

# *The Effect of Welding Parameters in the Friction Stir Welding (FSW) Process on the Macro Structure of AA6061-T651 Material Welding*

## **[Pengaruh Parameter Pengelasan pada Proses Friction Stir Welding (FSW) terhadap Struktur Makro Pengelasan Material AA6061-T651]**

Mohammad Agil Satrio Prayugo<sup>1)</sup>, Mulyadi <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: [mulyadi@umsida.ac.id](mailto:mulyadi@umsida.ac.id)

**Abstract.** Aluminum alloys like AA6061-T651 are widely favored in automotive and manufacturing for their lightweight, strength, corrosion resistance, and thermal conductivity. Friction Stir Welding (FSW), a solid-state method, joins aluminum without filler metal, yielding joints akin to the base metal. FSW advantages include reduced spatter, porosity prevention, and cost-effectiveness. This study investigates FSW variables—tool rotation speed (765-3022 rpm) and welding speed (24-90 mm/min)—and their impact on AA6061-T651 weld macro structure. CNC milling experiments optimize parameters for stronger joints and fewer defects. Analysis reveals significant effects of tool rotation speed, shoulder and tool tilt angles, and welding speed on weld characteristics, notably Thermo-Mechanically Affected Zone (TMAZ) and Heat Affected Zone (HAZ) sizes. Precise FSW parameter adjustment is crucial for optimal weld quality, defect minimization (e.g., porosity), and meeting strength and structural integrity requirements in specific applications.

**Keywords** Friction Stir Welding, AA6061-T651, Aluminium alloys, Welding parameter, Macrostructure analysis..

**Abstrak.** Paduan aluminium AA6061-T651 banyak digunakan dalam industri otomotif dan manufaktur karena ringan, kuat, tahan korosi, dan memiliki konduktivitas termal yang baik. Friction Stir Welding (FSW), metode pengelasan solid-state, umum digunakan untuk menyambung aluminium tanpa logam pengisi, menghasilkan sambungan dengan komposisi serupa dengan logam dasar. FSW menawarkan keunggulan seperti pengurangan percikan, pencegahan porositas, dan efisiensi biaya. Penelitian ini mengeksplorasi pengaruh variabel FSW seperti kecepatan putaran pahat (765-3022 rpm) dan kecepatan pengelasan (24-90 mm/menit) terhadap struktur makro pengelasan AA6061-T651. Eksperimen menggunakan mesin penggilingan CNC untuk mengoptimalkan parameter yang meningkatkan kekuatan sambungan dan mengurangi cacat pengelasan. Hasil analisis menunjukkan bahwa pengaturan parameter seperti kecepatan putaran pahat dan kecepatan pengelasan secara signifikan mempengaruhi karakteristik hasil las, termasuk ukuran Zona Terpengaruh Termo-Mekanis (TMAZ) dan Zona Terpengaruh Panas (HAZ). Penyesuaian parameter FSW yang tepat penting untuk mencapai kualitas sambungan las yang optimal.

**Kata Kunci** – Friction Stir Welding, AA6061-T651, Paduan Aluminium, Parameter Pengelasan, Analisis Struktur Makro

## I. PENDAHULUAN

Saat ini, Bahan yang saat ini sering digunakan dalam pembuatan komponen otomotif dan dalam industri manufaktur adalah paduan aluminium. Aluminium dan campurannya sering menjadi bahan utama dalam proses manufaktur [1]. Hal ini disebabkan oleh sifat-sifat aluminium dan paduan aluminium yang mencakup bobot yang ringan, kekuatan tinggi, sifat keuletan yang baik, ketahanan terhadap korosi, serta kemampuan sebagai penghantar panas yang unggul jika dibandingkan dengan besi atau baja. Terutama, material aluminium seri AA6061 - T561, yang merupakan paduan aluminium struktural tipe 6061, juga digunakan dalam industri otomotif untuk mobil kelas atas karena ringannya yang berkontribusi pada pengurangan emisi gas rumah kaca [2].

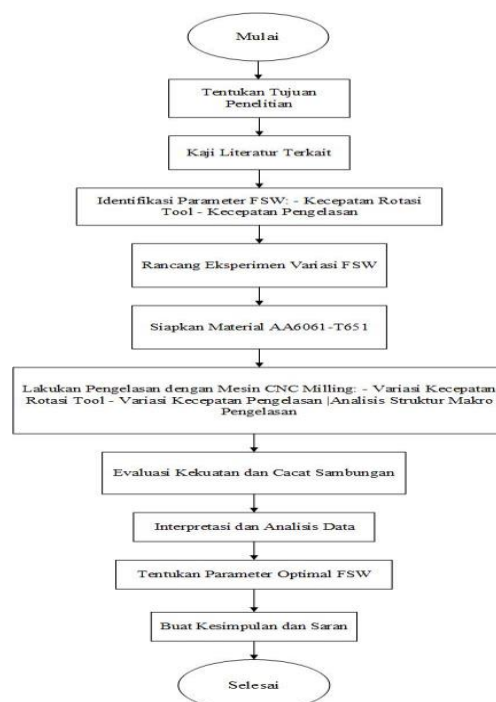
Penyambungan aluminium sering menggunakan metode Friction Stir Welding (FSW), yang merupakan suatu teknik pengelasan inovatif dan dikenal sebagai proses pengelasan yang terjadi dalam keadaan padat (solid state). Proses pengelasan FSW ini tidak memerlukan penggunaan logam pengisi, sehingga hasil penyambungan umumnya memiliki komposisi yang serupa dengan logam dasar, kecuali pada kasus penyambungan logam yang berbeda. Teknik pengelasan ini banyak digunakan dalam proses penyambungan karena dapat menghasilkan sambungan yang lebih ringan dan proses pembuatannya lebih sederhana, yang pada akhirnya mengurangi biaya yang diperlukan. Secara umum, metode FSW memiliki sejumlah keunggulan dibandingkan dengan metode pengelasan konvensional seperti pengelasan busur [3]. Friction stir welding adalah proses penyambungan material dengan kondisi solid state..Pada proses penyambungannya tidak memerlukan material tambahan atau bahan pengisi. Panas dihasilkan dari gesekan pin yang berputar dengan benda kerja[4].Dari segi proses pengelasan, ini mengurangi atau mencegah percikan api, menghindari terjadinya porositas, tidak melibatkan penggunaan gas tambahan dalam proses pengelasan,

tidak mengakibatkan perubahan yang signifikan dalam volume material, persiapan pengelasan yang cukup sederhana, serta tidak memerlukan penggunaan bahan tambahan dan tidak memiliki dampak negatif pada lingkungan. Sementara itu, sambungan yang dihasilkan dari metode pengelasan FSW menunjukkan karakteristik sambungan yang memiliki kekuatan yang baik, ketahanan terhadap korosi yang tinggi, dan sifat keuletan yang unggul [5].

