

SKRIPSI AGIL.docx

by Risalatus.19077@mhs.unesa.ac.id 1

Submission date: 03-Jul-2024 01:03PM (UTC+0400)

Submission ID: 2411996591

File name: SKRIPSI_AGIL.docx (3.31M)

Word count: 3926

Character count: 24837

4 The Effect of Rotation Speed and Welding Speed in the Friction Stir Welding (FSW) Process on the Macro Structure of AA6061-T651 Material Welding

[Pengaruh Kecepatan Rotasi dan Kecepatan Pengelasan pada Proses Friction Stir Welding (FSW) terhadap Struktur Makro Pengelasan Material AA6061-T651]

Mohammad Agil Satrio Prayugo¹⁾, Mulyadi^{*2)}

^{1,2)}Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

*Email Penulis Korespondensi: mulyadi@umsida.ac.id

2 Abstract

Aluminum alloys, particularly AA6061-T651, are widely used in automotive and manufacturing industries due to their lightweight, strong, corrosion-resistant properties, and excellent thermal conductivity. Aluminum joining is typically done using Friction Stir Welding (FSW), a solid-state welding method that does not require filler metal, producing joints with a composition similar to the base metal. FSW offers several advantages over conventional welding methods, including reduced spatter, prevention of porosity, and cost savings. This technique yields joints with good strength, corrosion resistance, and toughness. This study explores the influence of FSW parameter variations, such as tool rotation speed (765, 1208, 1907, 3022 rpm) and welding speed (24, 43, 65, 90 mm/min), on the macrostructure of AA6061-T651 welding. Experiments were conducted using a CNC milling machine to determine optimal parameters that enhance joint strength and reduce welding defects. Based on the macrostructure analysis results of the FSW process on AA6061-T651 material with varied parameters, it can be concluded that adjusting FSW parameters such as tool rotation speed, shoulder angle, tool tilt angle, and welding speed significantly affects the characteristics of the weld joint. Higher tool rotation speeds tend to result in narrower Thermo-Mechanically Affected Zones (TMAZ) and wider Heat Affected Zones (HAZ), whereas lower parameter combinations can lead to wider TMAZ and narrower HAZ. Proper adjustment of FSW parameters is crucial for achieving optimal weld joint quality, minimizing welding defects such as porosity or cracks, and meeting the strength and structural integrity requirements for specific applications.

Keywords: Friction Stir Welding, AA6061-T651, Aluminum alloys, Welding parameters, Macrostructure analysis.

Abstrak

Alumium, khususnya AA6061-T651, banyak digunakan dalam industri otomotif dan manufaktur karena sifatnya yang ringan, kuat, tahan korosi, dan konduktivitas termal yang sangat baik. Penyambungan aluminium biasanya dilakukan menggunakan Friction Stir Welding (FSW), suatu metode pengelasan solid-state yang tidak memerlukan logam pengisi, menghasilkan sambungan dengan komposisi yang mirip dengan logam dasar. FSW menawarkan beberapa keunggulan dibandingkan metode pengelasan konvensional, termasuk pengurangan percikan, pencegahan porositas, dan penghematan biaya. Teknik ini menghasilkan sambungan dengan kekuatan, ketahanan korosi, dan ketangguhan yang baik. Penelitian ini mengeksplorasi pengaruh variasi parameter FSW seperti kecepatan putaran pahat (765, 1208, 1907, 3022 rpm) dan kecepatan pengelasan (24, 43, 65, 90 mm/menit), terhadap struktur makro pengelasan AA6061-T651. Eksperimen dilakukan dengan menggunakan mesin penggilingan CNC untuk menentukan parameter optimal yang meningkatkan kekuatan sambungan dan mengurangi cacat pengelasan. Berdasarkan hasil analisis struktur makro proses FSW pada material AA6061-T651 dengan parameter yang divariasikan, dapat disimpulkan bahwa pengaturan parameter FSW seperti kecepatan putaran pahat, sudut bahu, sudut kemiringan pahat, dan kecepatan pengelasan berpengaruh signifikan terhadap karakteristik hasil las. persendian. Kecepatan putaran pahat yang lebih tinggi cenderung menghasilkan Zona Terpengaruh Termo-Mekanis (TMAZ) yang lebih sempit dan Zona Terpengaruh Panas (HAZ) yang lebih luas, sedangkan kombinasi parameter yang lebih rendah dapat menghasilkan TMAZ yang lebih luas dan HAZ yang lebih sempit. Penyesuaian parameter FSW yang tepat

