 4).









Gambar 6. Proses Pengelasan

Pada **Gambar 6**, alat yang berputar ditekan terhadap material yang perlu disambung. Ketika pin alat yang berbentuk silinder bersentuhan dengan material akan menyebabkan gesekan yang memanaskan material dan dapat menyebabkan beberapa bagian menjadi lebih lunak. *Tool* bergerak melintasi bahan yang akan disambung garis las (*joint line*) dengan kecepatan konstan. Untuk menjaga suhu pada titik pengelasan kedua tindakan harus digabungkan agar menghasilkan pengelasan yang baik [1].

Tabel 3. Detail Hasil Pengelasan

No	Desain Tool	Kecepatan Spindle (rpm)	Kecepatan Pengelasan (mm/menit)	Gambar
1.	<i>Squared</i>	1200	15	
2.	<i>Squared</i>	1583	24	
3.	<i>Squared</i>	1900	43	

4.	<i>Threaded Cylindrical</i>	1200	24	
5.	<i>Threaded Cylindrical</i>	1583	43	
6.	<i>Threaded Cylindrical</i>	1900	15	
7.	<i>Tapered Cylindrical</i>	1200	43	
8.	<i>Tapered Cylindrical</i>	1583	15	
9.	<i>Tapered Cylindrical</i>	1900	24	

**Tabel 3** merupakan detail hasil pengelasan yang dilakukan sebanyak sembilan percobaan dengan sembilan desain *tool* dan kecepatan yang berbeda.

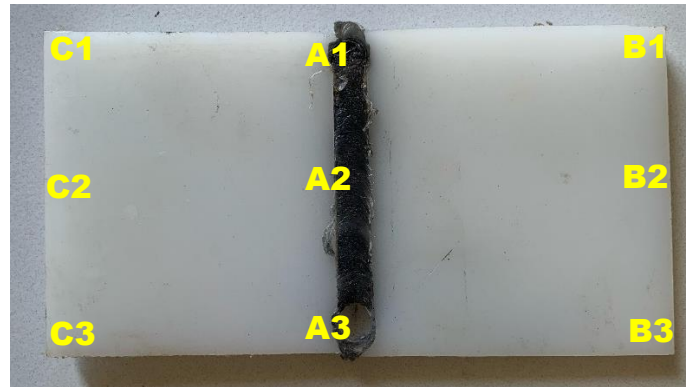
### C. Uji Kerataan



Gambar 7. Pengujian Kerataan

Proses pengujian kerataan menggunakan *Dial Gauge Mitutoyo 2046S* pada mesin *Frais Universal X6332C Weida* (Gambar 7). Pengujian dilakukan dengan mengukur 3 titik pada *root weld* untuk setiap spesimen. Hal ini dikarenakan pada daerah *face weld* terdapat cekungan ciri khas pengelasan FSW sebesar  $\pm 0,1$ mm.





