

Pengaruh *Feed Rate* pada *Friction Stir Welding Polypropylene* Menggunakan Tool Aluminium 7075 Terhadap Kekuatan Tarik dan Lentur

Fahmi Irsad Masruhan^{*1}, Febri Budi Darsono², Kriswanto³, Muhammad Sibro Malisi⁴

^{1,2,3,4}Teknik Mesin, Universitas Negeri Semarang, Indonesia

Email: ¹fahmiirsad23@students.unnes.ac.id, ²febribudi@mail.unnes.ac.id,

³kriswanto@mail.unnes.ac.id, ⁴muhammadsibromalisi213@students.unnes.ac.id

Abstrak

Friction Stir Welding (FSW) merupakan metode penyambungan fase padat yang efektif untuk material termoplastik seperti *Polypropylene* (PP), terutama dalam industri otomotif dan manufaktur ringan. Tantangan utama dalam penerapannya pada polimer adalah pengendalian parameter proses, Khususnya kecepatan pengelasan (*feed rate*), yang memengaruhi kualitas sambungan. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh variasi *feed rate* terhadap kekuatan tarik dan lentur pada sambungan *polypropylene* yang dibentuk melalui proses *friction stir welding* (FSW). Proses dilakukan dengan menggunakan mesin *frais*, dengan tool berbahan aluminium 7075 dan pin silinder ulir. Variasi *feed rate* sebesar 15, 20, dan 25 mm/menit diterapkan dengan kecepatan putar konstan 1460 rpm dan sudut kemiringan 0°. Evaluasi dilakukan melalui pengujian tarik (ASTM D638), lentur (ASTM D790), serta pengamatan makro terhadap *stir zone*. Hasil menunjukkan bahwa *feed rate* 15 mm/menit menghasilkan *stir zone* yang paling homogen dengan cacat internal yang rendah dan kekuatan tarik tertinggi sebesar 13,485 MPa, setara efisiensi sambungan 44,06%. Sementara itu, kekuatan lentur tertinggi sebesar 15,179 MPa dicapai pada *feed rate* 25 mm/menit, dengan efisiensi lentur sebesar 32,1%. *Feed rate* tinggi cenderung menyebabkan cacat seperti *void* dan *incomplete fusion* akibat distribusi panas yang tidak merata serta plastisitas material yang tidak optimal. Penelitian ini berkontribusi pada pengembangan parameter *friction stir welding* untuk material polimer, khususnya melalui penerapan tool berbahan aluminium 7075 yang masih jarang dilaporkan dalam literatur dan dapat menjadi acuan untuk optimasi proses di sektor industri termoplastik.

Kata kunci: Aluminium 7075, *Feed Rate*, *Friction Stir Welding*, Kekuatan Lentur, Kekuatan tarik.

Effect of Feed Rate on Friction Stir Welding of Polypropylene Using an Aluminum 7075 Tool on Tensile and Flexural Strength

Abstract

Friction Stir Welding (FSW) is a solid-state joining method effective for thermoplastic materials such as polypropylene (PP), particularly in automotive and light manufacturing industries. A major challenge in its application to polymers is the control of process parameters, especially welding speed (*feed rate*), which significantly influences joint quality. This study aims to evaluate the effect of *feed rate* variation on the tensile and bending strength of FSW joints in polypropylene. Welding was performed using a milling machine with an aluminum 7075 tool featuring a threaded cylindrical pin, applying *feed rates* of 15, 20, and 25 mm/min at a constant rotational speed of 1460 rpm and a tilt angle of 0°. The joints were evaluated through tensile testing (ASTM D638), bending testing (ASTM D790), and macrostructural observation of the *stir zone*. The results showed that a *feed rate* of 15 mm/min produced the most homogeneous *stir zone* with minimal internal defects and the highest tensile strength of 13.485 MPa, corresponding to a joint efficiency of 44.06%. The highest bending strength of 15.179 MPa was achieved at 25 mm/min with a bending efficiency of 32.1%. Higher *feed rates* tended to produce defects such as voids and incomplete fusion due to uneven heat distribution and suboptimal material plasticity. Particularly using aluminum 7075 tools, which are still rarely reported in literature and can serve as a reference for process optimization in the thermoplastic industry.

Keywords: Aluminum 7075, *Feed Rate*, *Flexural Strength*, *Friction Stir Welding*, *Tensile Strength*

1. PENDAHULUAN

Friction Stir Welding (FSW) merupakan metode *solide-state joining* yang dikembangkan sebagai solusi atas keterbatasan pengelasan fusi pada material termoplastik [1],[2]. Tidak seperti proses pengelasan konvensional yang mencairkan material, FSW mengandalkan panas akibat gesekan deformasi plastis untuk menyatukan material dalam fase padat, sehingga sangat cocok digunakan pada polimer yang sensitif terhadap suhu tinggi [3],[4].

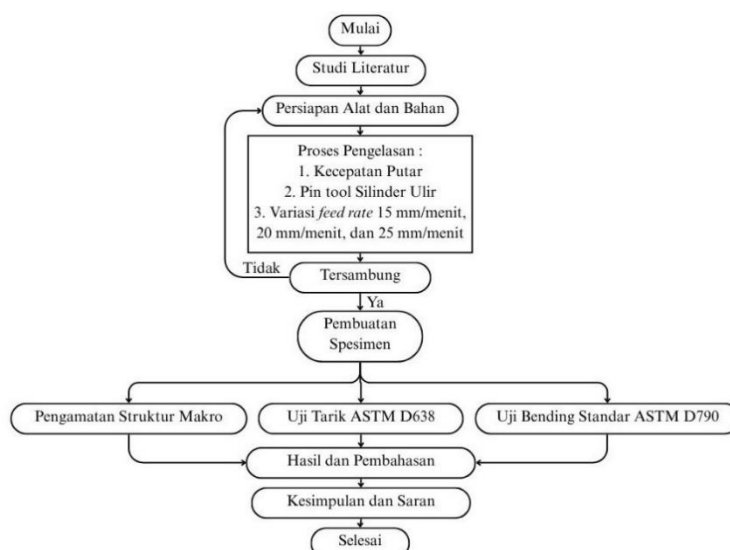
Implementasi FSW pada material polimer, seperti *polypropylene* (PP) dan *high-density polyethylene* (HDPE), semakin banyak dikembangkan untuk aplikasi di sektor otomotif, dirgantara, dan manufaktur komposit [5],[6]. Dalam industri otomotif, komponen berbahan polimer yang disambung menggunakan FSW cocok untuk mengurangi bobot kendaraan dan konsumsi energi [7]–[10]. Di sisi lain, dalam aplikasi struktur ringan, penggunaan FSW pada polimer mempercepat produksi tanpa memerlukan bahan tambahan atau gas pelindung [1],[11]–[13]. Dibanding metode penyambungan lain seperti *adhesive bonding* atau *mechanical fastening*, FSW memiliki beberapa kelebihan, di antaranya adalah efisiensi energi, tidak adanya bahan kimia perekat, kekuatan sambungan yang lebih tinggi, serta proses yang lebih ramah lingkungan [14],[15]. Selain itu, proses ini menghasilkan distorsi termal yang rendah dan minim cacat seperti porositas atau retakan [7].