sangat penting untuk mencapai kualitas sambungan las yang optimal, meminimalkan cacat pengelasan seperti porositas atau retakan, dan memenuhi persyaratan kekuatan dan integritas struktural untuk aplikasi tertentu.

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

I. PENDAHULUAN

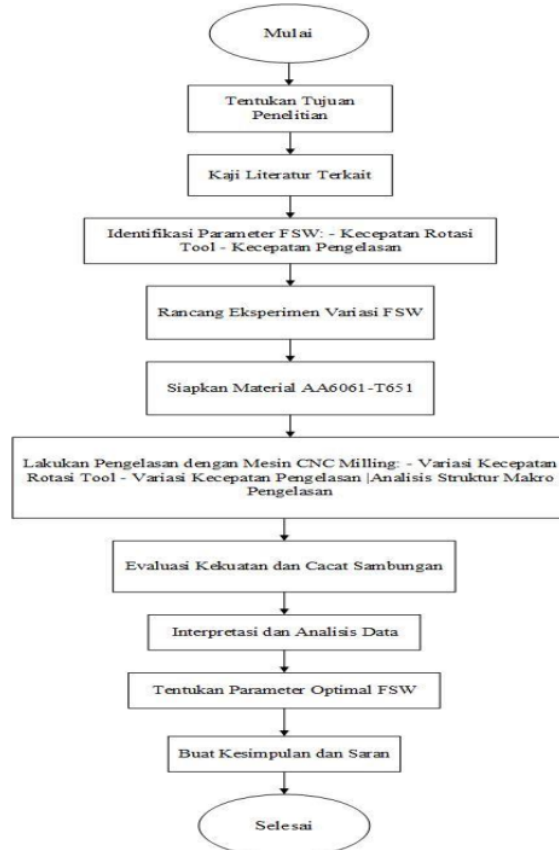
Saat ini, Bahan yang saat ini sering digunakan dalam pembuatan komponen otomotif dan dalam industri manufaktur adalah paduan aluminium. Aluminium dan campurannya sering menjadi bahan utama dalam proses manufaktur [1]. Hal ini disebabkan oleh sifat-sifat aluminium dan paduan aluminium yang mencakup bobot 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]. 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 [4].

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 [5]. 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) dan kecepatan pengelasan sebesar (24, 43, 65, 90 mm/menit). Eksperimen variasi FSW dilakukan dengan menggunakan mesin CNC milling[6].

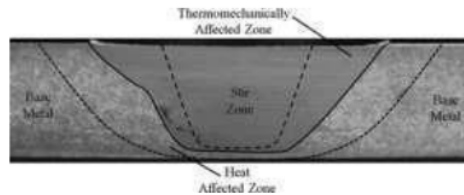
II. METODE

Pada Gambar 2.1 adalah diagram alir penelitian untuk mengeksplorasi pengaruh variasi parameter dalam proses *Friction Stir Welding* (FSW) terhadap struktur makro pengelasan material AA6061-T651:



Gambar 2.1 Diagram alir penelitian

Penelitian dimulai dengan menentukan tujuan utama, yaitu mengeksplorasi pengaruh variasi parameter FSW terhadap struktur makro pengelasan material AA6061-T651[7]. Selanjutnya, kajian literatur dilakukan untuk memahami dasar teori dan metodologi terkait. Parameter penting yang diidentifikasi adalah kecepatan rotasi tool dan kecepatan pengelasan[8]. 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. 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[9]. Kesimpulan disusun, dan saran diberikan untuk penelitian lebih lanjut atau aplikasi industri. Penelitian selesai dengan semua langkah terdokumentasi dan hasil diperoleh.