Proses FSW membutuhkan perhatian yang cermat terhadap sejumlah variabel, termasuk kecepatan rotasi tool (*rotational speed*), kecepatan pengelasan (*welding speed*), kedalaman penetrasi tool (*tool deep plunge*), sudut kemiringan tool terhadap benda kerja, serta bentuk atau profil pin yang digunakan. Dengan memilih parameter FSW yang sesuai, kita dapat meningkatkan kekuatan sambungan dan mengurangi potensi terjadinya cacat pada pengelasan [6]. Kemampuan pengelasan FSW dalam menyambung material dalam keadaan padat telah mendorong penelitian dan pengembangan yang luas untuk berbagai aplikasi. FSW memungkinkan penyambungan material logam yang berbeda jenis [3]. Penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi pengaruh variasi parameter dalam proses pengelasan FSW, yaitu kecepatan rotasi tool (765, 1208, 1907, 3022 rpm), sudut bahu cekung ( $2^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $8^\circ$ ,  $11^\circ$ ), sudut kemiringan tool ( $2^\circ$ ,  $2,5^\circ$ ,  $3^\circ$ ,  $3,5^\circ$ ) kecepatan pengelasan sebesar (24, 43, 65, 90 mm/menit). Eksperimen variasi FSW dilakukan dengan menggunakan mesin CNC milling[6].

## II. METODE

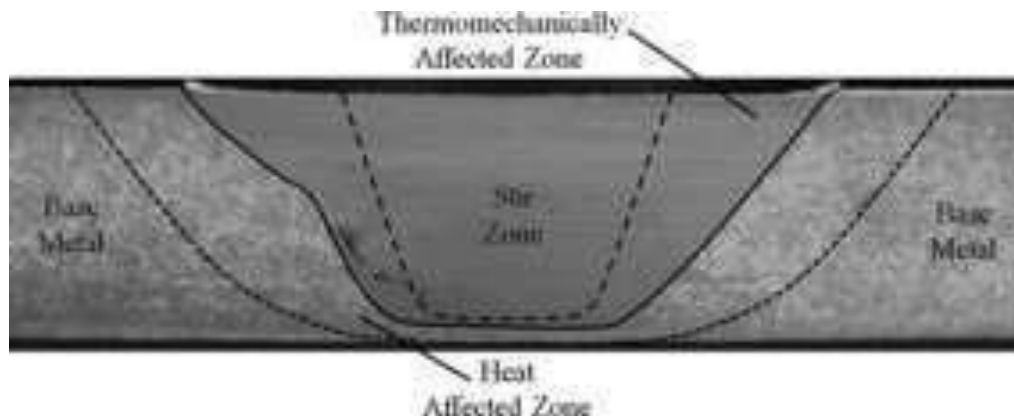
Pengujian makro adalah pengujian struktur logam dengan pembesaran 0,5 –50 kali sedangkan pengujian mikro dengan pembesaran diatas 50kali[7]. Metode penelitian digunakan untuk menyelesaikan permasalahan dan mengetahui bagaimana pengaruh parameter proses fsw pada pengelasan material aa 6061-t651[8]. Pada Gambar 1 adalah diagram alir penelitian untuk mengeksplorasi pengaruh variasi parameter dalam proses *Friction Stir Welding* (FSW) terhadap struktur makro pengelasan material AA6061-T651:



**Gambar 1.** Diagram alir penelitian

Penelitian dimulai dengan menentukan tujuan utama, yaitu mengeksplorasi pengaruh variasi parameter FSW terhadap struktur makro pengelasan material AA6061-T651[9]. Selanjutnya, kajian literatur dilakukan untuk memahami dasar teori dan metodologi terkait. Parameter penting yang diidentifikasi adalah kecepatan rotasi tool dan kecepatan pengelasan[10]. Desain eksperimen kemudian dirancang dengan variasi parameter tersebut. Material AA6061-T651 disiapkan, dan proses pengelasan dilakukan menggunakan mesin CNC milling. Struktur makro hasil pengelasan dianalisis untuk mengamati perubahan akibat variasi parameter FSW[11]. Evaluasi kekuatan sambungan dilakukan melalui uji foto makro, serta identifikasi cacat seperti porositas atau retak. Hasil analisis diinterpretasikan untuk menemukan hubungan antara parameter FSW dan kualitas pengelasan. Parameter FSW optimal ditentukan berdasarkan kombinasi yang memberikan hasil pengelasan terbaik[12]. Kesimpulan disusun, dan saran diberikan

untuk penelitian lebih lanjut atau aplikasi industri. Penelitian selesai dengan semua langkah terdokumentasi dan hasil diperoleh.