Namun demikian, keberhasilan FSW sangat dipengaruhi parameter proses seperti kecepatan putar (RPM), kecepatan pengelasan (*feed rate*), geometris tool, kedalaman penetrasi (*plunge depth*), kemiringan tool (*tilt angle*) dan jenis material tool [1],[9],[16],[17]. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa kecepatan putar tinggi (± 1500 RPM) dan *feed rate* rendah (60 mm/menit) dengan pin berulir menghasilkan *stir zone* (SZ) yang padat dan minim cacat [18]. Adapun penelitian sebelumnya yang membahas pengaruh parameter menunjukkan kecepatan rotasi (RPM), kecepatan pengelasan (*feed rate*), dan sudut kemiringan (*tilt angle*) masing-masing memberikan kontribusi sebesar 73,85%, 20,18%, dan 5,96% terhadap kualitas sambungan [17].

Pemilihan material tool juga menjadi faktor krusial [12]. Tool berbahan baja cenderung menimbulkan akumulasi panas karena konduktivitas termal rendah [9],[19]. sedangkan aluminium, dengan konduktivitas termal tinggi dan titik leleh yang lebih jauh di atas polimer, mampu mendistribusikan panas lebih merata dan menjaga kestabilan termal selama proses [20],[21]. Meski demikian, tantangan utama tetap ada, seperti terbentuknya cacat *internal void* dan *incomplete fusion* apabila parameter tidak di kendalikan secara optimal [1],[10],[22]. Penelitian ini memiliki urgensi dan kontribusi strategis dalam mendukung pengembangan teknologi pengelasan pada sektor otomotif, dirgantara, dan manufaktur, khususnya dalam mengoptimalkan parameter proses *Friction Stir Welding* (FSW) untuk material polimer termoplastik. Fokus penelitian ini diarahkan pada analisis kekuatan tarik dan lentur material *Polypropylene* (PP) yang di sambung menggunakan metode *Friction Stir Welding* (FSW).

Penelitian ini secara khusus bertujuan untuk mengidentifikasi pengaruh variasi kecepatan pengelasan (*feed rate*) terhadap kekuatan tarik dan lentur sambungan *Friction Stir Welding* (FSW) pada material *Polypropylene* (PP). Melalui penggunaan tool berbahan aluminium 7075, penelitian ini juga mengevaluasi kestabilan termal dan distribusi panas dalam membentuk *stir zone* yang homogen, guna menentukan parameter proses optimal untuk menghasilkan sambungan dengan performa mekanik yang tinggi.

2. METODE PENELITIAN



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimen kuantitatif untuk mengvalliiasi pengaruh variasi kecepatan pengelasan (*feed rate*) terhadap kekuatan tarik dan lentur sambungan *Friction Stir Welding* (FSW) pada material *Polypropylene*. Proses dilakukan melalui tahapana sistematis yang ditunjukkan pada Gambar 1.

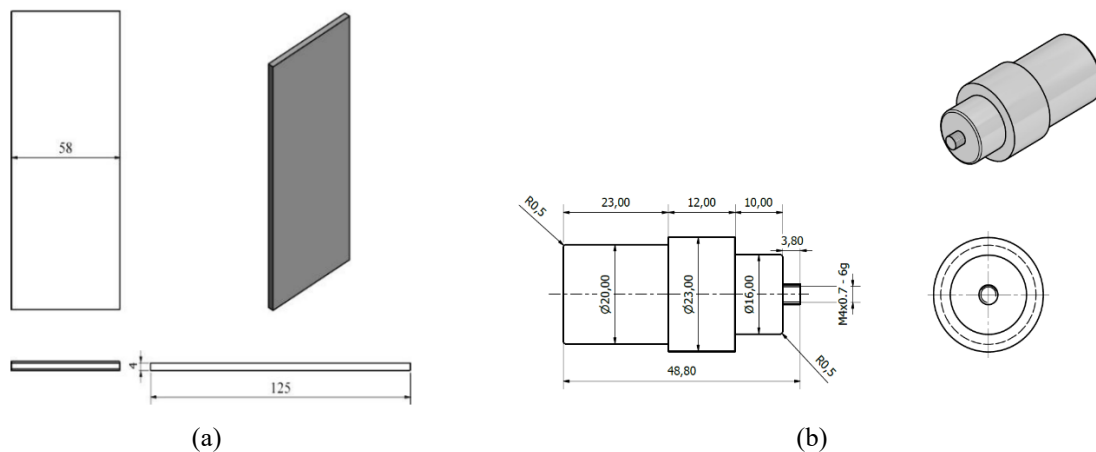
Penelitian ini menggunakan beberapa peralatan utama, yaitu :

- Mesin Frais Krisbow X6325 yang dimodifikasi untuk proses FSW
- Universal Testing Machine* (UTM) untuk uji tarik, dan
- Perangkat uji Lentur dengan konfigurasi three-point bending.

Seluruh kegiatan dilaksanakan di Laboratorium Teknik Mesin, Fakultas teknik, Universitas Negeri Semarang

Tabel 1. Spesifikasi Material Penelitian

Komponen	Material	Spesifikasi
Material tool	Aluminium 7075	
Geometri Pin Tool	Silinder Ulir	Diameter Pin : 4 mm Diameter <i>Shoulder</i> : 16 mm Panjang Pin : 3,80 mm
Material Sambungan	PP (<i>Polypropylene</i>)	Lembaran 125 mm × 58 mm × 4 mm

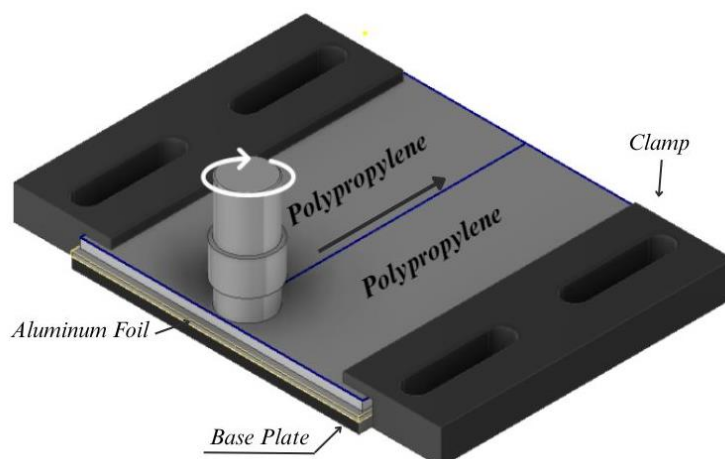


Gambar 2. Desain (a) Dimensi Bahan (b) Dimensi Tool Silinder Ulir

Proses pengelasan dilakukan dengan variasi *feed rate* 15, 20, dan 25 mm/menit, menggunakan kecepatan putar konstan 1460 rpm dan sudut kemiringan 0° secara konstan. Desain eksperimental ditampilkan pada tabel 2.

