

Transforming Aluminum Welding Through FSW Innovations: Mengubah Pengelasan Aluminium Melalui Inovasi FSW

Sandifta Iffah Sjaifulah

Mulyadi

Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah
Sidoarjo, Indonesia

Universitas Muhammadiyah Sidoarjo

This study explores the impact of process parameters on the macrostructure of Aluminum alloy AA6061-T651 welded via Friction Stir Welding (FSW). Using Fillet joints and hexagonal tool geometries, the study investigates variations in tool rotation speed, tool tilt angle, and depth of penetration. Results show that specimens with a tool tilt angle of 3.4° exhibit optimal macrostructural properties, including equiaxed structures and increased Mg_2Si phases, enhancing mechanical properties. This research contributes valuable insights for optimizing FSW parameters in AA6061-T651 welding, with implications for improving weld quality and performance in industrial applications.

Highlight:

- FSW affects AA6061-T651 macrostructure.
- Optimal parameters improve mechanical properties.
- Study enhances aluminum weld quality.

Keyword: Friction Stir Welding (FSW), Aluminum alloy AA6061-T651, Process parameters, Macrostructure analysis, Mechanical properties

Pendahuluan

Sebuah teknik pengelasan terbaru yang ramah lingkungan yang menghasilkan kualitas sambungan yang baik disebut friction stir welding (FSW), dengan menggunakan gesekan antara benda kerja yang diam dan benda kerja yang bergerak, porsir dapat menjadi lebih lunak akibat gesekan antara dua benda kerja. Ini selesai dalam kondisi koneksi yang solid[1]. Logam paduan aluminium adalah sumber umum aplikasi FSW. Aluminium AA 5083 adalah jenis aluminium yang umum digunakan dalam pembuatan kapal. Dengan kecepatan travel 36 mm/menit dan perubahan kecepatan putar probe 1547 rpm, 1268 rpm, dan hasil sambungan las, sifat fisik dan mekanik sambungan diperiksa dalam penelitian ini[2]. Paduan aluminium (Al), magnesium (Mg), dan silikon (Si) berkekuatan tinggi dengan penambahan mangan (Mn) untuk meningkatkan keuletan dan ketangguhannya dikenal sebagai paduan AA6061-T6[3]. Penyambungan paduan aluminium dengan teknik pengelasan fusi konvensional diketahui bermasalah di mana beberapa masalah ini termasuk

pembentukan fase getas sekunder, retak selama pemadatan, distorsi tinggi, dan tegangan sisa pada Aluminium tersebut. Metode proses penyambungan paduan aluminium digunakan sebagai hasilnya seri AA 6061 T6 dengan cara pengelasan Friction Stir Welding (FSW)[4]. FSW merupakan metode pengelasan solid state yang dapat menghasilkan lasan dengan kualitas tinggi untuk beberapa material yang memiliki kemampuan las rendah seperti aluminium[5]. Prosedur Friction Stir Welding (FSW) menggunakan panas yang dihasilkan oleh gesekan antara Tools (Shoulder dan Pin) dengan benda kerja. Bahan mengalami proses agitasi dan melunak tanpa mencapai suhu leleh (0,6 sampai 0,8), atau 82,2 sampai 109,6 oC, karena panas ini, serta panas yang dihasilkan oleh proses pencampuran mekanik dan panas adiabatik dalam bahan. untuk polymer HDPE)[6]. Proses melunakkan ini memungkinkan alat untuk bergerak sepanjang jalur pengelasan. Pada fase ini, bagian depan pin (muka pin) dibantu oleh profilpin (sekrup) tertentu, gaya plastisasi material ke bagian belakang pin sambil memberikan gaya tempa yang besar untuk melelehkan kedua bahan las. berputar- putar dan proses homogenisasi bahan las terjadi[7].