**Gambar 2.** Zona Pengelasan FSW

Bagian-bagian yang dianalisis seperti pada Gambar 2 dengan penjelasan setiap zona sebagai berikut:

1. *Base Metal* (BM), adalah bagian dari bahan dasar dimana tidak terjadi deformasi plastis dan tidak mengalami siklus termal dari tool sehingga tidak terjadi perubahan struktur mikro dan sifat mekanik selama siklus FSW[13].
2. *Heat - Affected Zone* (HAZ), posisi ini merupakan bagian yang paling dekat dengan beban las, material pada segmen ini telah mengalami siklus hangat yang menyebabkan perubahan pada mikrostruktur dan sifat mekanik material dasar, namun demikian pada ruang ini tidak ada deformitas plastis karena pengelasan.
3. *Thermomechanically Affected Zone* (TMAZ), dalam posisi ini peralatan secara plastis membentuk material dan jelas panas yang dihasilkan selama interaksi pengelasan juga mempengaruhi material. Pada material aluminium panas ini dimungkinkan untuk membuat regangan plastis tanpa siklus rekristalisasi. Juga, biasanya ada batas yang tidak salah lagi yang mengenali wilayah rekristalisasi (bagian las) dan wilayah TMAZ yang terpelintir[14].
4. *Weld Nugget* (WN), Bagian khusus yang direkristalisasi seluruhnya atau dapat disebut sebagai Zona Campuran. Posisi ini merupakan wilayah yang dihasilkan bersama karena pengembangan perangkat keras.

Desain eksperimen dan variasi parameter proses FSW yang digunakan adalah seperti pada Tabel 1 berikut ini:

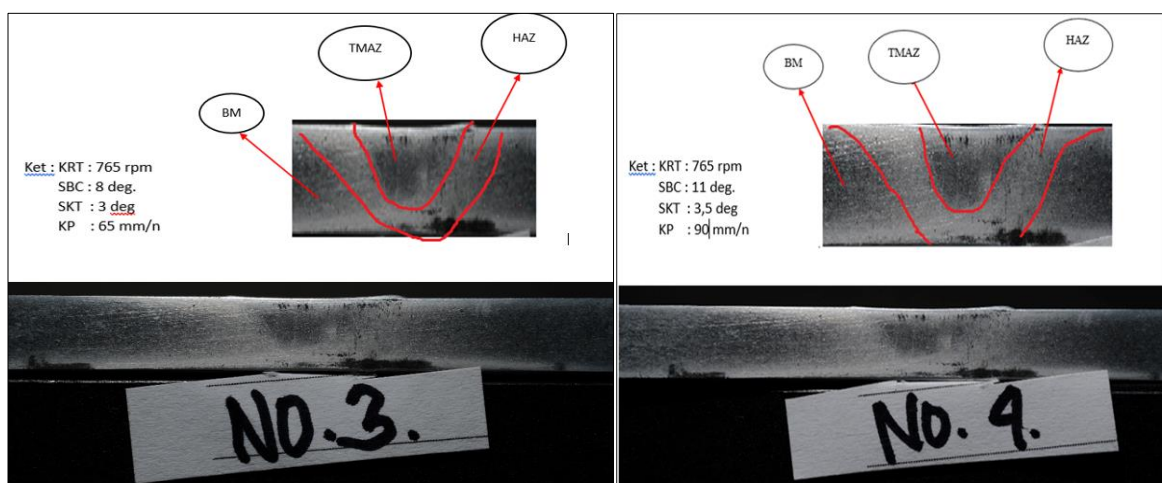
**Tabel 1.** Parameter Proses FSW

| No | Kecepatan Rotasi Tool (rpm) | Sudut Bahu Cekung (deg.) | Sudut Kemiringan Tool (deg.) | Kecepatan Pengelasan (mm/min) |
|----|-----------------------------|--------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| 1  | 765                         | 2                        | 2                            | 24                            |
| 2  | 765                         | 5                        | 2,5                          | 43                            |
| 3  | 765                         | 8                        | 3                            | 65                            |
| 4  | 765                         | 11                       | 3,5                          | 90                            |
| 5  | 1208                        | 2                        | 2,5                          | 65                            |
| 6  | 1208                        | 5                        | 2                            | 90                            |
| 7  | 1208                        | 8                        | 3,5                          | 24                            |
| 8  | 1208                        | 11                       | 3                            | 43                            |
| 9  | 1907                        | 2                        | 3                            | 90                            |
| 10 | 1907                        | 5                        | 3,5                          | 65                            |
| 11 | 1907                        | 8                        | 2                            | 43                            |
| 12 | 1907                        | 11                       | 2,5                          | 24                            |
| 13 | 3022                        | 2                        | 3,5                          | 43                            |

|    |      |    |     |    |
|----|------|----|-----|----|
| 14 | 3022 | 5  | 3   | 24 |
| 15 | 3022 | 8  | 2,5 | 90 |
| 16 | 3022 | 11 | 2   | 65 |

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Proses analisis struktur makro hasil pengelasan dimulai dengan mengamati perubahan yang terjadi akibat variasi parameter FSW menggunakan teknik mikroskopi optik. Pengamatan ini bertujuan untuk mengidentifikasi dan mengevaluasi karakteristik makroskopik dari sambungan las, termasuk distribusi butir, homogenitas, dan adanya cacat seperti porositas atau retak. Dengan menggunakan mikroskopi optik, detail visual dari struktur butir dan batas butir dapat dianalisis secara mendalam, memungkinkan peneliti untuk memahami bagaimana setiap variasi parameter mempengaruhi integritas dan kualitas sambungan. Analisis ini merupakan langkah krusial untuk menentukan parameter optimal yang menghasilkan struktur makro terbaik pada material AA6061-T651, sehingga memastikan sambungan yang kuat dan bebas cacat. Analisis untuk masing-masing spesimen yang dipilih adalah sebagai berikut:



Gambar 3. Hasil uji foto makro spesimen nomor 3 dan nomor 4

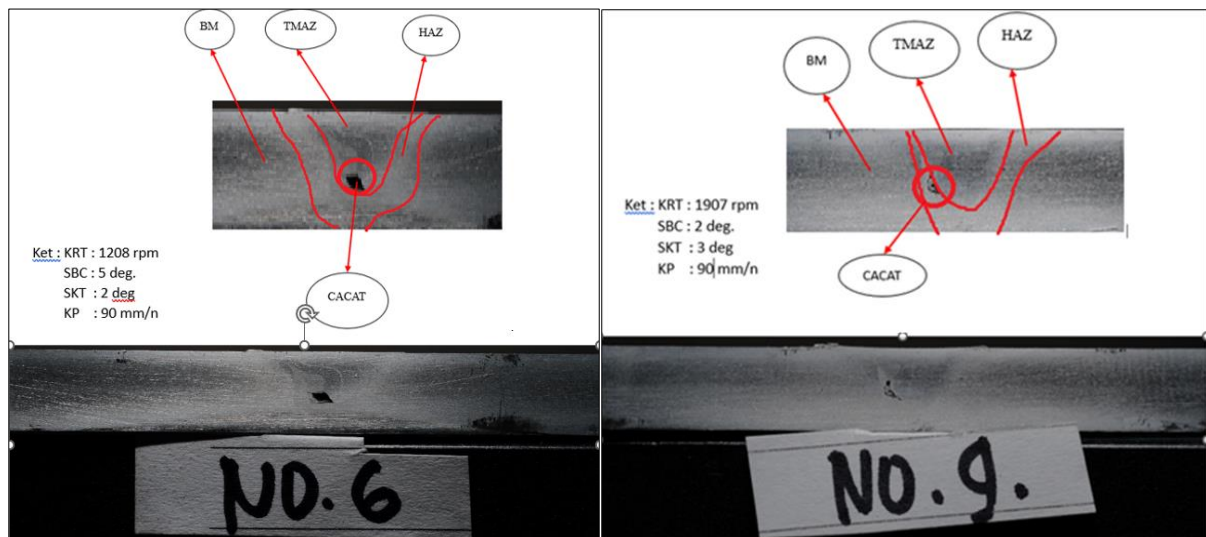
Hasil proses FSW material AA6061-T651 pada Gambar 3 nomor 3 dengan parameter kecepatan rotasi tool 765 rpm, sudut bahu cekung  $8^\circ$ , sudut kemiringan tool  $3^\circ$ , dan kecepatan pengelasan 65 mm/min, zona Thermo-Mechanically Affected Zone (TMAZ) dan Heat Affected Zone (HAZ) cenderung menyempit karena beberapa faktor. Kecepatan rotasi yang lebih rendah menghasilkan panas yang lebih sedikit, sehingga distribusi panas menjadi lebih terbatas. Sudut bahu cekung yang optimal membantu dalam konsentrasi panas dan material di sekitar pin tanpa menyebarkannya terlalu luas. Kemiringan tool sebesar  $3^\circ$  mempengaruhi aliran material dan distribusi panas secara efisien, dan kecepatan pengelasan yang lebih tinggi mengurangi waktu paparan material terhadap panas. Kombinasi parameter-parameter ini menghasilkan distribusi panas yang lebih terkendali dan aliran material yang optimal, sehingga zona TMAZ dan HAZ menjadi lebih sempit.

Dalam proses pada Gambar 3 nomor 4 dengan parameter seperti kecepatan rotasi tool 765 rpm, sudut bahu cekung  $11^\circ$ , sudut kemiringan tool  $3,5^\circ$ , dan kecepatan pengelasan 90 mm/menit, terjadi fenomena di mana zona Thermo-Mechanically Affected Zone (TMAZ) cenderung menyempit sementara zona Heat Affected Zone (HAZ) sedikit melebar. Kecepatan rotasi yang moderat membantu dalam mengontrol distribusi panas di sekitar daerah pengelasan, menghasilkan TMAZ yang lebih terkonsentrasi. Sudut bahu cekung yang lebih besar meningkatkan interaksi tool dengan material, sehingga memperluas zona HAZ yang terpengaruh oleh panas. Sudut kemiringan tool yang sedang membantu dalam aliran material yang lebih baik, sementara kecepatan pengelasan yang tinggi menghasilkan waktu paparan panas yang lebih singkat, menyebabkan TMAZ lebih sempit tetapi HAZ lebih luas akibat distribusi panas yang lebih besar dalam waktu yang singkat. Kombinasi parameter ini penting untuk menentukan kualitas dan kekuatan sambungan dalam aplikasi FSW pada material AA6061-T651.

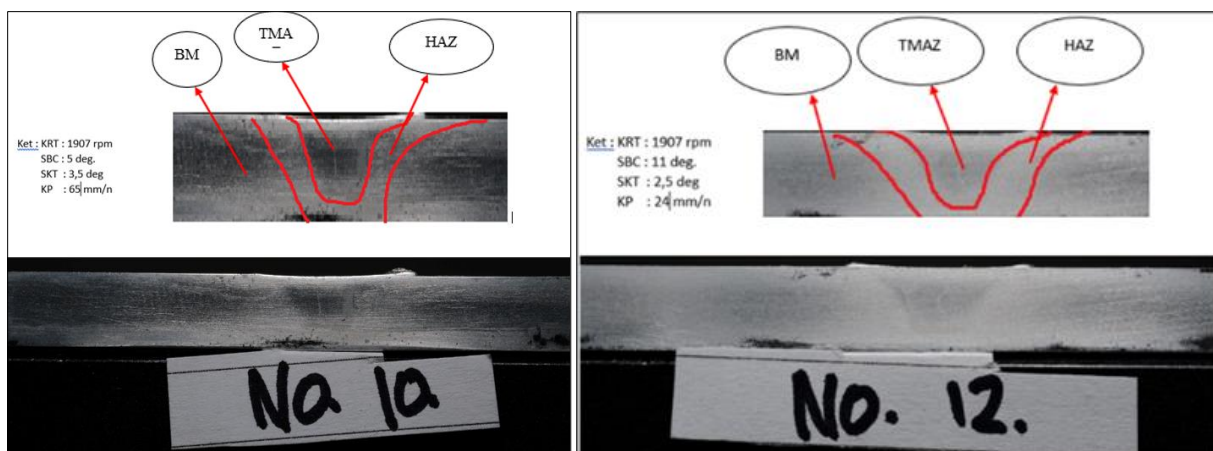
Hasil proses FSW pada Gambar 4 nomor 6 dengan parameter kecepatan rotasi tool 1208 rpm, sudut bahu cekung  $5^\circ$ , sudut kemiringan tool  $2^\circ$ , dan kecepatan pengelasan 90 mm/menit, fenomena terjadi di mana zona Thermo-Mechanically Affected Zone (TMAZ) dan Heat Affected Zone (HAZ) menyempit, tetapi terdapat juga keberadaan cacat las. Kecepatan rotasi tool yang tinggi seperti 1208 rpm menghasilkan panas yang lebih besar di daerah pengelasan, memungkinkan untuk TMAZ dan HAZ yang lebih sempit karena distribusi panas yang efisien. Sudut bahu cekung yang rendah ( $5^\circ$ ) mengurangi interaksi tool dengan material, yang bisa mengurangi zona HAZ yang