Tabel 2. Parameter Proses

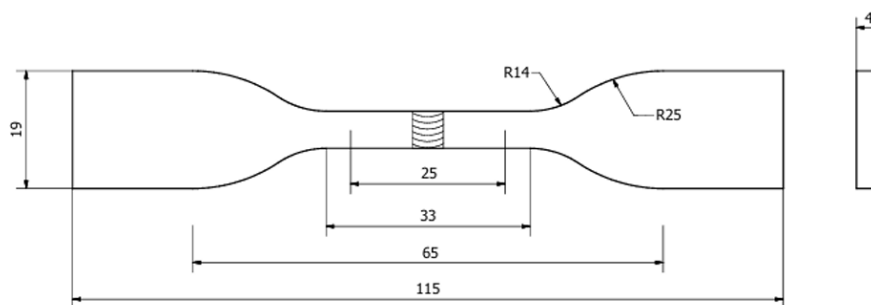
Parameter	Level 1	Level 2	Level 3
<i>Feed Rate</i> , mm/menit	15	20	25
kecepatan putar, RPM	1460	1460	1460
<i>Tilt Angle</i>	0°	0°	0°



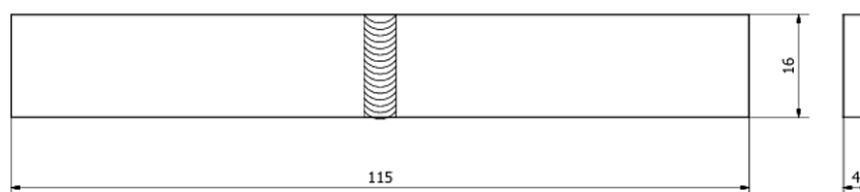
Gambar 3. Proses Penggabungan Material PP Menggunakan FSW

Metode FSW dalam penelitian ini dimodifikasi untuk pengelasan material polimer, dengan penyesuaian sebagai berikut : (a) mesin *frais* diubah menjadi FSW manual dengan kontrol *feed rate* dan RPM, (b) Tool aluminium 7075 berbentuk silinder ulir digunakan untuk menjaga aliran plastis material dan menghindari kerusakan termal, (c) proses dilakukan tanpa *Pre-heating*, (d) penjepitan menggunakan *jig* dan *fixture* khusus untuk mencegah deformasi selama proses.

Setelah proses FSW selesai, spesimen dipotong dan diuji kekuatan tarik serta lentur. Pengujian tarik mengacu pada standar ASTM D638 Tipe V sedangkan pengujian lentur mengacu pada ASTM D790



Gambar 4. Desain Spesimen Uji Tarik ASTM D638 Tipe V



Gambar 5. Desain Spesimen Uji Lentur ASTM D790

Pengambilan data dilakukan dalam tiga tahap utama :

1. Pengelasan : proses dilakukan tanpa *pre-heating*. Setiap kombinasi parameter menghasilkan sambungan pada dua spesimen untuk menjaga konsistensi data.
2. Pengujian mekanik :
 - Uji tarik dilakukan sesuai standar ASTM D638
 - Uji lentur mengikuti standar ASTM D790 dengan metode *three-point bending*
 - Nilai kekuatan yang dianalisis merupakan rata-rata dari dua pengukuran, dan disertai dengan perhitungan simpangan baku (standar deviasi) untuk memastikan validitas dan konsistensi data.
3. Pengamatan makro : visualisasi *stir zone* (SZ) dilakukan untuk mengidentifikasi cacat seperti *void* dan *incomplete fusion*.

Untuk mengukur performa sambungan dibandingkan material aslinya digunakan rumus efisiensi sambungan dihitung menggunakan rumus :

$$\text{Efisiensi sambungan (\%)} = \left(\frac{\text{Kekuatan sambungan}}{\text{Kekuatan Raw Material}} \right) \times 100\% \quad (1)$$

Keterangan :

- Kekuatan sambungan : Nilai kekuatan tarik atau lentur hasil pengelasan
- Kekuatan raw material : Nilai kekuatan tarik atau lentur material PP tanpa pengelasan

Rumus ini digunakan untuk membandingkan performa mekanik hasil FSW terhadap material aslinya (tanpa perlakuan), dan dianalisis secara kuantitatif untuk setiap variasi *feed rate*.

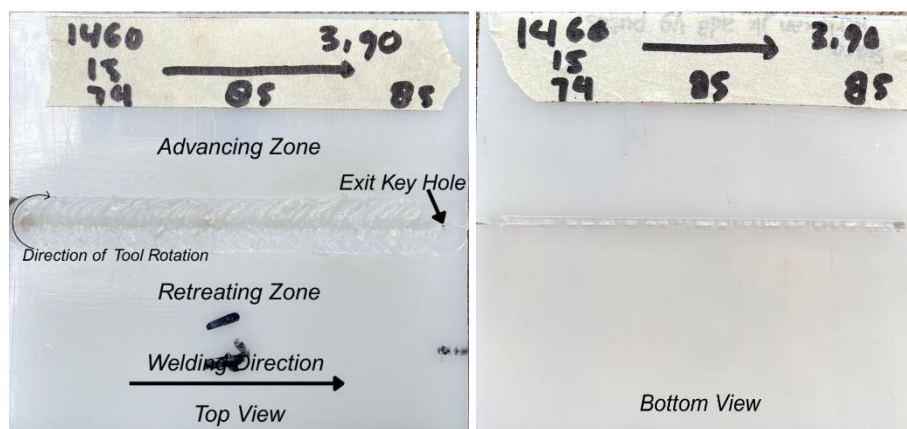
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil Pengelasan

Hasil penyambungan polimer sejenis (PP) menggunakan metode *Friction Stir Welding* (FSW) mengindikasikan bahwa perubahan pada kecepatan pengelasan (*feed rate*) memiliki dampak signifikan terhadap mutu sambungan yang dihasilkan. Dalam penelitian ini digunakan tiga variasi kecepatan pengelasan yaitu 15, 20, dan 25 mm/menit. Setiap kecepatan menghasilkan perbedaan pada sifat mekanik sambungan, seperti kekuatan tarik dan ketahanan lentur [23]. Temuan ini menunjukkan bahwa pengaturan *feed rate* merupakan faktor penting dalam meningkatkan performa sambungan FSW pada material polimer.

3.1.1. Feed Rate 15 mm/menit

Visualisasi hasil sambungan FSW pada material *similar* PP dengan parameter kecepatan pengelasan (*feed rate*) 15 mm/menit dapat dilihat pada Gambar 5.