A.Tempat Dan Waktu Penelitian

Dalam penelitian dan pengujian pengelasan dilakukan di laboratorium Teknik Mesin Umsida Universitas Muhammadiyah Sidoarjo dengan memaksimalkan pemahaman tentang pengaruh parameter friction stir welding terhadap struktur makro aluminium AA6061-T6 pada hasil pengelasan friction stir welding

B.Desain Ekperimen

Proses pembuatan alat diperlukan desain untuk konsep benda kerja dengan tujuan perancangan alat dapat membuat alat dengan mudah untuk menjalankan pekerjaan yang dilakukan oleh perancang. Dibawah ini merupakan rancangan desain tool FSW.



Figure 1. *Desain tool FSW Geometri Hexagonal*

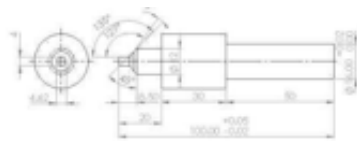


Figure 2. *Dimensi Tool FSW Geometri Hexagonal*



Figure 3. *Hasil Pembuatan Tool FSW Geometri Hexagonal*

C. Aluminium AA6061-T651

Dalam paduan aluminium, terdapat lebih dari 300 komposisi komponen paduan yang berbeda. Semua jenis paduan aluminium mengandung dua atau lebih komponen kimia yang dapat mengubah karakteristik mekanik paduan tersebut (ASM International, 1998). Aluminium AA6061-T6 adalah bahan yang digunakan dalam penyelidikan ini, sedangkan silikon dan magnesium (seri 6000 atau 6xx) merupakan paduannya. Dibandingkan dengan jenis paduan aluminium 6005 lainnya, aluminium AA6061-T6 memiliki kekuatan tertinggi kedua dan keuletan terendah kedua. Aluminium memiliki sejumlah karakteristik utama, antara lain: Ringan, karena berat jenis rendah (2,7 gr/cm³)` 5. Jenis permukaan baik

Kekuatan dan berat sangat baik6. Ketahanan terhadap korosi yang baik

Temperatur lebur rendah (660°C),7. Konduktor panas dan listrik yang baik

sehingga peralatan peleburan lebih sederhana8. Mudah dipadu dengan unsur lain untuk

menghasilkan perpaduan yang diinginkan

Memiliki sifat mampu cor sangat baik

Element	% Present
Silicon (Si)	0.40 - 0.80
Magnesium (Mg)	0.80 - 1.20
Manganese (Mn)	0.0 - 0.15
Iron (Fe)	0.0 - 0.70
Copper (Cu)	0.15 - 0.40
Chromium (Cr)	0.04 - 0.35
Zinx (Zn)	0.0 - 0.25
Others (Total)	0.0 - 0.15
Titanium (Ti)	0.0 - 0.15
Other (Each)	0.0 - 0.05
Aluminium (Al) B	Balance

Table 1. Kandungan Kimia alumunium AA6061-T6

D.Prinsip Kerja Friction Stir Welding (FSW)

Gesekan terus-menerus yang terjadi antara dua benda pada saat proses pengelasan adukan gesek menyebabkan panas yang dihasilkan. Caranya menggunakan alat dengan pin yang berputar terus menerus dan menekan pada material yang perlu disambung. Panas yang dihasilkan oleh alat gesek 7 berbentuk silinder dengan pin dapat melunakkan komponen. Dalam proses pengelasan, suatu alat yang bergerak secara melintang dan terus menerus sepanjang jalur pengelasan suatu material digabungkan menjadi satu.