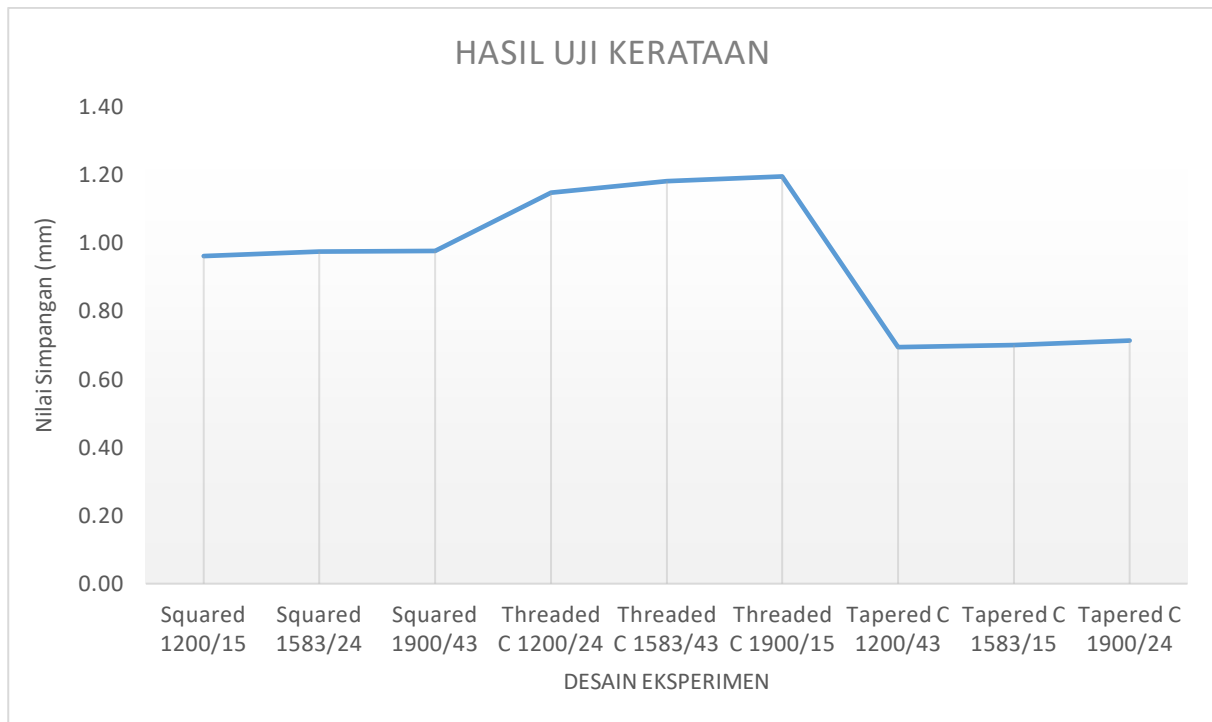
Gambar 8. Titik Pengukuran Kerataan

Berikut merupakan titik pengukuran kerataan pada spesimen setelah dilakukan pengelasan. Pengujian dilakukan dengan mengukur 3 titik pada root weld untuk setiap spesimen. Hal ini dikarenakan pada daerah face weld terdapat cekungan ciri khas pengelasan FSW sebesar  $\pm 0,1$ mm. Titik A merupakan jalur pengelasan, titik B merupakan titik pengukuran kemiringan sisi kiri pengelasan dengan panjang 6cm, titik C merupakan titik pengukuran kemiringan sisi kanan pengelasan dengan panjang 6cm. Titik-titik tersebut dibagi lagi menjadi 3 bagian. Titik A1, B1, C1 merupakan titik pengukuran pada awal pengelasan. Titik A2, B2, C2 merupakan titik pengukuran pada bagian tengah pengelasan. Titik A3, B3, C3 merupakan titik pengukuran pada akhir pengelasan. Jarak antar titik adalah 3 cm. Kemudian peneliti mencatat hasil tiap spesimennya.

Tabel 4. Hasil Pengukuran Kerataan Pengelasan

No.	Spesimen	Titik Koordinat									Rata-Rata			Rata-Rata Akhir (mm)
		a1	b1	c1	a2	b2	c2	a3	b3	c3	a1b1c1	a2b2c2	a3b3c3	
1.	Squared C 1200/15	0	1,1	1,88	0	1,4	1	0	1,81	1,46	0,99	0,8	1,09	0,96
2.	Squared C 1583/24	0	1,2	1,9	0	1,4	1	0	1,81	1,46	1,03	0,8	1,09	0,97
3.	Squared C 1900/43	0	1,2	1,9	0	1,4	1	0	1,83	1,47	1,03	0,8	1,1	0,98
4.	Threaded C 1200/24	0	0,31	2,7	0	0,34	2,96	0	0,57	3,46	1	1,1	1,34	1,15
5.	Threaded C 1583/43	0	0,34	2,9	0	0,35	2,96	0	0,59	3,49	1,08	1,1	1,36	1,18
6.	Threaded C 1900/15	0	0,37	2,9	0	0,38	3	0	0,6	3,51	1,09	1,13	1,37	1,2
7.	Tapered C 1200/43	0	0,8	0,72	0	1,14	1,14	0	1,21	1,24	0,51	0,76	0,82	0,69
8.	Tapered C 1583/15	0	0,81	0,73	0	1,16	1,16	0	1,21	1,24	0,51	0,77	0,82	0,7
9.	Tapered C 1900/24	0	0,83	0,73	0	1,2	1,18	0	1,22	1,26	0,52	0,79	0,83	0,71

Hasil kerataan terbaik (Tabel 4) didapatkan dari kecepatan perputaran 1200 rpm dan kecepatan pengelasan 15 mm/menit pada *tool tapered Cylindrical* dengan nilai rata-rata 0,69 mm. Untuk Hasil kerataan dengan simpangan terbesar yaitu pada kecepatan perputaran 1900 rpm dan kecepatan pengelasan 43mm/menit pada *tool threaded cylindrical* dengan nilai rata-rata 1,2 mm.