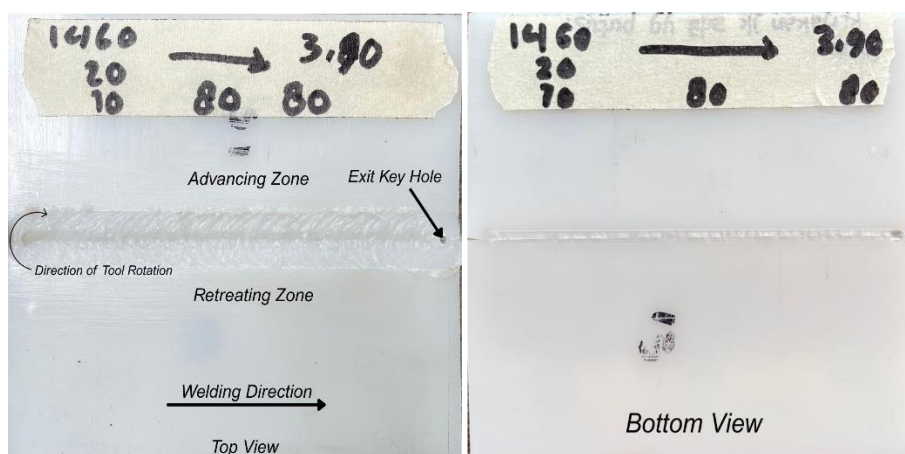


Gambar 6. Hasil Sambungan dengan feed rate 15 mm/menit

Pada *stir zone* (SZ) sambungan yang terbentuk memiliki permukaan yang kurang rata dengan pola aliran material yang tidak seragam, terutama pada area *retreating side* (RS). tidak teraturnya dihasilkan dari distribusi panas selama proses pengelasan belum merata, sehingga aliran plastis material tidak berlangsung secara optimal [24]. Meskipun secara visual tampak kasar, *input* panas yang tinggi pada parameter ini mampu meningkatkan plastisitas material dan memperkuat pencampuran antar permukaan sambungan [25].

3.1.2. Feed Rate 20 mm/menit

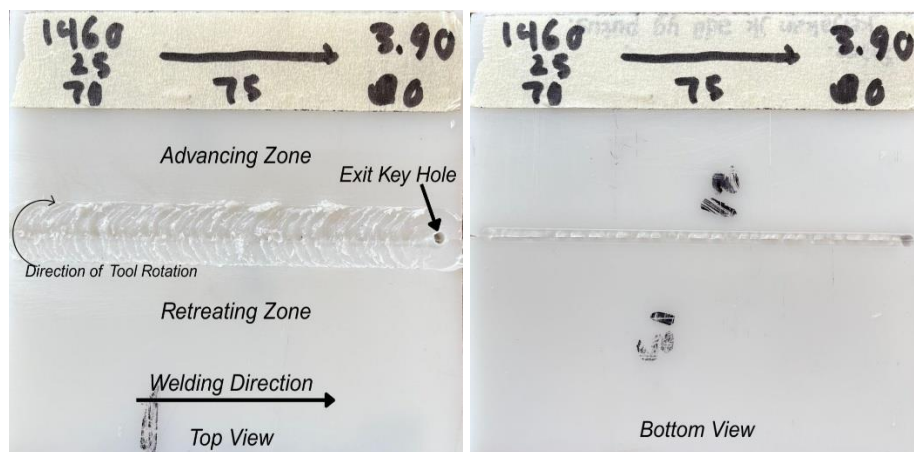
Gambar 6. Menyajikan visualisasi hasil sambungan material *polypropylene* (PP) sejenis yang diperoleh melalui proses melalui proses *friction stir welding* (FSW) dengan penerapan *feed rate* sebesar 20 mm/menit.

Gambar 7. Hasil Sambungan dengan *Feed Rate* 20 mm/menit

Pola aliran material di *stir zone* (SZ) terlihat teratur dan menyatu dengan baik antara *advancing side* (AS) dan *retreating side* (RS), teraturnya aliran pada *stir zone* (SZ) ini menjadikan permukaan sambungan yang paling bersih dibandingkan parameter lainnya. friksi antara tool dan material cukup untuk menghasilkan permukaan las yang stabil tanpa menyebabkan deformasi berlebih di permukaan. Kondisi ini menunjukkan bahwa *input* panas yang relatif rendah cukup untuk membentuk permukaan yang baik secara visual [26]. *Input* panas yang relatif rendah pada *stir zone* (SZ) menurunkan tingkat plastisitas material selama proses pengadukan menyebabkan pencampuran material tidak sempurna [1].

3.1.3. *Feed Rate* 25 mm/menit

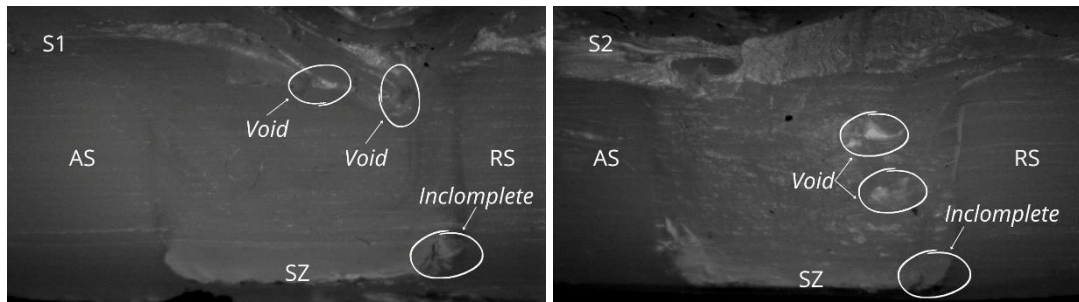
Hasil sambungan *Polypropylene* (PP) *similar* menggunakan metode *Friction Stir Welding* (FSW) pada *feed rate* 20 mm/menit dapat dilihat pada gambar berikut.

Gambar 8. Hasil Sambungan dengan *Feed Rate* 25 mm/menit

Jika dibandingkan dengan hasil pengelasan sebelumnya, permukaan *stir zone* (SZ) bergelombang dan alur aliran material yang tampak kasar serta tidak merata. Ciri khas cacat berupa *wormhole* terlihat di *advancing side* (AS) yang menunjukkan pencampuran material kurang optimal akibat *input* panas yang rendah [27]. Pada *advancing side* (AS), aliran material terlihat terganggu dan tidak menyatu sempurna, yang mengindikasikan kurangnya plastisitas dan penetrasi dari sisi tool yang berputar searah jarum jam [27]. Pada *retreating side* (RS), permukaan cenderung lebih tertutup namun tetap menunjukkan tidak teraturnya pola aliran pada *stir zone* (SZ), parameter ini menunjukkan tidak seimbang antara distribusi panas dan gaya gesek di kedua sisi zona las.