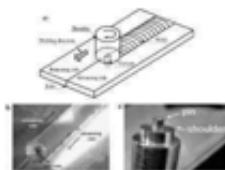


Figure 4. Skematik Prinsip Friction Stir Welding (FSW)

Dalam skema pengelasan friction stir welding, tool dengan atau tanpa profil berputar pada probe dan bergerak dengan kecepatan konstan di jalur sambungan antara dua logam yang akan dilas. Karena gaya yang terlibat dalam pengelasan, benda kerja harus dijepit dengan kuat pada penjepit atau cekam untuk menahan posisinya. Panjang probe lebih pendek dari ketebalan benda kerja, dan shoulder harus bersentuhan dengan permukaan benda kerja. Panas gesekan dihasilkan oleh gesekan antara probe dan shoulder pada benda kerja. Panas yang dihasilkan oleh proses pencampuran mekanis menyebabkan material benda kerja melunak tanpa melebihi titik lelehnya (melting point), yang memungkinkan tool pengelasan bergerak di sepanjang jalur pengelasan. Pada saat proses pengelasan pin mendorong material ke arah belakang pin sementara gaya produksi yang solid diterapkan untuk menahan logam las secara bersamaan

Metode

Untuk Dapat memperoleh beberapa data penunjang yang diperlukan selama proses penelitian serta beberapa teori dalam menyusun skripsi ini maka diperlukan teknik pengumpulan data antara lain:

1. Studi Literatur

Studi literatur ini mengenai beberapa referensi dari jurnal yang bersi materi-materi yang berhubungan dengan Solar Collector sebagai upaya untuk mengumpulkan informasi atau data melalui beberapa sumber informasi sesuai dengan penelitian yang dilakukan.

2. ObservasiLingkungan

Ulasan dan observasi terhadap faktor lingkungan yang mempengaruhi proses penelitian dimasukkan dalam observasi lingkungan ini . Pengamatan dari penelitian sebelumnya, jenis dan jenis rangkaian yang digunakan, ketersediaan sumber daya mentah berupa komponen atau benda material yang akan diproduksi, dan faktor lainnya merupakan contoh pengamatan lingkungan untuk proses perancangan.

Hasil dan Pembahasan

Pada penelitian ini pembuatan alat solar kolektor tipe plat datar yang terhubung dengan manometer U terbalik ini harus dipersiapkan terlebih dahulu komponennya agar mendapatkan hasil yang efisien dan maksimal.

A.Persipan Alat dan Bahan

Yang perlu dipersiapkan sebelum melakukan eksperimen friction stir welding dan pengujian spesimen adalah sebagai berikut :

Mesin Milling / Frais

Mesin milling digunakan untuk meratakan permukaan sisi pada Aluminium dan juga digunakan untuk proses friction stir welding. Dengan parameter sebagai berikut :

Jenis mesin : Mesin Frais Universal

Type : X6322C WEIDA

Kecepatan spindle (rpm) : 2.192

Sudut kemiringan : 3,4°

Kecepatan Jalan(mm/min) : 36,3



Figure 5. *Mesin Frais*

Mesin CNC Milling

Mesin CNC milling yang dipakai penelitian disini yaitu merk WEIDAMC VMC-640 memiliki 3 axis yang berfungsi untuk membuat bentuk tool yang berbentuk hexagonal dan membuat jig untuk mencekam aluminium pada proses friction stir welding, penggunaan mesin CNC milling harus memiliki program yang telah diprogram sebelumnya dikomputer, mesin CNC milling



Figure 6. *Mesin CNC*

Mesin Bubut

Mesin Bubut yang dipakai eksperimen bermerk JIW GH6241X/1000 ini berfungsi untuk membuat tool yang berbentuk hexagonal yang memiliki beberapa bagian yang harus dibubut



Figure 7. *Mesin Bubut*

Aluminium AA6061-T651

Pelat aluminium paduan 6061-T6 adalah bahan spesimen yang digunakan dalam penelitian ini. Sesuai dengan banyaknya parameter proses dengan dua kali ulangan maka diperlukan 28 pasang spesimen

sehingga total menjadi 14 spesimen dengan dimensi 100 mm x 60 mm x 6 mm.