Gambar 2.2 Zona Pengelasan FSW

Bagian-bagian yang dianalisis seperti pada Gambar 2.2 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.
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 plastik tanpa siklus rekristalisasi. Juga, biasanya ada batas yang tidak salah lagi yang mengenali wilayah rekristalisasi (bagian las) dan wilayah TMAZ yang terpelintir.
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.

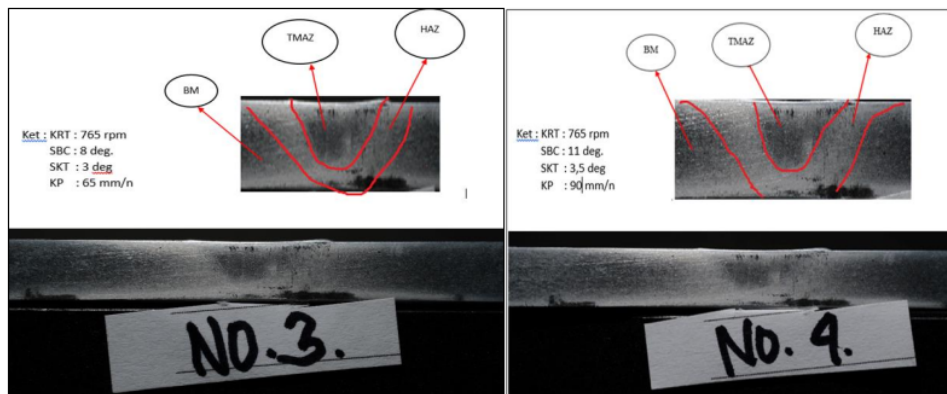
Desain eksperimen dan variasi parameter proses FSW yang digunakan adalah seperti pada Tabel 2.1 berikut ini:

Tabel 2.1 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 2.3 Hasil uji foto makro spesimen nomor 3 dan nomor 4

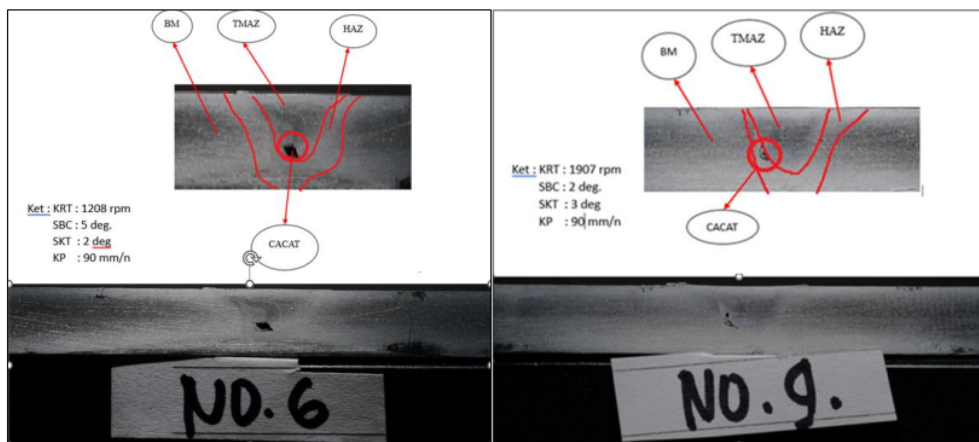
Hasil proses FSW material AA6061-T651 pada Gambar 2.3 nomor 3 dengan parameter kecepatan rotasi tool 765 rpm, sudut bahu cekung 8°, sudut kemiringan tool 3°, dan kecepatan pengelasan 65 mm/min, zona Thermo-Mechanically Affected Zone (TMAZ) dan Heat Affected Zone (HAZ) cenderung menyempit karena beberapa 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° 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 2.3 nomor 4 dengan parameter seperti kecepatan rotasi tool 765 rpm, sudut bahu cekung 11°, sudut kemiringan tool 3,5°, 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.