3.2. Hasil Foto Makro

3.2.1. Feed Rate 15 mm/menit

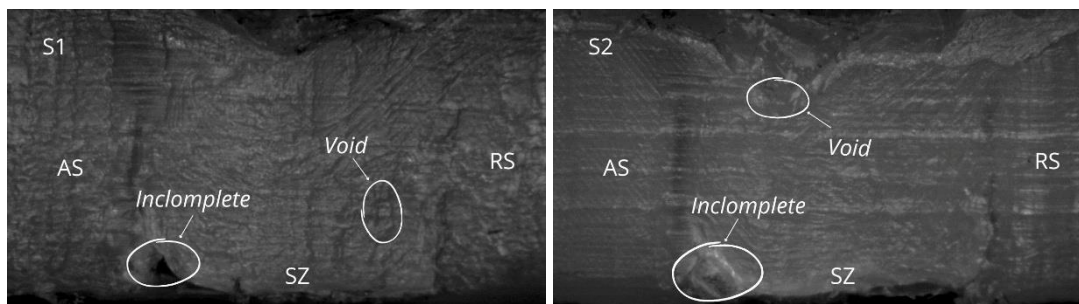


Gambar 9. Visualisasi Makro Sambungan PP pada Feed Rate 15 mm/menit

Hasil foto makro penampang sambungan FSW menunjukkan adanya cacat internal berupa *void* dan *incomplete fusion* yang dominan di *retreating side* (RS) serta sebagian di area tengah *stir zone* (SZ). Cacat *void* tampak jelas sebagai rongga-rongga tak berisi yang mengindikasikan tidak tercapainya pencampuran sempurna antar material yang dilunakkan, sementara cacat *incomplete* menunjukkan tidak terisinya material di bawah *stir zone* (SZ) [28]. Zona *advancing side* (AS) struktur tampak lebih homogen dan padat, aliran material lebih stabil karena arah putaran tool searah dengan jarum jam [11]. Distribusi panas yang belum rata selama proses pengelasan menghasilkan pola aliran material yang tidak seragam, terutama pada *retreating side* (RS). cacat yang terdapat pada *feed rate* 15 mm/menit lebih sedikit dibandingkan dengan yang lainnya, Pola aliran material *stir zone* (SZ) tampak teratur dan menyatu antara *advancing side* (AS) dan *retreating side* (RS).

3.2.2. Feed Rate 20 mm/menit

Gambar 9. menyajikan hasil observasi makro pada penampang melintang sambungan FSW, ditemukan cacat internal berupa *void* dan *incomplete* yang terdistribusi pada *stir zone* (SZ), sisi *advancing side* (AS), dan sisi *retreating side* (RS).

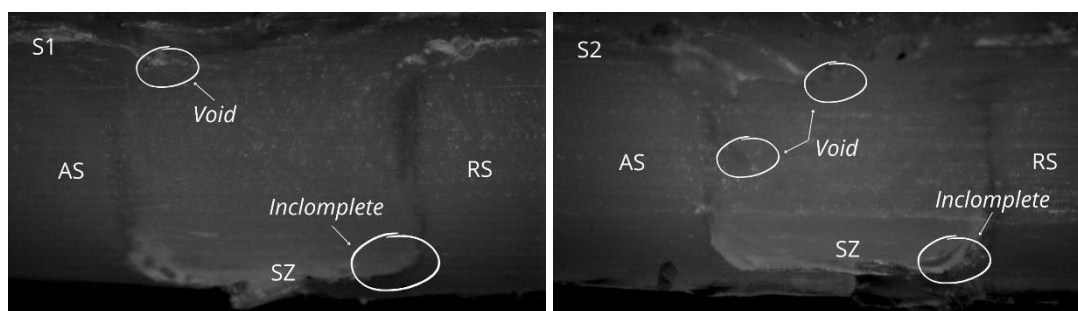


Gambar 10. Visualisasi Makro Sambungan PP pada Feed Rate 20 mm/menit

Advancing side (AS) terlihat cacat *incomplete fusion* yang besar dari pada *feed rate* yang lain. *Incomplete* ini terlihat di sisi bawah sambungan yang menunjukkan kurang sempurnanya pencampuran material akibat kurangnya penetrasi pengadukan [25]. *Void* pada *retreating side* (RS) terbentuk akibat tidak sempurnanya aliran plastis material selama proses pengadukan, hal ini disebabkan oleh kurangnya tekanan aksial yang optimal [17].

3.2.3. Feed Rate 25 mm/menit

Gambar 10. Menyajikan hasil visualisasi makro struktur sambungan material PP sejenis dengan *feed rate* 25 mm/menit.

Gambar 11. Visualisasi Makro Sambungan PP pada *Feed Rate* 25 mm/menit

Berdasarkan hasil observasi makro struktur yang ditampilkan pada gambar 10, sambungan *similar Polypropylene* (PP) dengan *feed rate* 25 mm/menit menunjukkan zona deformasi plastis yang cukup merata pada sebagian besar area *stir zone* (SZ). Cacat *void* masih terlihat di bagian atas *stir zone* (SZ) dan *incomplete fusion* di bagian bawahnya. Sisi *advancing side* (AS) struktur makro lebih homogen dibandingkan dengan parameter proses sebelumnya, yang menunjukkan aliran material yang lebih stabil akibat kombinasi arah rotasi dan translasi yang mendukung proses pencampuran. Pada *retreating side* (RS), di mana arah rotasi tool searah dengan arah translasi, terlihat kecenderungan pembentukan *incomplete fusion* yang lebih jelas. Fenomena ini berkorelasi dengan tidak seimbangnya distribusi energi termo mekanik pada sisi tersebut, yang secara umum menghambat pencampuran material secara menyeluruh [29].

Keberadaan cacat-cacat tersebut berpotensi menurunkan integritas sambungan dan meningkatkan risiko kegagalan prematur, terutama pada bagian statis maupun dinamis. Hal ini sejalan dengan data temperatur pada Tabel 3 yang menunjukkan fluktuasi panas pada variasi *feed rate* 15, 20, dan 25 mm/menit, di mana suhu yang dihasilkan sudah cukup mendukung proses pencampuran material, namun masih perlu ditingkatkan untuk memperoleh sambungan yang lebih homogen dan minim cacat.

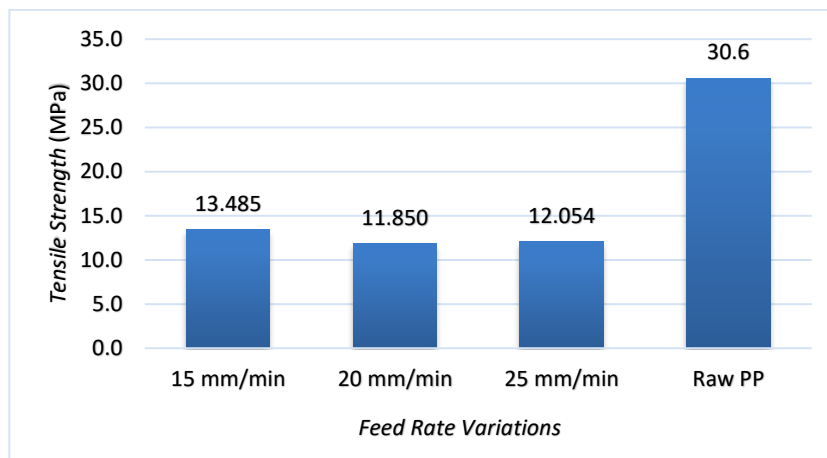
Tabel 3. Pengukuran suhu proses FSW

Variasi <i>Feed Rate</i>	Mulai	Tengah	Akhir
15 mm/menit	74°C	85°C	85°C
20 mm/menit	70°C	80°C	80°C
25 mm/menit	70°C	75°C	80°C

Tabel 3 menyajikan hasil pengukuran temperatur di setiap daerah, yaitu pada tahap awal, tengah, dan akhir selama proses pengelasan *Friction Stir Welding* (FSW) pada material *similar PP*. Selama proses ini temperatur masing-masing spesimen di ukur menggunakan *thermogun* pada tiga tahap tersebut. Pengukuran ini bertujuan untuk mengetahui bagaimana temperatur material berubah selama proses pengelasan berlangsung.