Figure 8. *Plat Alumunium AA6061-T651*

Tool Pengelasan

Pada penelitian kali ini material tool yang akan digunakan adalah Baja H13. Alasan pemilihan bahan tersebut karena baja H13 memiliki pengerasan udara tinggi, kandungan tinggi karbon dan vanadium membuatnya memiliki ketahanan aus yang tinggi terhadap guncangan termal dan retak panas serta kekerasan pada suhu tinggi

Kertas Gosok

Kertas gosok disini digunakan pada proses poles dan grinding. Pada penelitian ini digunakan kertas gosok ukuran 240, 500, 1000, dan 2000.

Cairan Pengetsaan

Cairan kimia untuk etsa digunakan untuk mengikis permukaan supaya struktur mikro dapat dilihat. Komposisi cairan yang digunakan disebut komposisi Keller's yaitu 2 ml HF, 3 ml HCl, 5 ml HNO₃, dan 190 ml H₂O

B. Proses Pengerjaan

Pada penelitian ini proses friction stir welding dilakukan sebanyak 16 kali dengan perbedaan parameter yang telah ditentukan. Berikut adalah langkah – langkah proses friction stir welding :

Pengaturan putaran spindle yang sudah ditentukan oleh parameter. Yaitu dengan cara memindah belt pada pulley motor dan pulley spindle freis sesuai dengan parameter kecepatan putaran spindle 765, 1208, 1907, 3020 (rpm).

**Figure 9.** *Setting Kecepatan Putaran Spindle*

Pengaturan kemiringan tool yang sudah ditentukan oleh parameter. Untuk melonggari baut pada ram mesin freis dengan kunci pas 17, geser kemiringan ram sampai milling head miring sesuai parameter yaitu sebesar 2.04, 2.80, 3.4, 3, (°).

**Figure 10.** *Setting Kecepatan Putaran Spindle*

Pengaturan kecepatan pemakanan (feedrate) yang sudah ditentukan oleh parameter. Ubah kode pada tabel kecepatan pemakanan sesuai parameter sebesar 24, 43, 65, 90 (mm/min).



Figure 11. *Setting Kecepatan Pemakanan (feedrate)*

Memasang jig pada meja mesin freis dan melakukan dial untuk meluruskan posisi jig.



Figure 12. *Dial Permukaan Spesimen*

Memilih tool sesuai dengan parameter yang akan digunakan.

Memasang tool dengan collet pada spindle dan merapatkan pengunci spindle agar tool rapat dan tidak goyang.

Memasang spesimen plat aluminium AA6061 T651 pada jig dan mengunci baut yang ada di jig supaya saat proses friction stir welding tidak terjadi deformasi yang signifikan.



Figure 13. *Posisi Spesimen pada Jig*

Menyalakan mesin freis dengan putaran spindle searah jarum jam.

Mengarahkan tool mendekati titik nol pengelasan (datum) pada spesimen dan menjalankan meja mesin freis untuk memastikan jalur pengelasan sudah tepat.



Figure 14. *Tuas Datum Titik Nol*

Pin masuk diantara dua plat hingga shoulder menyentuh permukaan spesimen dengan menggerakkan tool kearah vertikal menggunakan tuas manual pemakanan sumbu Y sampai pin shoulder menyentuh spesimen. Kemudian putar tuas manual pemakanan sumbu Y untuk penetrasi.



Figure 15. *Posisi Tool Shoulder pada titik awal pengelasan*

Menghentikan tuas otomatis sumbu X ketika pengelasan sampai ujung spesimen. Setelah itu menggerakkan tombol otomatis sumbu Y kearah menjauhi spesimen yang sudah dilakukan friction stir welding.

Menekan tombol off untuk menghentikan putaran spindle dan melepas tool menggunakan kunci khusus spindle.

Melepas spesimen pada jig dan melakukan pembersihan di area pengelasan dan memberikan marking number spesimen sesuai dengan nomer parameter.



Figure 16. *Proses friction stir welding*

Melakukan langkah-langkah di atas sebanyak 16 kali dengan menyesuaikan parameter yang sudah ditentukan.