terpengaruh. Sudut kemiringan tool yang moderat ( $2^\circ$ ) membantu aliran material yang baik di sekitar pin. Namun, cacat las dapat terjadi karena kecepatan pengelasan yang tinggi (90 mm/menit) mungkin tidak memberikan waktu yang cukup untuk pengadukan material secara optimal atau pengendapan gas yang terperangkap selama proses. Cacat tersebut bisa berupa porositas atau retakan akibat kurangnya waktu untuk mengeluarkan gas selama solidifikasi logam cair. Penyesuaian parameter FSW yang lebih tepat diperlukan untuk mengurangi kemungkinan terjadinya cacat las sambil mempertahankan karakteristik TMAZ dan HAZ yang diinginkan.

Pada Gambar 4 nomor 9 dengan parameter kecepatan rotasi tool 1907 rpm, sudut bahu cekung  $2^\circ$ , sudut kemiringan tool  $3^\circ$ , dan kecepatan pengelasan 90 mm/menit, terjadi sejumlah fenomena yang mempengaruhi zona-zona terbentuk dan adanya cacat las. Kecepatan rotasi tool yang tinggi seperti 1907 rpm meningkatkan energi kinetik pada tool, yang berkontribusi pada peningkatan panas di zona pengelasan. Hal ini dapat menyebabkan zona Thermo-Mechanically Affected Zone (TMAZ) yang lebih sempit karena panas yang terlokalisasi dengan baik. Sudut bahu cekung yang rendah ( $2^\circ$ ) mengurangi distribusi panas yang terlalu luas, yang mungkin menghasilkan Heat Affected Zone (HAZ) yang sangat sempit. Sudut kemiringan tool yang moderat ( $3^\circ$ ) membantu dalam aliran material di sekitar pin, tetapi kecepatan pengelasan yang tinggi (90 mm/menit) mungkin menyebabkan cacat las seperti porositas atau retakan. Penggunaan kecepatan pengelasan yang tinggi dapat menghasilkan pendinginan material yang lebih cepat, meningkatkan kemungkinan terbentuknya cacat seperti porositas karena gas yang terperangkap atau tegangan yang tidak merata selama proses pengelasan. Diperlukan penyesuaian parameter yang lebih teliti untuk mengoptimalkan proses FSW dan mengurangi kemungkinan terjadinya cacat las, sambil tetap mempertahankan karakteristik TMAZ dan HAZ yang diinginkan untuk material yang digunakan.



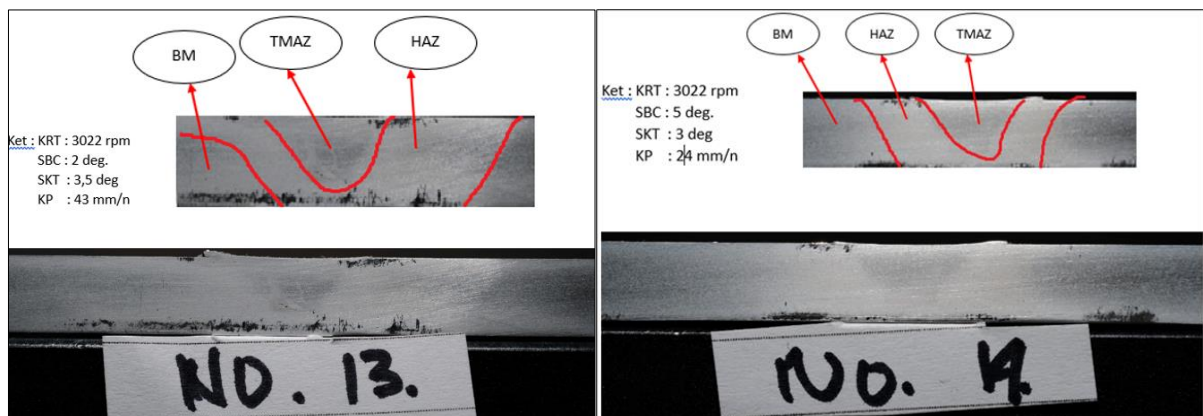
Gambar 4. Hasil uji foto makro spesimen nomor 6 dan nomor 9



Gambar 5. Hasil uji foto makro spesimen nomor 10 dan nomor 12

Pada Gambar 5 nomor 10 dengan parameter kecepatan rotasi tool 1907 rpm, sudut bahu cekung  $5^\circ$ , sudut kemiringan tool  $3,5^\circ$ , dan kecepatan pengelasan 65 mm/menit, terjadi sejumlah perubahan dalam pembentukan zona-zona termal dan cacat las. Kecepatan rotasi tool yang tinggi seperti 1907 rpm menghasilkan energi kinetik yang cukup untuk menghasilkan panas yang lebih baik di sekitar zona pengelasan. Hal ini berkontribusi pada pembentukan Thermo-Mechanically Affected Zone (TMAZ) yang lebih sempit karena panas yang terlokalisasi dengan baik. Sudut bahu cekung yang sedang ( $5^\circ$ ) membantu dalam mengendalikan distribusi panas, yang dapat menghasilkan Heat Affected Zone (HAZ) bagian atas yang sangat menyempit. Sudut kemiringan tool yang moderat ( $3,5^\circ$ ) mendukung aliran material yang baik di sekitar pin. Kecepatan pengelasan yang lebih rendah (65 mm/menit) memungkinkan waktu yang lebih optimal untuk pengadukan material tanpa terlalu cepat atau lambat, yang dapat mengurangi kemungkinan terbentuknya cacat las seperti porositas atau retakan. Kombinasi parameter ini menghasilkan hasil pengelasan yang lebih baik secara keseluruhan, dengan zona TMAZ dan HAZ yang diinginkan serta minimnya cacat las dibandingkan dengan parameter sebelumnya, menunjukkan bahwa pengaturan yang lebih tepat dari parameter FSW dapat menghasilkan sambungan yang lebih berkualitas.