Penggunaan *feed rate* sebesar 15 mm/menit pada proses FSW material *similar PP* menghasilkan jumlah cacat yang lebih rendah dibandingkan dengan parameter *feed rate* 20 mm/menit dan 25 mm/menit. Hal ini disebabkan oleh plastisitas dan pencampuran material yang lebih merata, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 3, di mana suhu maksimum sebesar 85°C tercapai secara konsisten hingga akhir proses. Kenaikan suhu sekitar 10°C dibandingkan dengan *feed rate* 25 mm/menit terbukti berkontribusi pada peningkatan plastisitas material, sehingga mengurangi cacat seperti *void* dan *incomplete fusion* [1]. Hasil ini selaras dengan visualisasi makro Gambar 8. Yang menunjukkan *stir zone* (SZ) lebih homogen dan padat. efek termo mekanik yang dihasilkan dari interaksi antara rotasi tool dengan variasi *feed rate* memberikan kontribusi signifikan terhadap kualitas mekanik sambungan [27]. Pada parameter *feed rate* 15 mm/menit, diperoleh nilai kekuatan tarik tertinggi sebesar 13,485 MPa, yang menunjukkan peningkatan sekitar 14% dibandingkan dengan *feed rate* 20 mm/menit. Visualisasi pada Gambar 11 secara jelas menunjukkan bahwa *feed rate* 15 mm/menit menghasilkan kekuatan tarik tertinggi dibandingkan dengan dua parameter lainnya, hal ini memperkuat korelasi antara kestabilan termal, minimnya cacat internal, dan peningkatan integritas mekanik sambungan. Oleh karena itu kestabilan suhu selama proses pengelasan merupakan faktor krusial juga dalam menjamin keberhasilan plastisitas material dan terbentuknya *stir zone* yang homogen serta kuat secara struktural [16].

3.3. Hasil Uji Tarik

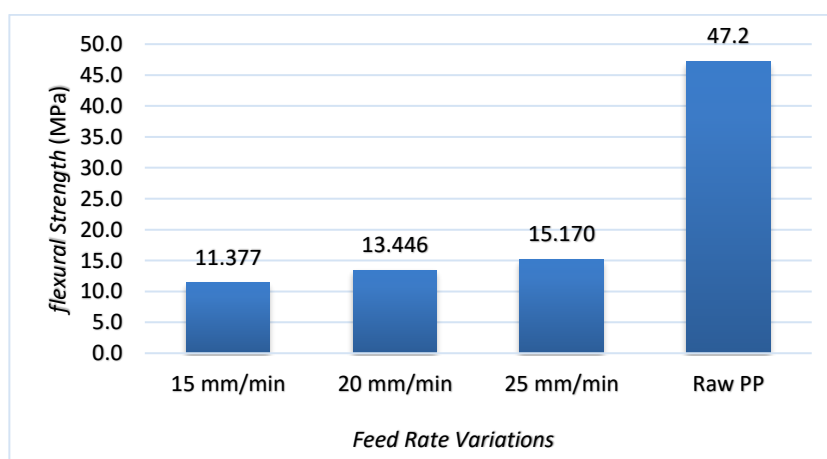


Gambar 12. Grafik Hasil Uji Tarik

Gambar 11. Menunjukkan hasil uji tarik material polimer PP yang disambung dengan variasi *feed rate* menggunakan metode *Friction Stir Welding* (FSW). Nilai rata-rata tegangan tarik pada material raw PP dengan nilai rata-rata 30,6 MPa [30]. Sambungan FSW yang di lakukan dengan *feed rate* 15 mm/menit menunjukkan kekuatan tarik rata-rata tertinggi yaitu 13,485 MPa, diikuti dengan *feed rate* 25 mm/menit dengan nilai rata-rata 12,054 MPa, sedangkan nilai rata-rata terendah diperoleh *feed rate* 20 mm/menit sebesar 11,850 MPa.

Feed rate 15 mm/menit menghasilkan sambungan yang relatif lebih kuat karena distribusi panas dan proses plastisitas material berlangsung lebih stabil dan merata, hal ini dapat dilihat pada Gambar 8. bahwa hasil foto makro pada parameter *feed rate* 15 mm/menit menghasilkan cacat yang lebih sedikit dari yang lainnya. Distribusi panas yang tidak merata pada *feed rate* 25 mm/menit menjadi penghambat pencairan material secara menyeluruh dan kecenderungan pembentukan *incomplete fusion* yang lebih jelas [17]. Gambar 10 memvisualisasikan adanya cacat *incomplete fusion* pada bagian bawah *stir zone* (SZ) menjadikan nilai rata-rata yang lebih rendah dari *feed rate* 15 mm/menit namun lebih tinggi dibandingkan *feed rate* 20 mm/menit, pada Gambar 9. menunjukkan terlihatnya cacat *incomplete* yang cukup besar pada dasar *stir zone* (SZ) akibat kurangnya penetrasi pengadukan.

3.4. Hasil Uji Lentur



Gambar 13. Grafik Hasil Uji Lentur

Hasil pengujian kekuatan lentur (*flexural strength*) pada material *polypropylene* (PP) yang disambung menggunakan proses *Friction Stir Welding* (FSW) dengan variasi *feed rate* menunjukkan bahwa material PP tanpa perlakuan (raw material) memiliki nilai rata-rata sebesar 47,2 MPa [30]. Di antara sambungan FSW, *feed rate* 25 mm/menit menghasilkan nilai rata-rata kekuatan lentur tertinggi sebesar 15,179 MPa, diikuti oleh *feed rate* 20

mm/menit dengan nilai rata-rata kekuatan lentur sebesar 13,446 Mpa, kemudian nilai rata-rata kekuatan lentur yang paling rendah 11,377 MPa dengan *feed rate* 15 mm/menit.

Penurunan kekuatan lentur pada sambungan FSW polimer dibandingkan material raw PP disebabkan oleh terbentuknya cacat internal seperti *void* dan *incomplete fusion* akibat pencampuran material yang tidak merata di *stir zone* (SZ) [1]. Distribusi panas yang tidak optimal, terutama pada variasi *feed rate* tertentu, menghambat plastisitas sempurna sehingga mengurangi kualitas ikatan permukaan. Tidak homogenya aliran material, terutama pada sisi *retreating side* (RS), juga turut berkontribusi terhadap melemahnya integritas mekanik sambungan terhadap beban lentur. Berdasarkan hasil penelitian, sebagian besar retak dimulai dari rongga penyusutan yang muncul selama fase pendinginan pada *stir zone* (SZ) [31]. Yang kemudian berkembang di bawah beban lentur dan menyebabkan kegagalan struktural lebih awal.