Figure 17. Akhir proses FSW

Menekan tombol off untuk menghentikan putaran spindle dan melepas tool menggunakan kunci khusus spindle

Melepas spesimen pada jig dan melakukan pembersihan di area pengelasan dan memberikan marking number spesimen sesuai dengan nomer parameter.

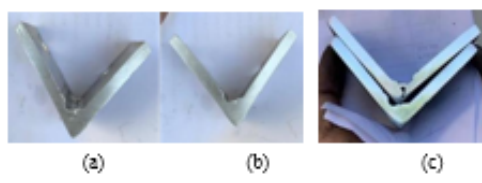


Figure 18. Hasil spesimen friction stir welding

17. Melakukan langkah-langkah di atas sebanyak 16 kali dengan menyesuaikan parameter yang sudah ditentukan.

C. Proses Uji Makrostruktur Friction Stir Welding

Poles dan Grinding

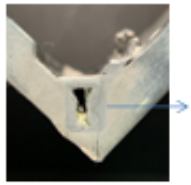
Proses poles dan grinding adalah proses untuk menghaluskan permukaan spesimen. Mesin bubut digunakan untuk proses poles.

Pada proses pemolesan menggunakan kertas gosok ukuran 1000 dan 2000. Saat pemolesan menggunakan cairan coolant (dromus) untuk menghindari panas akibat gesekan yang terjadi saat pemolesan. Setelah dilakukan pemolesan sampai dengan permukaan spesimen menjadi rata kemudian dilakukan penggosokan menggunakan autosol sampai spesimen terlihat seperti mirroring (Manurung, 2020). Berikut gambar dibawah hasil dari pemolesan dan penggrindingan yang telah dilakukan

Etching

Proses etsa (etching) merupakan proses untuk memperlihatkan atau mengikis permukaan spesimen yang diuji agar fasa pada spesimen terlihat struktur mikro dan makro, fasa dan kandungan kimianya. Pada penelitian ini menggunakan Keller's reagent sesuai standart ASTM-e407-07. Cairan yang digunakan yaitu 2 ml HF, 3 ml HCl, 5 ml HNO₃, dan 190 ml H₂O dan menggunakan Alkohol 70% untuk membersihkan spesimen dari cairan etsa.

Proses pencampuran cairan etsa dan proses pengetsaan sesuai standart. Sebanyak 16 spesimen yang dilakukan proses etsa



Gambar 19 Hasil Proses

Figure 19. Hasil Proses Etsa

D.Analisa dan Pembahasan Hasil Uji Makrostruktur dari Friction Stir Welding

Pada proses friction stir welding terjadi proses mekanis sehingga bisa merubah komposisi kimia dan struktur pada spesimen yang dilas yaitu Aluminium AA6061- T651. Berikut adalah komposisi kimia Aluminium AA6061-T651 yang dilakukan friction stir welding

Tabel 2.Komposisi Kimia AA6061-T651

MaterialSiFeCuMnMgZnTiCrAl

AA6061- T6510,760,330,070,081,110,010,020,27Bal

Menunjukkan komposisi kimia aluminium AA6061-T651 yang dilakukan proses friction stir welding. Komposisi tersebut dapat berubah karena adanya efek perubahan panas akibat adanya putaran tool, gesekan dan penetrasi antara tool dan material, tumbukan akibat gaya aksial yang ditimbulkan saat FSW

Hasil Uji Makrostruktur Terbaik

Hasil pengujian Makrostruktur memiliki hubungan yang saling berkaitan dengan hasil uji kekerasan karena struktur dan fasa hasil pengelasan saling mempengaruhi hasilnya. Data analisa ini mengacu pada hasil uji kekerasan yang dilakukan oleh (Rizki, 2022). Dari hasil uji kekerasan dengan ANOVA mendapatkan hasil persen kontribusi yang tertinggi yaitu pada sudut kemiringan tool dengan sudut 2o. Berikut gambar dibawah merupakan hasil uji makrostruktur dengan spesimen yang memiliki sudut kemiringan tool sebesar 2o dengan kecepatan putaran tool sebesar 765, 1208, 1907,3022 (rpm).