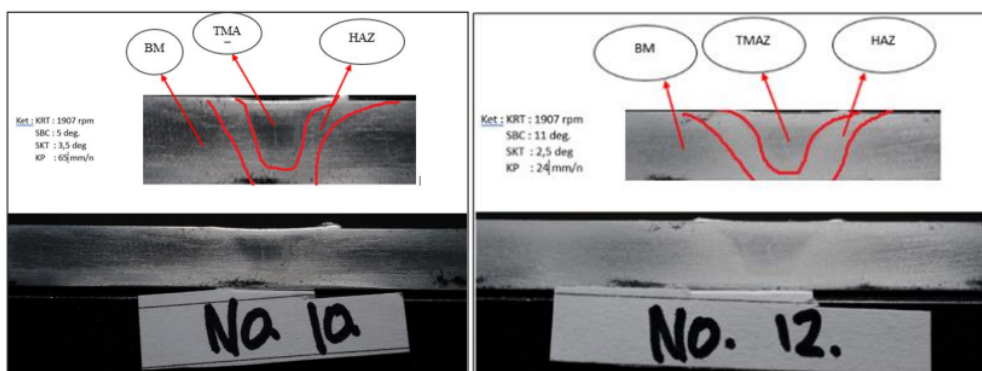
Hasil proses FSW pada Gambar 2.4 nomor 6 dengan parameter kecepatan rotasi tool 1208 rpm, sudut bahu cekung 5°, sudut kemiringan tool 2°, dan kecepatan pengelasan 90 mm/menit, fenomena terjadi di mana zona Thermo-Mechanically Affected Zone (TMAZ) dan Heat Affected Zone (HAZ) menyempit, tetapi terdapat 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°) mengurangi interaksi tool dengan material, yang bisa mengurangi zona HAZ yang terpengaruh. Sudut kemiringan tool yang moderat (2°) 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 2.4 nomor 9** dengan parameter kecepatan rotasi tool 1907 rpm, sudut bahu cekung 2° , sudut kemiringan tool 3° , 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°) mengurangi distribusi panas yang terlalu luas, yang mungkin menghasilkan Heat Affected Zone (HAZ) yang sangat sempit. Sudut kemiringan tool yang moderat (3°) 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 2.4 Hasil uji foto makro spesimen nomor 6 dan nomor 9

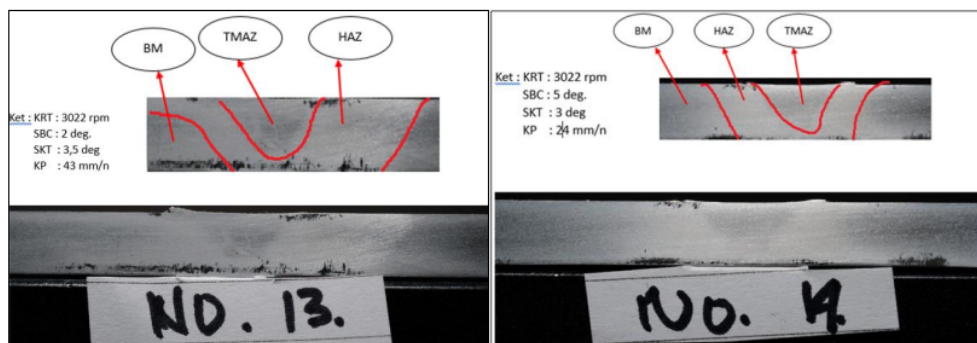


Gambar 2.5 Hasil uji foto makro spesimen nomor 10 dan nomor 12

Pada **Gambar 2.5 nomor 10** dengan parameter kecepatan rotasi tool 1907 rpm, sudut bahu cekung 5° , 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°) 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 2.5 nomor 12** dengan parameter kecepatan rotasi tool 1907 rpm , sudut bahu cekung 11° , 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°) 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.