#### D. Uji Tarik



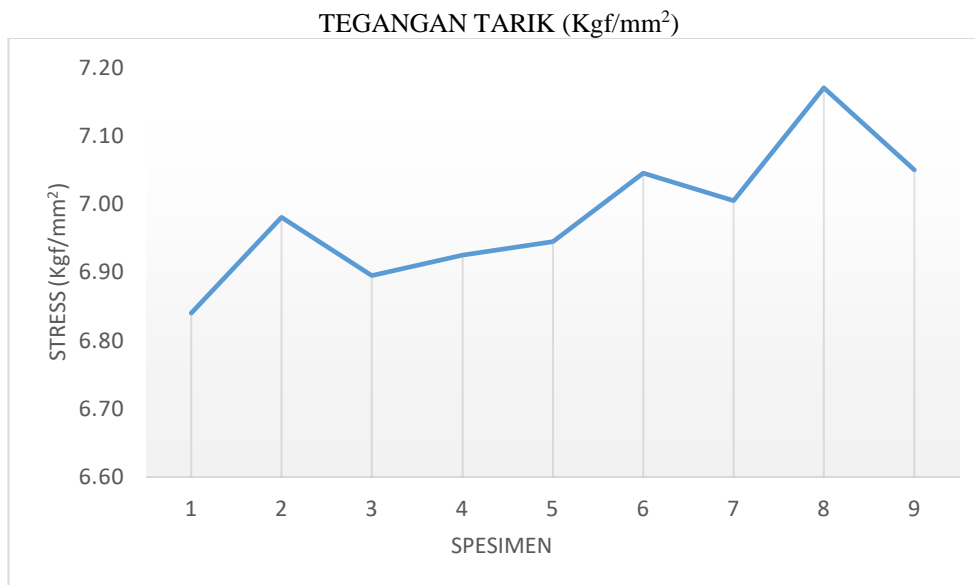
Gambar 9. Hasil Uji Tarik

Uji tarik dilakukan untuk mengetahui kekuatan sambung dari pengelasan. Pengujian tarik dilakukan terhadap delapan belas spesimen (gambar 8), dimana setiap spesimen diuji sebanyak dua titik atau dua kali. Pengujian pertama dilakukan pada titik awal pengelasan, pengujian kedua dilakukan pada titik akhir pengelasan. Hal ini dilakukan untuk mengetahui tingkat penyambungan secara maksimal. Kemudian data yang diambil adalah rata-rata dari dua hasil pengujian tersebut.

Tabel 5. Hasil Uji Tarik

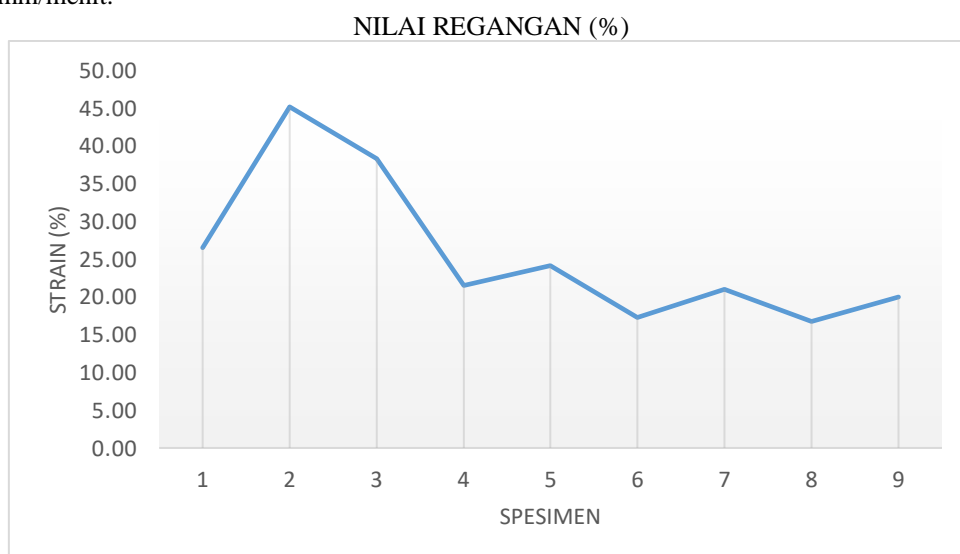
Kode Spesimen	Desain Eksperimen	Beban (Kgf)	Tegangan (Kgf/mm <sup>2</sup> )	Regangan (%)	Modulus Elastis (Kgf/mm <sup>2</sup> )
1	<i>Squared</i> 1200 rpm, 15 mm/menit	410,66	6,84	26,54	0,26
2	<i>Squared</i> 1583 rpm, 24 mm/menit	418,87	6,98	45,16	0,15
3	<i>Squared</i> 1900 rpm, 43 mm/menit	413,61	6,90	38,26	0,26
4	<i>Threaded Cylindrical</i> 1200 rpm, 24 mm/menit	415,73	6,93	21,48	0,33
5	<i>Threaded Cylindrical</i> 1583 rpm, 43 mm/menit	416,57	6,95	24,17	0,29