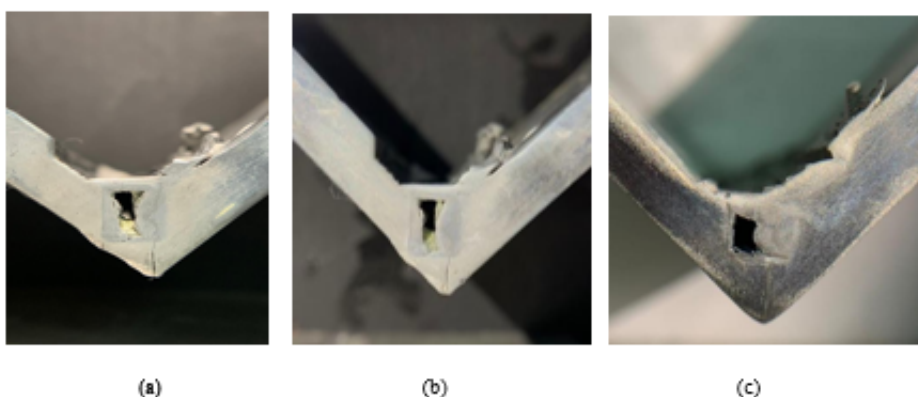


Figure 20. Spesimen Hasil Makrostruktur Terbaik Berdasarkan Kamera Lensa Makro

Pada gambar diatas merupakan gambar dengan perbesaran 12.5x yang menunjukkan daerah

perbatasan antara daerah TMAZ dan WM. Daerah TMAZ menunjukkan pola struktur yang memiliki bentuk dendrit equiaxed (Afifuddin & Ilman, 2021) dan memiliki warna gelap dan terjadinya grain growth karena pengaruh panas yang terjadi saat fsw (Prabandono et al., 2018). Namun daerah TMAZ tidak terjadi deformasi plastis hanya terpengaruh oleh panas dan regangan induksi yang dihasilkan oleh adukan pada daerah WM (Jacob et al., 2021). Pada daerah TMAZ tidak ada proses rekristalisasi seperti pada bagian weld metal, sehingga berdampak pada perubahan struktur yang mengakibatkan kekerasan daerah TMAZ lebih keras dibandingkan daerah weld metal. Pada daerah WM memiliki warna yang lebih terang karena terjadi adukan dan gaya tekan serta terjadi deformasi plastis saat fsw pada daerah tersebut (Wirjolukito & Wijaya, 2020).

Hasil Uji Makrostruktur Terburuk

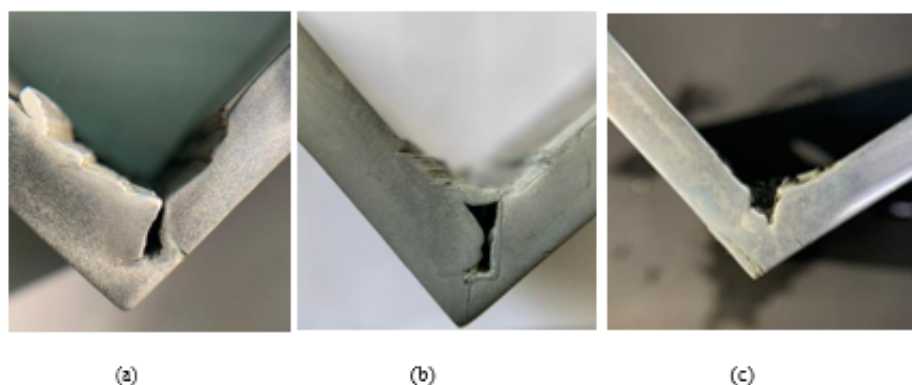


Figure 21. *Spesimen Hasil Makrostruktur Terburuk Berdasarkan Kamera Lensa Makro*