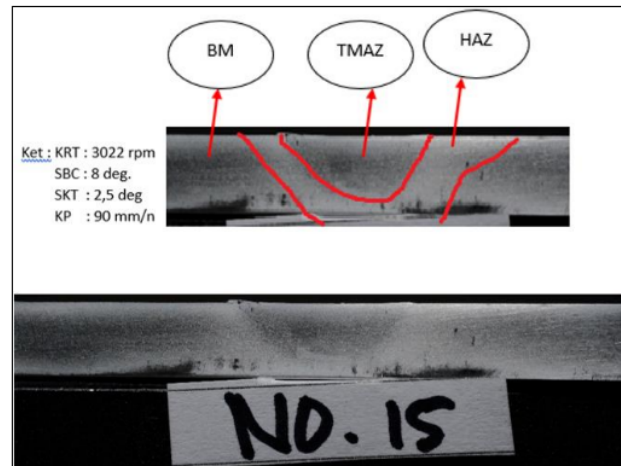


Gambar 2.5 Hasil uji foto makro spesimen nomor 13 dan nomor 14

Pada **Gambar 2.5 nomor 13** dengan parameter kecepatan rotasi tool 3022 rpm , sudut bahu cekung 2° , 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°) 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 2.5 nomor 14** dengan parameter kecepatan rotasi tool 3022 rpm , sudut bahu cekung 5° , sudut kemiringan tool 3° , 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°) 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°) 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 2.6 Hasil uji foto makro spesimen nomor 15

Pada Gambar 2.6 nomor 15 dengan parameter kecepatan rotasi tool 3022 rpm, sudut bahu cekung 8°, sudut kemiringan tool 2,5°, 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°) memperluas interaksi antara tool dan material, yang juga berkontribusi pada zona HAZ yang lebih luas. Sudut kemiringan tool yang moderat (2,5°) 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°, sudut kemiringan tool 2,5°, 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°, sudut kemiringan tool 3,5°, 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.

10

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 keku¹⁸ selama proses penelitian ini. Tanpa dukungan dan pengorbanan¹³ reka, 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. K¹⁶ angatan 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 dan 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] 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.
- [5] 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
- [6] 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.
- [7] 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>.
- [8] W. Fsw, T. Sifat, M. Dan, M. Pada, dan A. Paduan, *PENGARUH KECEPATAN FEEDRATE FRICTION STIR*, no. November 2021. 2024.
- [9] 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.

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.

SKRIPSI AGIL.docx

ORIGINALITY REPORT

12%

SIMILARITY INDEX

11%

INTERNET SOURCES

7%

PUBLICATIONS

1%

STUDENT PAPERS

PRIMARY SOURCES

1	ojs.ummetro.ac.id Internet Source	3%
2	worldwidescience.org Internet Source	2%
3	pustaka.sttw.ac.id Internet Source	1%
4	123dok.com Internet Source	1%
5	adoc.pub Internet Source	1%
6	louisdl.louislibraries.org Internet Source	<1%
7	repository.poliupg.ac.id Internet Source	<1%
8	Submitted to Universitas Negeri Surabaya The State University of Surabaya Student Paper	<1%
9	eprints.ums.ac.id Internet Source	<1%

10	core.ac.uk Internet Source	<1 %
11	e-proceeding.itp.ac.id Internet Source	<1 %
12	repository.its.ac.id Internet Source	<1 %
13	repository.uinsu.ac.id Internet Source	<1 %
14	eprints.itn.ac.id Internet Source	<1 %
15	id.123dok.com Internet Source	<1 %
16	pels.umsida.ac.id Internet Source	<1 %
17	repository.umy.ac.id Internet Source	<1 %
18	www.coursehero.com Internet Source	<1 %
19	www.batan.go.id Internet Source	<1 %
20	www.bursabajaringan.com Internet Source	<1 %
21	Tarmizi Tarmizi, Robi Farid Abdurachman Wahid, Irfan Irfan. "Pengaruh Kecepatan	<1 %

Pengelasan terhadap Sifat Mekanik
Sambungan Alumunium Paduan 5052 pada
Proses Friction Stir Welding [Effect of Welding
Speed to Mechanical Properties on Friction
Stir Welding of Aluminum 5052-H32]",
Metalurgi, 2019

Publication

22

www.slideshare.net

Internet Source

<1 %

Exclude quotes Off

Exclude matches Off

Exclude bibliography On