3.5. Diskusi

Variasi *feed rate* dalam proses *Friction Stir Welding* (FSW) pada *polypropylene* terbukti memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kualitas sambungan, baik secara visual maupun mekanik. *Feed rate* sebesar 15 mm/menit menghasilkan *stir zone* (SZ) yang lebih homogen dan padat, serta nilai kekuatan tarik tertinggi sebesar 13,485 MPa. Keberhasilan ini secara mekanis dapat dijelaskan melalui konsep plastisitas material yang lebih baik akibat waktu paparan gesekan yang lebih lama, memungkinkan aliran material yang lebih sempurna. Secara termal, *feed rate* rendah meningkatkan *input* panas ke zona las, yang mempercepat pelunakan material polimer tanpa menyebabkan degradasi termal. Fenomena cacat internal *void* dan *incomplete fusion* yang banyak ditemukan pada *feed rate* 20 dan 25 mm/menit dapat dijelaskan dengan teori distribusi panas dan tekanan aksial yang tidak optimal. seperti yang di jelaskan pada penelitian sebelumnya tidak seimbang antara kecepatan translasi dan rotasi tool dapat menyebabkan gangguan aliran plastis yang berujung pada terbentuknya rongga kosong (*void*) [27]. Hal ini diperkuat dengan pendapat balaguera dkk. yang menyebutkan bahwa peningkatan *feed rate* mengurangi waktu pencampuran antara material dan menyebabkan tidak meratanya panas, sehingga meningkatkan potensi cacat struktural [16].

Temuan ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menekankan bahwa *feed rate* rendah pada polimer meningkatkan efisiensi sambungan dengan mengurangi porositas dan meningkatkan pencampuran antar permukaan [1]. Penelitian sebelumnya menjelaskan sambungan *dissimilar* HDPE-PP juga menunjukkan bahwa *feed rate* tinggi memperburuk performa mekanik karena pencampuran yang tidak sempurna dan tidak homogenya *stir zone* [32]. Sementara itu, hajideh dkk. menyatakan desain tool yang optimal seperti pin silinder ulir serta material tool dengan konduktivitas termal tinggi mampu meningkatkan kualitas sambungan, terutama jika dikombinasikan dengan *feed rate* rendah [21]. Dari sisi kekuatan lentur, *feed rate* 25 mm/menit menunjukkan nilai tertinggi sebesar 15,179 MPa. Hal ini disebabkan oleh distribusi zona plastis yang lebih luas dan pergeseran fokus deformasi ke permukaan luar material yang lebih fleksibel terhadap lenturan. Namun, kekuatan tariknya tetap lebih rendah dibandingkan *feed rate* 15 mm/menit, mengindikasikan bahwa sambungan masih mengandung cacat mikro yang dapat menurunkan integritas ikatan pada beban tarik.

Hasil penelitian ini memberikan kontribusi ilmiah dalam menguatkan pemahaman mengenai efek parameter termomekanik pada proses FSW polimer. Secara praktis, *feed rate* 15 mm/menit direkomendasikan untuk aplikasi sambungan struktural yang memerlukan kekuatan tarik tinggi, seperti csing komponen otomotif atau panel pengikat. Sementara *feed rate* 25 mm/menit lebih cocok digunakan untuk aplikasi semi-struktural atau komponen lentur yang menekankan ketahanan terhadap deformasi. Penggunaan tool berbahan aluminium 7075 juga terbukti menjadi alternatif ekonomis dan efektif dibandingkan baja, khususnya karena sifat termal dan kemudahan fabrikasinya. Penelitian ini juga membuka ruang studi lanjutan terkait optimasi multi parameter (misalnya kombinasi *feed rate*, RPM, dan *tilt angle*) serta pengembangan tool dengan profil geometri yang lebih kompleks untuk meningkatkan homogenitas *stir zone*.

4. KESIMPULAN

Penelitian menunjukkan bahwa kontrol parameter *feed rate* berpengaruh signifikan dalam menentukan kualitas sambungan *Friction Stir Welding* (FSW) pada material *Polypropylene* (PP). *Feed rate* 15 mm/menit menghasilkan *stir zone* yang lebih homogen dan kuat, dengan kekuatan tarik tertinggi sebesar 13,485 MPa dan efisiensi sambungan mencapai 44,06% dibandingkan material dasar. Sementara itu, *feed rate* 25 mm/menit menghasilkan kekuatan lentur tertinggi sebesar 15,179 MPa dengan efisiensi sambungan sebesar 32,1%, meskipun lebih rentan terhadap cacat internal seperti *void* dan *incomplete fusion*.

Kontribusi utama dari penelitian ini adalah membuktikan bahwa penggunaan tool berbahan aluminium 7075 efektif digunakan untuk FSW pada polimer, dan hasilnya dapat dijadikan acuan dalam optimalisasi sambungan termoplastik di sektor otomotif dan manufaktur ringan. Efisiensi sambungan yang tinggi membuktikan potensi