Sedangkan pada Gambar 5 nomor 12 dengan parameter kecepatan rotasi tool 1907 rpm, sudut bahu cekung  $11^\circ$ , sudut kemiringan tool  $2,5^\circ$ , dan kecepatan pengelasan 24 mm/menit, terjadi perubahan yang dapat dijelaskan melalui pengaruh masing-masing parameter terhadap zona-zona termal dalam proses pengelasan. Kecepatan rotasi tool yang tinggi seperti 1907 rpm memberikan energi kinetik yang cukup untuk menghasilkan panas yang intens di daerah pengelasan. Hal ini menyebabkan zona Thermo-Mechanically Affected Zone (TMAZ) yang sedikit menyempit karena panas yang terlokalisasi dengan baik. Sudut bahu cekung yang besar ( $11^\circ$ ) dapat menghasilkan interaksi yang lebih intens antara tool dan material, yang mempengaruhi distribusi panas. Hal ini mungkin menyebabkan Heat Affected Zone (HAZ) bagian atas yang sedikit melebar karena pemaparan material yang lebih luas terhadap panas. Sudut kemiringan tool yang moderat ( $2,5^\circ$ ) membantu dalam mengarahkan aliran material di sekitar pin. Kecepatan pengelasan yang rendah (24 mm/menit) memberikan lebih banyak waktu untuk pengadukan material, mengurangi potensi terbentuknya cacat las seperti porositas atau retakan. Kombinasi parameter ini mempengaruhi secara langsung karakteristik termal dan mekanis dari hasil pengelasan, dan penyesuaian yang tepat dari parameter FSW dapat menghasilkan sambungan dengan kualitas yang optimal sesuai dengan kebutuhan aplikasi.

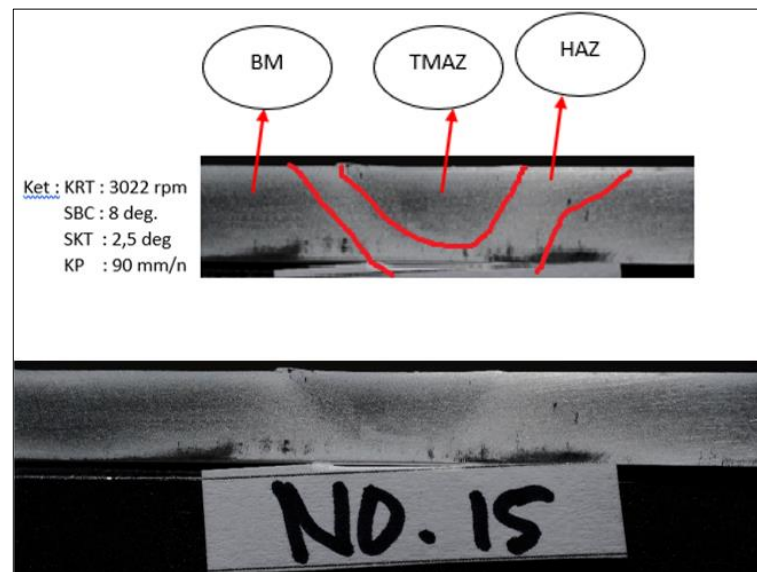


Gambar 6. Hasil uji foto makro spesimen nomor 13 dan nomor 14

Pada Gambar 6 nomor 13 dengan parameter kecepatan rotasi tool 3022 rpm, sudut bahu cekung  $2^\circ$ , sudut kemiringan tool  $3,5^\circ$ , dan kecepatan pengelasan 43 mm/menit, terjadi fenomena di mana zona Thermo-Mechanically Affected Zone (TMAZ) dan Heat Affected Zone (HAZ) menyempit. Kecepatan rotasi tool yang tinggi seperti 3022 rpm memberikan energi kinetik yang besar pada tool, menghasilkan panas yang tinggi di sekitar zona pengelasan. Hal ini menyebabkan TMAZ yang menyempit karena panas yang terlokalisasi dengan baik di sekitar pin pengelasan. Sudut bahu cekung yang rendah ( $2^\circ$ ) membantu dalam mengontrol distribusi panas yang terlalu luas, yang dapat menghasilkan HAZ yang ikut menyempit. Sudut kemiringan tool yang moderat ( $3,5^\circ$ ) mendukung aliran material yang baik di sekitar pin. Kecepatan pengelasan yang sedang (43 mm/menit) memberikan waktu yang memadai untuk proses pengadukan material tanpa terlalu cepat atau lambat, mengurangi kemungkinan terbentuknya cacat las seperti porositas atau retakan. Kombinasi parameter ini secara efektif menghasilkan hasil pengelasan dengan karakteristik TMAZ dan HAZ yang diinginkan, serta meminimalkan kemungkinan terjadinya cacat las, menjadikannya sebagai pilihan yang baik untuk aplikasi di mana kualitas sambungan sangat penting.