6	Threaded Cylindrical 1900 rpm, 15 mm/menit	422,48	7,05	17,31	0,43
7	Tapered Cylindrical 1200 rpm, 43 mm/menit	420,37	7,01	20,99	0,34
8	Tapered Cylindrical 1583 rpm, 15 mm/menit	430,09	7,17	16,75	0,44
9	Tapered Cylindrical 1900 rpm, 24 mm/menit	422,91	7,05	19,96	0,36



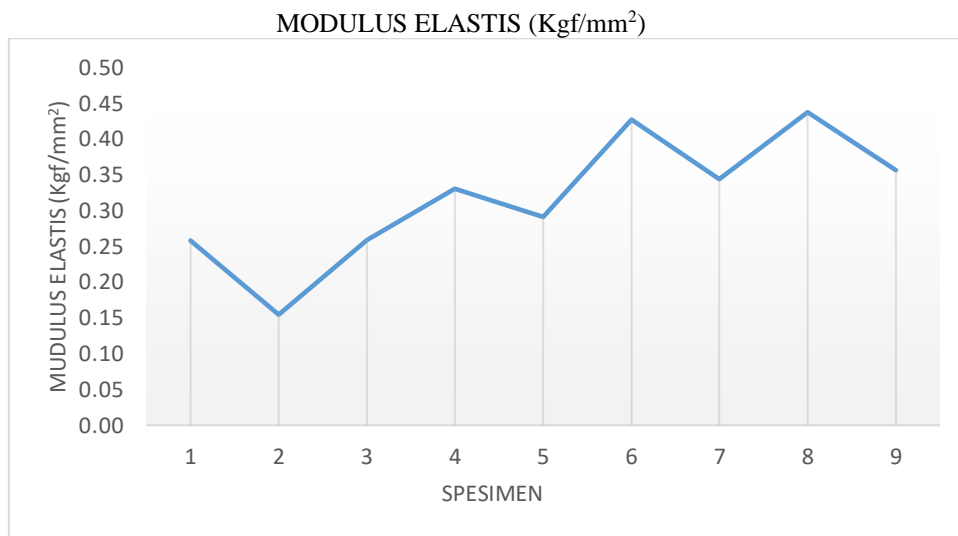
Gambar 10. Diagram Nilai Tegangan Tarik

Nilai tegangan tarik yang tertinggi sebesar **7,17 Kgf/mm<sup>2</sup>** terdapat pada spesimen 8 dengan *tool tapered cylindrical* dengan kecepatan putar 1583 rpm dan kecepatan pengelasan 15 mm/menit. Sedangkan tegangan tarik terendah sebesar **6,84 Kgf/mm<sup>2</sup>** terdapat pada spesimen 1 dengan *tool squared* dengan kecepatan putar 1200 rpm dan kecepatan pengelasan 15 mm/menit.



Gambar 11. Diagram Nilai Regangan

Nilai regangan tertinggi sebesar **45,16%** pada spesimen 2 dengan *tool squared* dengan kecepatan putar 1583 rpm dan kecepatan pengelasan 24 mm/menit. Sedangkan nilai regangan terendah sebesar **16,75%** pada spesimen 8 dengan *tool tapered cylindrical* dengan kecepatan putar 1583 rpm dan kecepatan pengelasan 15 mm/menit.



Gambar 12. Diagram Nilai Modulus Elastis

Nilai modulus elastis tertinggi sebesar **0,44 Kgf/mm<sup>2</sup>** pada spesimen 8 dengan *tool tapered cylindrical* dengan kecepatan 1583 rpm dan kecepatan pengelasan 15 mm/menit. Sedangkan nilai modulus elastis terendah sebesar **0,15 Kgf/mm<sup>2</sup>** pada spesimen 2 dengan *tool squared* dengan kecepatan putar 1583 rpm dan kecepatan pengelasan 24 mm/menit.