Pada gambar diatas merupakan gambar dengan perbesaran x yang menunjukkan daerah perbatasan antara daerah TMAZ dan WM. Daerah TMAZ menunjukkan pola struktur yang memiliki bentuk dendrit equiaxed (Afifuddin & Ilman, 2021) dan memiliki warna gelap dan terjadinya grain growth karena pengaruh panas yang terjadi saat fsw (Prabandono et al., 2018). Namun daerah TMAZ tidak terjadi deformasi plastis hanya terpengaruh oleh panas dan regangan induksi yang dihasilkan oleh adukan pada daerah WM (Jacob et al., 2021). Pada daerah TMAZ tidak ada proses rekristalisasi seperti pada bagian weld metal, sehingga berdampak pada perubahan struktur yang mengakibatkan kekerasan daerah TMAZ lebih keras dibandingkan daerah weld metal. Pada daerah WM memiliki warna yang lebih terang karena terjadi adukan dan gaya tekan serta terjadi deformasi plastis saat fsw pada daerah tersebut (Wirjolukito & Wijaya, 2020). Pada WM terdapat cacat Tunnel Defect (TD) yang terjadi akibat temperatur yang dihasilkan saat pengelasan terlalu tinggi adapun bisa terjadi karena gaya tempa yang dihasilkan terlalu kecil dan pengaruh sudut kemiringan tool yang terlalu kecil yang akan berpengaruh terhadap kekuatan tarik dan elongasi yang besar dan terdapat cacat pada jalur pengelasan dimana kecepatan feed meja terlalu cepat dan tools yang panas mengakibatkan Pin Tools Hexagonal patah pada saat berjalannya Pengelasan FSW (Kuntar, 2016).

Simpulan

Berdasarkan penelitian yang dilakukan tentang analisa pengaruh variasi parameter proses friction stir welding menggunakan sambungan Fillet joint pada aluminium AA6061-T651 dengan pengujian makrostruktur memiliki kesimpulan sebagai berikut :

Hasil Eksperimen dengan parameter kontribusi terbaik yaitu pada sudut kemiringan tool sebesar 3.4o yang terdapat pada spesimen 1, spesimen 2, spesimen yang memiliki hasil makrostruktur yang diharapkan karena memiliki Hasil Pengelasan yang lebih banyak dan merata sehingga dapat merubahsifat mekaniknya menjadi lebih keras dari hasil pengelasan.

Hasil uji makrostruktur pada spesimen 8 yang memiliki parameter dengan kecepatan putaran tool 3022 rpm, kecepatan pengelasan 36 mm/min, kedalaman pemakanan dan sudut kemiringan tool sebesar 0o memiliki hasil makrostruktur yang kurang baik karena sudut kemiringan 0o dikarenakan kurang terjadinya penekanan dari atas yang mengakibatkan hasil las kurang sempurna.

Hasil uji makrostruktur pada spesimen 7 yang memiliki parameter dengan kecepatan Putaran tool 3022 rpm, kecepatan pengelasan 15 mm/min, kedalaman pemakanan dan sudut kemiringan tool sebesar 0o memiliki hasil makrostruktur yang kurang baik karena sudut kemiringan 0o dikarenakan kurang terjadinya penekanan dari atas yang mengakibatkan hasil las kurang sempurna..

Hasil uji makrostruktur pada spesimen 3 yang memiliki parameter dengan kecepatan putaran tool 1907 rpm, kecepatan pengelasan 36 mm/min, kedalaman pemakanan 5.5mm dan sudut kemiringan tool sebesar 3.4o memiliki hasil makrostruktur yang kurang baik karena sudut kemiringan 0o dikarenakan kurang terjadinya penekanan dari atas yang mengakibatkan pin tools hexagonal putus pada saat berjalannya FSW.