Sedangkan pada Gambar 6 nomor 14 dengan parameter kecepatan rotasi tool 3022 rpm, sudut bahu cekung  $5^\circ$ , sudut kemiringan tool  $3^\circ$ , dan kecepatan pengelasan 24 mm/menit, terdapat perubahan yang dapat dijelaskan melalui pengaruh masing-masing parameter terhadap zona-zona termal dalam pengelasan. Kecepatan rotasi tool yang tinggi

seperti 3022 rpm memberikan energi kinetik yang tinggi pada tool, menghasilkan panas yang intens di sekitar zona pengelasan. Hal ini dapat menyebabkan Thermo-Mechanically Affected Zone (TMAZ) yang sedikit menyempit karena panas yang terlokalisasi dengan baik di sekitar pin pengelasan. Namun, sudut bahu cekung yang lebih besar ( $5^\circ$ ) dapat memperluas interaksi antara tool dan material, yang meningkatkan zona Heat Affected Zone (HAZ) yang melebar di bagian atas pengelasan karena distribusi panas yang lebih luas. Sudut kemiringan tool yang moderat ( $3^\circ$ ) membantu dalam mengarahkan aliran material di sekitar pin, tetapi kecepatan pengelasan yang rendah (24 mm/menit) memberikan lebih banyak waktu untuk pengadukan material tanpa menghasilkan energi panas yang berlebihan. Kombinasi parameter ini menghasilkan karakteristik termal yang menciptakan TMAZ yang sempit dan HAZ yang melebar, yang dapat menjadi pertimbangan dalam memilih parameter untuk memenuhi persyaratan kekuatan dan integritas sambungan las sesuai dengan aplikasi yang diinginkan.



**Gambar 7.** Hasil uji foto makro spesimen nomor 15

Pada Gambar 7 nomor 15 dengan parameter kecepatan rotasi tool 3022 rpm, sudut bahu cekung  $8^\circ$ , sudut kemiringan tool  $2,5^\circ$ , dan kecepatan pengelasan 90 mm/menit, terjadi fenomena di mana zona Thermo-Mechanically Affected Zone (TMAZ) dan Heat Affected Zone (HAZ) mengalami perluasan tanpa adanya cacat las. Kecepatan rotasi tool yang tinggi seperti 3022 rpm memberikan energi kinetik yang besar pada tool, menghasilkan panas yang tinggi di sekitar zona pengelasan. Hal ini dapat menyebabkan TMAZ dan HAZ yang melebar karena distribusi panas yang lebih luas di sekitar daerah pengelasan. Sudut bahu cekung yang cukup besar ( $8^\circ$ ) memperluas interaksi antara tool dan material, yang juga berkontribusi pada zona HAZ yang lebih luas. Sudut kemiringan tool yang moderat ( $2,5^\circ$ ) membantu dalam mengarahkan aliran material di sekitar pin dengan baik. Kecepatan pengelasan yang moderat (90 mm/menit) memberikan waktu yang cukup untuk proses pengadukan material tanpa terlalu cepat atau lambat, sehingga tidak ada cacat las yang terbentuk. Kombinasi parameter ini secara keseluruhan menciptakan kondisi yang menghasilkan TMAZ dan HAZ yang melebar tanpa cacat las, yang mungkin sesuai dengan kebutuhan aplikasi yang memerlukan sambungan yang kuat dan integritas yang baik secara mekanis.

#### IV. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil analisis struktur makro dari proses Friction Stir Welding (FSW) pada material AA6061-T651 dengan variasi parameter yang berbeda, dapat disimpulkan bahwa parameter seperti kecepatan rotasi tool, sudut bahu cekung, sudut kemiringan tool, dan kecepatan pengelasan mempengaruhi secara signifikan karakteristik sambungan las. Pada umumnya, kecepatan rotasi tool yang tinggi cenderung menghasilkan TMAZ yang lebih sempit dan HAZ yang lebih luas, karena energi kinetik yang tinggi pada tool menghasilkan panas yang intens di sekitar daerah pengelasan. Sudut bahu cekung dan sudut kemiringan tool juga berperan dalam mengontrol distribusi panas dan aliran material di sekitar pin pengelasan, yang secara langsung mempengaruhi ukuran dan karakter zona TMAZ serta HAZ. Kecepatan pengelasan yang tinggi cenderung mempercepat proses pengelasan, tetapi dapat meningkatkan risiko terbentuknya cacat las seperti porositas atau retakan, terutama saat kombinasi dengan kecepatan rotasi tool yang tinggi.

Secara spesifik, parameter-parameter seperti kecepatan rotasi tool 3022 rpm dengan sudut bahu cekung  $8^\circ$ , sudut kemiringan tool  $2,5^\circ$ , dan kecepatan pengelasan 90 mm/menit menghasilkan TMAZ dan HAZ yang melebar tanpa

adanya cacat las yang signifikan. Kondisi ini mungkin cocok untuk aplikasi yang membutuhkan kekuatan mekanis dan integritas sambungan yang tinggi. Di sisi lain, penggunaan kecepatan rotasi tool yang lebih rendah seperti 765 rpm dengan sudut bahu cekung  $11^\circ$ , sudut kemiringan tool  $3,5^\circ$ , dan kecepatan pengelasan 90 mm/menit menghasilkan TMAZ yang lebih sempit dan HAZ yang sedikit melebar. Meskipun demikian, perlu diperhatikan bahwa terdapat risiko terbentuknya cacat las tertentu akibat kombinasi parameter yang kurang optimal, seperti yang terlihat pada kasus dengan kecepatan rotasi tool 1208 rpm.

Berdasarkan temuan ini, beberapa saran dapat diberikan untuk optimalisasi proses FSW pada material AA6061-T651. Pertama, pengaturan parameter seperti kecepatan rotasi tool dan kecepatan pengelasan harus dipilih dengan cermat untuk meminimalkan risiko terbentuknya cacat las, sambil mempertahankan karakteristik TMAZ dan HAZ yang diinginkan. Kedua, penggunaan sudut bahu cekung yang optimal dapat membantu dalam mengendalikan distribusi panas dan aliran material, sehingga mempengaruhi ukuran zona pengaruh termal dengan lebih efektif. Langkah-langkah ini penting untuk memastikan bahwa sambungan las yang dihasilkan memenuhi standar kekuatan dan kualitas yang dibutuhkan untuk aplikasi otomotif dan manufaktur yang kritis terhadap integritas struktural. Sumber referensi Mulyadi DKK (2023) [15]

### UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih yang tulus kepada kedua orang tua saya dan Bapak/Ibu Dosen atas dukungan, kasih sayang, dan bimbingan yang telah menjadi sumber kekuatan selama proses penelitian ini. Tanpa dukungan dan pengorbanan mereka, saya tidak akan bisa mencapai sejauh ini. Saya juga berterima kasih kepada teman-teman M19 kelas B1 yang selalu ada untuk saya, baik dalam suka maupun duka. Kebersamaan di kelas, diskusi, dan momen-momen menyenangkan yang kita bagi bersama telah membuat perjalanan akademik ini semakin berarti. Tak lupa, terima kasih kepada teman-teman Asisten Lab Teknik Mesin yang telah memberikan dukungan teknis dan bimbingan selama proses penelitian ini. Kolaborasi dengan kalian telah memperkaya pengalaman saya. Terakhir, kepada teman-teman HIMAMEGMA, terima kasih atas persahabatan dan solidaritas kalian. Kehangatan dalam organisasi kita menjadi tempat di mana saya bisa berbagi pengalaman dan belajar bersama. Terima kasih kepada semua yang telah berkontribusi dan mendukung saya dalam perjalanan penelitian ini. Saya berharap kita bisa terus saling mendukung dan menjaga hubungan baik ini. Terima kasih kepada semuanya.

### REFERENSI

- [1] A. Sudrajat and J. Rotor, "ANALISIS SIFAT MEKANIK HASIL PENGELASAN ALUMINIUM AA 1100 DENGAN METODE FRICTION STIR WELDING (FSW) Angger Sudrajat F.P. 1 , Sumarji 2 , Mahros Darsin 3," vol. 5, pp. 8–17, 2012.
- [2] I. Guzmán, E. Granda, J. Acevedo, A. Martínez, Y. Dávila, and R. Velázquez, "Comparative in mechanical behavior of 6061 aluminum alloy welded by pulsed GMAW with different filler metals and heat treatments," *Materials (Basel)*, vol. 12, no. 24, pp. 1–14, 2019, doi: 10.3390/ma1224157.
- [3] S. Umam, "Effect of Chisel Speed on Friction Stir Welding of Non-Similar Metals," pp. 51–55, 2017.
- [4] M. A. I. Muslim and Iswanto, "Pengaruh Parameter Pengelasan Pada Friction Stir Welding Terhadap Sifat Mekanik Polimer Jenis Polyethylene," *Progr. Stud. Tek. Mesin, Univ. Muhammadiyah Sidoarjo*, pp. 1–9, 2023.
- [5] P. Pratisna *et al.*, "Sifat Fisik dan Mekanik Sambungan Las Friction Stir Welding (FSW) AA 5083 dengan Variasi Bentuk dan Kecepatan Putar Probe Pada Konstruksi Kapal," *Sekol. Tinggi Teknol. Nas. Yogyakarta*, vol. 396, 2016.
- [6] I. Romadhona, "Studi Pengelasan Friction Stir Welding (FSW) Pada AA-1100 dengan Fe Menggunakan Variasi Feedrate 25 mm/menit, 30 mm/menit, dan 40 mm/menit," 2018, [Online]. Available: [http://eprints.ums.ac.id/id/eprint/61722%0Ahttp://eprints.ums.ac.id/61722/7/NASKAH\\_PUBLIKASI.pdf](http://eprints.ums.ac.id/id/eprint/61722%0Ahttp://eprints.ums.ac.id/61722/7/NASKAH_PUBLIKASI.pdf)
- [7] T. Cahyono and P. H. Tjahjanti, "Analisa Pengelasan Tungsten Inert Gas (TIG) pada Material Titanium (Ti-6Al-4V)," *Innov. Technol. Methodical Res. J.*, vol. 3, no. 2, pp. 1–13, 2024, doi: 10.47134/innovative.v3i2.104.
- [8] D. F. Rahmadan, "Confirmation Experiment Of Friction Stir Welding Process On Aluminum Alloy Aa 6061-T651 On Impact Strength And Vickers Hardness [ Eksperimen Konfirmasi Proses Friction Stir Welding Pada Material Aluminium Alloy Aa 6061-T651 Terhadap Kekuatan Impact Dan Ha," pp. 1–16.
- [9] D. S. Pamuji *et al.*, "Efek Parameter Pengelasan terhadap Sifat Mekanik dan Struktur Mikro Sambungan Aluminium AA6061 dengan Proses Friction Stir Welding," hal. 424–435.
- [10] Wartono dan H. Kuntara, "Pengaruh Putaran Tools Terhadap Struktur Mikro Dan Sifat Mekanis Sambungan Friction Stir Welding Pada Aluminium Paduan 6061 Wartono, Hasta Kuntara," *Sekolah Tinggi Teknologi Nasional, Yogyakarta*, hal. 1039–1044, 2017, [Daring]. Tersedia pada:



- <https://journal.itny.ac.id/index.php/ReTII/article/view/386>.
- [11] W. Fsw, T. Sifat, M. Dan, M. Pada, dan A. Paduan, *PENGARUH KECEPATAN FEEDRATE FRICTION STIR*, no. November 2021. 2024.
  - [12] I. Helmi dan T. Tarmizi, "Pengaruh Bentuk Pin terhadap Sifat Mekanik Aluminium 5083 – H112 Hasil Proses Friction Stir Welding," *Jurnal Riset Teknologi Industri*, vol. 11, no. 1, hal. 43, 2017, doi: 10.26578/jrti.v11i1.2163.
  - [13] J. a Mercier and D. Savitsky, "AD-764 958 Resistance Of Transom-Stern Craft In The Pre-Planing Regime," 1973.
  - [14] Fadilah R, Widyaputra G, Studi P, Mesin T, Teknik F, Buana UM. Analisis kekuatan tarik dan struktur mikro material komposit pada body mobil listrik prosoe kmhe 2019 1. 2020;09(2).
  - [15] Mulyadi, R. Firdaus, and R. S. Untari, "Optimization of Friction Stir Welding Parameters for AA6061-T651 Aluminum Alloy: Defect Analysis and Process Improvement," *Acad. Open*, vol. 8, no. 1, pp. 1–13, 2023, doi: 10.21070/acopen.8.2023.6665.

**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.*