#### E. Analysis of Variance (ANOVA)

Analisis data menggunakan metode *Analysis of Variance* (ANOVA) dengan uji tes *General Linear Model*, sehingga dapat diketahui kontribusi setiap parameter terhadap nilai kekuatan tarik.

Tabel 6. Faktor dan Respon Uji Tes *General Linear Model*

TOOL GEOMETRY	KECEPATAN SPINDLE & PENGELASAN (rpm, mm/menit)	TEGANGAN (Kgf/mm <sup>2</sup> )
<i>Squared</i>	1200 rpm 15 mm/menit	6,84
<i>Squared</i>	1583 rpm 24 mm/menit	6,98
<i>Squared</i>	1900 rpm 43 mm/menit	6,90
<i>Threaded Cylindrical</i>	1200 rpm 24 mm/menit	6,93
<i>Threaded Cylindrical</i>	1583 rpm 43 mm/menit	6,95
<i>Threaded Cylindrical</i>	1900 rpm 15 mm/menit	7,05
<i>Tapered Cylindrical</i>	1200 rpm 43 mm/menit	7,01
<i>Tapered Cylindrical</i>	1583 rpm 15 mm/menit	7,17
<i>Tapered Cylindrical</i>	1900 rpm 24 mm/menit	7,05

Parameter yang digunakan sebagai faktor pada ANOVA dibagi menjadi tiga. Pertama, berdasarkan *tool geometry* yakni, *Threaded Cylindrical*, *Tapered Cylindrical*, dan *Squared*. Kedua, berdasarkan kecepatan *spindle* yaitu 1200

rpm, 1583 rpm, 1900 rpm. Dan ketiga, berdasarkan kecepatan pengelasan yakni, 15 mm/menit, 24 mm/menit, 43 mm/menit. Sedangkan nilai Tegangan dianggap sebagai respon terhadap faktor-faktor.

Tabel 7. Hasil ANOVA *General Linear Model*

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
<i>Tool Geometry</i>	2	0,043800	57,78%	0,043800	0,021900	4,44	0,184
Kecepatan <i>Spindle</i>	2	0,013867	18,29%	0,013867	0,006933	1,41	0,416
Kecepatan Pengelasan	2	0,008267	10,91%	0,008267	0,004133	0,84	0,544
Error	2	0,009867	13,02%	0,009867	0,004933		
Total	8	0,075800	100,00%				

Berdasarkan hasil ANOVA *general linear model*, *tool geometry* berkontribusi sebesar 57,78 % terhadap nilai tegangan tarik. Sedangkan kecepatan *spindle* 18,29% dan kecepatan pengelasan hanya berkontribusi sebesar 10,91%. Sehingga peluang error hanya sebesar 13,02%.

#### IV. SIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang dilakukan tentang pengaruh parameter terhadap kekuatan mekanik pengelasan pada eksperimen *Friction Stir Welding* (FSW) menggunakan bahan *High Density Polyethylene* (HDPE), maka dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Pengelasan *friction stir welding* dapat dilakukan pada material HDPE dengan menggunakan mesin frais divariasikan dengan beberapa parameter berbeda dan menghasilkan nilai uji tarik. Dari hasil tersebut nilai kekuatan uji tarik tertinggi diperoleh oleh spesimen 8 dengan variasi parameter kecepatan putar 1583 rpm, kecepatan pengelasan 15 mm/menit dan menggunakan *tool* model *Tapered Cylindrical* yang mendapat hasil uji tarik sebesar 7,17 Kgf/mm<sup>2</sup>. Sedangkan nilai uji tarik terendah diperoleh oleh spesimen 1 dengan variasi kecepatan putar 1200 rpm, kecepatan pengelasan 15 mm/menit dan menggunakan *Tool Squared* yang mendapat hasil uji tarik sebesar 6,84 Kgf/mm<sup>2</sup>.
2. Hasil ANOVA *General Linear Model* membuktikan bahwa *tool geometry* berkontribusi lebih besar terhadap kekuatan tegangan tarik yaitu sebesar 57,78% sedangkan sisanya dipengaruhi oleh kecepatan *spindle* 18,29% dan kecepatan pengelasan sebesar 10,91% serta peluang error yang terjadi sebesar 13,02%.
3. Pengelasan menggunakan material HDPE sangat mudah dan sangat efisien. Namun pengelasan tersebut harus mempertimbangkan dalam mengatur parameter-parameter yang akan digunakan.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Terimakasih kepada Allah SWT yang sudah memberikan sehat jasmani dan rohani dan bisa menyelesaikan penelitian ini dengan lancar. Kepada Orang tua saya sebagai penulis mengucapkan banyak banyak terimakasih atas support dan dukungannya sehingga bisa menyelesaikan pendidikan sampai selesai walaupun sedikit telat. Terimakasih juga kepada dosen atau pihak pihak lembaga lain yang sudah mensupport penelitian ini. Tak lupa pula calon istri yang bernama Galuh Amelia Sanjani S.I.Kom yang sudah menemani sampai penelitian ini benar – benar selesai. Terimakasih saya sampaikan juga kepada teman – teman tongkrongan, teman kerja, teman – teman organisasi atas olokan yang menjadikan saya bisa termotivasi agar bisa menyelesaikan penelitian ini. Sekian terimakasih