Daerah WM yang memiliki fasa Mg₂Si lebih banyak menjadikan material bertambah keras dan kuat dan semakin kecil bentuk struktur hasil friction stir welding akan mempengaruhi kekuatan mekanik pada spesimen.

References

- [1] A. Nurhafid, S. Jokosisworo, and U. B. Sarjito, "Analisa Pengaruh Perbedaan Feed Rate Terhadap Kekuatan Tarik Dan Impak Aluminium 6061 Metode Pengelasan Friction Stir Welding," *J. Teknik Perkapalan*, vol. 5, no. 2, pp. 473-481, 2017.
- [2] ASM International, *ASM Handbook Volume 3: Alloy Phase Diagrams*. ASM Handbook, 1998.
- [3] ASM International, *ASM Handbook Volume 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, vol. 2, p. 3470, 2001.
- [4] P. Bahemmat, M. Haghpanahi, M. K. Besharati, S. Ahsanizadeh, and H. Rezaei, "Study on mechanical, micro-, and macrostructural characteristics of dissimilar friction stir welding of AA6061-T6 and AA7075-T6," *Proc. Inst. Mech. Eng., Part B: J. Eng. Manufacture*, vol. 224, no. 12, pp. 1854-1865, 2010.
- [5] F. Fandi, "Pengaruh arah putaran tool terhadap sifat mekanik hasil sambungan, Aluminium Friction, Side Mesin, Teknik Teknik, Konsentrasi Brawijaya, Universitas Teknik, Fakultas aluminium double side friction stir welding," 2018.
- [6] I. Helmi and T. Tarmizi, "Pengaruh Bentuk Pin terhadap Sifat Mekanik Aluminium 5083 - H112 Hasil Proses Friction Stir Welding," *J. Riset Teknol. Ind.*, vol. 11, no. 1, p. 43, 2017.
- [7] J. R. Davis, *Aluminium and Aluminium Alloys*. ASM International, 2001.
- [8] I. A. Kuntar, "Studi Eksperimental Friction Stir Welding Aluminium 5083 Dengan Variasi Kecepatan Putaran Dan Kemiringan," 2016.
- [9] W. B. Lee, Y. M. Yeon, and S. B. Jung, "Mechanical properties related to microstructural variation of 6061 Al alloy joints by friction stir welding," *Mater. Trans.*, vol. 45, no. 5, pp. 1700-1705, 2004.
- [10] D. Li, X. Yang, L. Cui, F. He, and H. Shen, "Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of AA6061-T6 butt welded joints by stationary shoulder friction stir welding," *Mater. Design*, vol. 64, pp. 251-260, 2014.
- [11] V. Y. T. S. Y. Manurung, "Panduan metalografi," *Sci. Eng. R: Rep.*, vol. 50, no. 1-2, pp. 1-78, 2005.
- [12] R. S. Mishra and Z. Y. Ma, "Friction stir welding and processing," *Mater. Sci. Eng. R: Rep.*, vol. 50, no. 1-2, pp. 1-78, 2005.
- [13] Mulyadi and Iswanto, *Buku Ajar Teknologi Pengelasan*. UMSIDA Press, 2019.
- [14] 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
Physical and Mechanical Properties of Welded Joints Friction Stir Welding (FSW) AA 5083
with a Variation of," 2016.

15. [15] R. I. Rodriguez et al., "Microstructure and mechanical properties of dissimilar friction stir welding of 6061-to-7050 aluminum alloys," Mater. Design, vol. 83, pp. 60-65, 2015.
16. [16] D. Satyadianto, "Pengaruh variasi tekanan gesek, tekanan tempa dan durasi gesek terhadap kekuatan impact pada sambungan Las Gesek (Friction Welding) dengan menggunakan baja paduan Aisi 4140," 2015.
17. [17] R. Siswanto, Buku Ajar Teknologi Pengelasan (HMKB791). Teknik Mesin Univeristas Lambung Mangkurat, 2018.
18. [18] 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," 2012.