penerapannya dalam produk berbasis PP yang membutuhkan kekuatan tarik dan lentur spesifik. Penelitian lanjutan disarankan untuk mengeksplorasi kombinasi parameter lain seperti kecepatan putar (RPM), sudut kemiringan (*tilt angel*), serta variasi desain tool guna meningkatkan integritas mekanik sambungan dan mengurangi cacat secara lebih konsisten.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] 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 (Basel)*, vol. 13, no. 13, 2021, doi: 10.3390/polym13132056.
- [2] T. Ge, G. S. Grest, and M. O. Robbins, "Tensile Fracture of Welded Polymer Interfaces: Miscibility, Entanglements, and Crazing," *Macromolecules*, vol. 47, no. 19, pp. 6982–6989, Oct. 2014, doi: 10.1021/ma501473q.
- [3] A. Azhagar and K. Hayakawa, "Effects of Tool Surface Geometry on Temperature Distribution and Material Properties of an Aluminum Alloy in Friction Stir Welding," *Mater. Trans.*, vol. 61, no. 2, pp. 276–281, Feb. 2020, doi: 10.2320/matertrans.MT-ML2019017.
- [4] A. Biradar, A. Bhushan, S. Pawade, and N. P. Sherje, "Friction Stir Welding (FSW): Solid-State Joining of Composite Materials," in *Advances in Materials Processing - Recent Trends and Applications in Welding, Grinding, and Surface Treatment Processes*, IntechOpen, 2024. doi: 10.5772/intechopen.1004831.
- [5] K. C. de Lira Lixandrão and F. F. Ferreira, "Polypropylene and tire powder composite for use in automotive industry," *Heliyon*, vol. 5, no. 9, p. e02405, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.heliyon.2019.e02405.
- [6] S. Sunaryo *et al.*, "Inovasi Material Komposit Poliuretan menggunakan (ZnO:Nanoselulosa dari Serat Tandan Kosong Buah Kelapa Sawit) Sebagai Penguat Absorpsi Suara dan Insulasi Termal," *Turbo J. Progr. Stud. Tek. Mesin*, vol. 12, no. 2, Dec. 2023, doi: 10.24127/trb.v12i2.2742.
- [7] M. Akbari, P. Asadi, and T. Sadowski, "A Review on Friction Stir Welding/Processing: Numerical Modeling," *Materials (Basel)*, vol. 16, no. 17, p. 5890, Aug. 2023, doi: 10.3390/ma16175890.
- [8] V. Giurgiutiu, "Boeing 787 from the ground up," in *Stress, Vibration, and Wave Analysis in Aerospace Composites*, Elsevier, 2022, pp. 1–27. doi: 10.1016/B978-0-12-813308-8.00006-5.
- [9] A. A. Barakat, B. M. Darras, M. A. Nazzal, and A. A. Ahmed, "A Comprehensive Technical Review of the Friction Stir Welding of Metal-to-Polymer Hybrid Structures," *Polymers (Basel)*, vol. 15, no. 1, 2023, doi: 10.3390/polym15010220.
- [10] M. A. E. Omer, M. Rashad, A. H. Elsheikh, and E. A. Showaib, "A review on friction stir welding of thermoplastic materials: recent advances and progress," *Weld. World*, vol. 66, no. 1, pp. 1–25, Jan. 2022, doi: 10.1007/s40194-021-01178-0.
- [11] F. R. Usman and D. S. Pamuji, "Pengaruh Variasi Putaran Tools Terhadap Kekuatan Tarik Dan Kekuatan Lengkung (Bending) Sambungan FSW Butt-Joint Pada Almunium Paduan," vol. 05, no. 01, pp. 10–20, 2024.
- [12] S. H. Iftikhar, A.-H. I. Mourad, J. Sheikh-Ahmad, F. Almaskari, and S. Vincent, "A Comprehensive Review on Optimal Welding Conditions for Friction Stir Welding of Thermoplastic Polymers and Their Composites," *Polymers (Basel)*, vol. 13, no. 8, p. 1208, Apr. 2021, doi: 10.3390/polym13081208.
- [13] R. K. Nath, P. Maji, and J. D. Barma, "Effect of tool rotational speed on friction stir welding of polymer using self-heated tool," *Prod. Eng.*, vol. 16, no. 5, pp. 683–690, Oct. 2022, doi: 10.1007/s11740-022-01123-0.
- [14] S. Sugiarto, M. Ma'arif, A. Wahjudi, and A. Ananto, "Analisis Mekanik Sambungan Dissimilar Friction Stir Welding Antara High Density Polyethylene Dengan Polypropylene," in *Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XXII 2024*, Depok, Indonesia: Badan Kerja Sama Teknik Mesin Indonesia, 2025, pp. 205–209. doi: 10.71452/590657.
- [15] M. H. Firmansyah and I. Iswanto, "Influence of Parameters on The Mechanical Strength of Friction Stir Welding in High Density Polyethylene," Jul. 15, 2024. doi: 10.21070/ups.5123.
- [16] M. Balaguera, H. R. Zambrano, R. J. Chamorro Coneo, J. F. Santa Marín, and J. Unfried-Silgado, "Effect of Temperature Control and Rotational and Traverse Speeds on the Mechanical Properties of Friction Stir-Welded Polypropylene Plates," *Polymers (Basel)*, vol. 16, no. 22, 2024, doi: 10.3390/polym16223110.
- [17] R. K. Nath, V. Jha, P. Maji, and J. D. Barma, "A novel double-side welding approach for friction stir

- welding of polypropylene plate,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 113, no. 3–4, pp. 691–703, 2021, doi: 10.1007/s00170-021-06602-9.
- [18] K. Panneerselvam and K. Lenin, “Parameters optimization in FSW of polypropylene based on RSM,” *Multidiscip. Model. Mater. Struct.*, vol. 11, no. 1, pp. 32–42, Jun. 2015, doi: 10.1108/MMMS-07-2013-0048.
- [19] A. Zhang and Y. Li, “Thermal Conductivity of Aluminum Alloys—A Review,” *Materials (Basel)*, vol. 16, no. 8, p. 2972, Apr. 2023, doi: 10.3390/ma16082972.
- [20] E. Hoyos and M. C. Serna, “Basic Tool Design Guidelines for Friction Stir Welding of Aluminum Alloys,” *Metals (Basel)*, vol. 11, no. 12, p. 2042, Dec. 2021, doi: 10.3390/met11122042.
- [21] M. Rezaee Hajideh, M. Farahani, S. A. D. Alavi, and N. Molla 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, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.jmapro.2017.02.018.
- [22] M. Al-Moussawi and A. J. Smith, “Defects in Friction Stir Welding of Steel,” *Metallogr. Microstruct. Anal.*, vol. 7, no. 2, pp. 194–202, Apr. 2018, doi: 10.1007/s13632-018-0438-1.
- [23] R. K. Bhushan and D. Sharma, “Investigation of mechanical properties and surface roughness of friction stir welded AA6061-T651,” *Int. J. Mech. Mater. Eng.*, vol. 15, no. 1, p. 7, Dec. 2020, doi: 10.1186/s40712-020-00119-x.
- [24] S. Eslami, P. J. Tavares, and P. M. G. P. Moreira, “Friction stir welding tooling for polymers: review and prospects,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 89, no. 5–8, pp. 1677–1690, Mar. 2018, doi: 10.1007/s00170-016-9205-0.
- [25] Y. Huang *et al.*, “Friction stir welding/processing of polymers and polymer matrix composites,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 105, pp. 235–257, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.compositesa.2017.12.005.
- [26] A. Zafar, M. Awang, and S. R. Khan, “Friction Stir Welding of Polymers: An Overview,” 2018, pp. 19–36. doi: 10.1007/978-981-10-4232-4_2.
- [27] B. Ahmad, F. Almaskari, J. Sheikh-Ahmad, S. Deveci, and K. Khan, “Thermomechanical Modeling of Material Flow and Weld Quality in the Friction Stir Welding of High-Density Polyethylene,” *Polymers (Basel)*, vol. 15, no. 15, p. 3230, Jul. 2023, doi: 10.3390/polym15153230.
- [28] S. Kilic, F. Ozturk, and M. F. Demirdogen, “A comprehensive literature review on friction stir welding: Process parameters, joint integrity, and mechanical properties,” *J. Eng. Res.*, vol. 13, no. 1, pp. 122–130, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.jer.2023.09.005.
- [29] D. Das, S. Bag, S. Pal, and A. Sharma, “Material Defects in Friction Stir Welding through Thermo-Mechanical Simulation: Dissimilar Materials with Tool Wear Consideration,” *Materials (Basel)*, vol. 16, no. 1, p. 301, Dec. 2022, doi: 10.3390/ma16010301.
- [30] S. B. A. Risky Ramadhani, Febri Budi Darsono, Aldias Bahatmaka, Kriswanto, Tegar Oki Prasdika, “Characteristics of Pin Profile Variations in Friction Stir Welding (FSW) Joints of High Density Polyethylene (HDPE) And Polypropylene (PP) on Mechanical Properties,” *J. Mech. Eng. Educ.*, vol. 10, no. 1, pp. 128–142, 2025.
- [31] F. Lambiase, H. A. Derazkola, and A. Simchi, “Friction stirwelding and friction spot stir welding processes of polymers-state of the art,” *Materials (Basel)*, vol. 13, no. 10, 2020, doi: 10.3390/ma13102291.
- [32] N. Ardiyansyah *et al.*, “Effect of Feed Rate on Shear Strength and Macrostructure of Friction Stir Welding Dissimilar High Density Polyethylene-Polypropylene Joint,” *J. Polimesin*, vol. 22, no. 4, p. 416, Sep. 2024, doi: 10.30811/jpl.v22i4.5285.