#### REFERENSI

- [1] F. Ashari, “Studi Eksperimen Pengaruh Variasi Kecepatan Putaran Spindle Dengan Pin Tirus Terhadap Impact Strength Dan Metallography Polyethylene Dengan Metode Friction Stir Welding,,” *Semant. Sch.*, 2014.
- [2] R. A. Y. Faruq, S. Jokosisworo, And E. S. Hadi, “Analisa Pengaruh Perbedaan Diameter Pin Tool Terhadap Kekuatan Tarik, Impak, Dan Mikrografi Pada Aluminium 6061 Dengan Metode Pengelasan Friction Stir Welding (Fsw),” *J. Tek. Perkapalan*, Vol. 7, No. 1, Pp. 1–9, 2019.
- [3] S. Amini, M. R. Amiri, And A. Barani, “Investigation Of The Effect Of Tool Geometry On Friction Stir Welding Of 5083-O Aluminum Alloy,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 76, No. 1, Pp. 255–261, 2015, Doi: 10.1007/S00170-014-6277-6.
- [4] V. Anjananda, “Pengaruh Temperatur Pada Penyambungan Material Polyethylene (Pe) Menggunakan Metode Friction Stir Welding,” *J. Online Mhs. Fak. Tek. Univ. Riau. Pekanbaru*, Vol. 6, Pp. 1–9, 2019.

- [5] S. K. Sahu, D. Mishra, R. P. Mahto, S. K. Pal, And K. Pal, "Friction Stir Welding Of Hdpe Sheets : A Study On The Effect Of Rotational Speed," *6th Int. 27th All India Manuf. Technol. Des. Res. Conf.*, No. July 2017, Pp. 1065–1068, 2016.
- [6] A. W. Nugroho, M. R. D. Saputra, And C. Budiyanoro, "Pengaruh Kecepatan Putar Tool Dan Sudut Shoulder Sambungan Friction Stir Spot Welding Pada Bahan Polypropylene," *Semesta Tek.*, Vol. 22, No. 2, Pp. 183–193, 2019, Doi: 10.18196/St.222250.
- [7] E. Raouache, Z. Boumerzoug, S. Rajakumar, And F. Khalfallah, "Effect Of Fsw Process Parameters On Strength And Peak Temperature For Joining High-Density Polyethylene (Hdpe) Sheets," *Rev. Des Compos. Des Mater. Av.*, Vol. 28, No. 2, Pp. 149–160, 2018, Doi: 10.3166/Rcma.28.149-160.
- [8] M. K. Bilici, B. Kurt, And H. Kurt, "Friction Stir Welded Of High Density Polyethylene Sheets," *J. Sci. Eng. Res.*, Vol. 4, No. 9, Pp. 363–370, 2017, [Online]. Available: [Www.Jsaer.Com](http://www.jsaer.com)
- [9] M. R. Hajideh, M. Farahani, S. A. D. Alavi, And N. M. Ramezani, "Investigation On The Effects Of Tool Geometry On The Microstructure And The Mechanical Properties Of Dissimilar Friction Stir Welded Polyethylene And Polypropylene Sheets," *J. Manuf. Process.*, Vol. 26, Pp. 269–279, 2017, Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.02.018>.
- [10] R. K. Kesharwani, S. K. Panda, And S. K. Pal, "Multi Objective Optimization Of Friction Stir Welding Parameters For Joining Of Two Dissimilar Thin Aluminum Sheets," *Procedia Mater. Sci.*, Vol. 6, No. Icmpe, Pp. 178–187, 2014, Doi: 10.1016/j.mspro.2014.07.022.

**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.*