

Laju perambatan retak fatik dan sifat mekanik pada pengelasan *friction stir welding* (FSW) aluminium AA2024-T3 dengan perlakuan *transient thermal tensioning* (TTT)

Pujono^{1*}, Dian Prabowo², Ipung Kurniawan³, Joko Setia Pribadi⁴, Muhamad Yusuf⁵

^{1,2,3,4}Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Cilacap
Jl. Dr. Soetomo No 01, Sidakaya, Cilacap, Jawa Tengah 53212

⁵Jurusan Teknik Elektronika, Politeknik Negeri Cilacap
Jl. Dr. Soetomo No 01, Sidakaya, Cilacap, Jawa Tengah 53212

*Corresponding author: pujono@pnc.ac.id

Abstract

One type of engineering material that is often used in transportation construction, especially for aircraft, automotive, ships, and other industries is aluminum alloy. Aluminum alloys have excellent mechanical properties, including corrosion resistance, lightweight, and good formability. However, in addition to these good properties, aluminum also has a weakness, namely the appearance of porosity and cracks when connected using arc welding (TIG, MIG). Friction stir welding (FSW) is an appropriate welding method for aluminum alloys to overcome these weaknesses, but the next problem will arise, namely related to distortion, decreased mechanical properties, and residual stress. For this reason, additional treatment is needed in order to improve the mechanical properties of the FSW welding results. The research method to be carried out is to carry out the FSW welding process on 2024 T3 aluminum alloys by adding moving local heat or transient thermal tensioning (TTT) using a heater placed in front of the tool and a heating temperature of 200°C. Some of the characterizations that will be carried out are microstructure tests, tensile tests, and fatigue tests. The results showed that the highest tensile strength value was obtained in the 1500 specimen, which was 312.2 MPa. The microstructure in the nugget zone (NZ) is fine-grain equiaxed. The lowest fatigue crack propagation rate at ΔK values of less than 7 MPa.m^{0.5} occurred in the 1100 specimen, while in other specimens the fatigue crack propagation rate was higher.

Keywords: *aluminium, friction stir welding, transient thermal tensioning, fatigue*

Abstrak

Salah satu jenis material teknik yang sering digunakan pada konstruksi transportasi terutama untuk pesawat terbang, otomotif, kapal dan industri lainnya adalah paduan aluminium. Paduan aluminium memiliki sifat mekanik yang sangat baik, diantaranya adalah tahan korosi, ringan dan mempunyai sifat mampu bentuk yang baik. Akan tetapi disamping sifat baik tersebut, aluminium juga mempunyai kelemahan yaitu munculnya porositas dan retak jika disambung menggunakan las busur (TIG, MIG). *Friction stir welding* (FSW) merupakan metode pengelasan yang tepat bagi paduan aluminium untuk mengatasi kelemahan tersebut, akan tetapi masalah berikutnya akan muncul yaitu terkait distorsi, menurunnya sifat mekanik dan tegangan sisa. Untuk itu diperlukan perlakuan tambahan dalam rangka memperbaiki sifat mekanik hasil pengelasan FSW. Metode penelitian yang akan dilakukan yaitu melakukan proses pengelasan FSW paduan aluminium seri 2024 T3 dengan menambahkan panas lokal yang bergerak atau *transient thermal tensioning* (TTT) dengan menggunakan pemanas (*heater*) yang ditempatkan didepan *tool* dan suhu pemanas sebesar 200°C. Beberapa karakterisasi yang akan dilakukan yaitu uji struktur mikro, uji tarik dan uji fatik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai kekuatan tarik tertinggi diperoleh pada spesimen 1500 yaitu 312,2 MPa. Struktur

mikro pada daerah *nugget zone* (NZ) berbentuk *fine grain equiaxed*. Laju perambatan retak fatik paling rendah pada nilai ΔK kurang dari $7 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$ terjadi pada spesimen 1500, sedangkan pada spesimen lain laju perambatan retak fatik lebih tinggi.

Kata kunci : aluminium, friction stir welding, transient thermal tensioning, fatik.

Pendahuluan

Paduan aluminium seri 2xxx adalah paduan Al-Cu dengan sifat mekanik yang cukup tinggi seperti tegangan tarik maksimum 470 MPa dan tegangan luluh 280 MPa. Aluminium umumnya merupakan salah satu logam terpenting dalam bidang teknik mesin dan digunakan dalam bahan konstruksi dan mesin seperti konstruksi otomotif, kapal, pesawat terbang dan industri lainnya. Aluminium memiliki banyak keunggulan seperti bobotnya yang ringan, sifat mampu bentuk, ketahanan korosi, dan kemampuan untuk meningkatkan kekuatannya melalui pengerjaan dingin dan perlakuan panas. Peningkatan kekuatan tarik ini dicapai dengan perlakuan panas dalam bentuk pemanasan di atas garis solvus diikuti dengan pendinginan dan penahanan pada suhu tertentu antara 160°C dan 200°C .

Secara umum, paduan aluminium seri 2000 yang diolah dengan T3 dan ditempa dengan T6 memiliki kandungan tembaga (Cu) yang sangat tinggi dan rentan terhadap retak panas dan porositas, yang mengakibatkan kemampuan las yang buruk. Paduan aluminium seri 2024-T3 rentan terhadap retak panas dan pengerasan presipitasi selama pengelasan karena pemisahan elemen paduan tembaga, membuatnya tidak dapat dilas dengan baik. Salah satu upaya untuk meningkatkan kemampuan las adalah pengelasan *friction stir welding* (FSW).

Friction stir welding (FSW) dipatenkan pada tahun 1991 oleh The Welding Institute (TWI). FSW adalah proses fusi yang banyak digunakan yang menawarkan keuntungan signifikan dibandingkan teknik penyambungan yang ada. Ini karena proses *friction stir welding* (FSW) memiliki regangan yang lebih sedikit di sepanjang lasan dan sifat mekanik yang

lebih baik. Di zona yang terkena panas (HAZ), susut lebih sedikit, tidak ada asap atau percikan api selama proses pengelasan, lebih sedikit peralatan yang dibutuhkan, penghematan energi dan biaya operasi yang lebih rendah.

FSW tidak memerlukan aditif atau filler dan relatif mudah dibentuk, tetapi benda harus kaku, bentuk las harus lurus, kondisi harus terjepit saat proses pengelasan, dan kecepatan pengelasan harus tinggi. sebagai dijaga agar tetap minimum. Pengembangan lubang kecil berpori di sepanjang lasan. Proses penyambungan dengan *friction stir welding* (FSW) melibatkan metode baru dalam proses penyambungan. Teknologi penyambungan ini hemat energi, ramah lingkungan dan serbaguna [1]. Ketika aluminium 2024-T3 dilas dengan las *tungsten inert gas* (TIG) konvensional dan metode baru dari *friction stir welding* (FSW) [2], nilai kekerasan mikro dari las TIG umumnya berkurang secara signifikan. ditunjukkan untuk manik dan HAZ, nilai kekerasan mikro las FSW bervariasi menurut zona: *nugget*, HAZ, TMAZ, dan zona tidak terpengaruh.

Tinjauan Pustaka

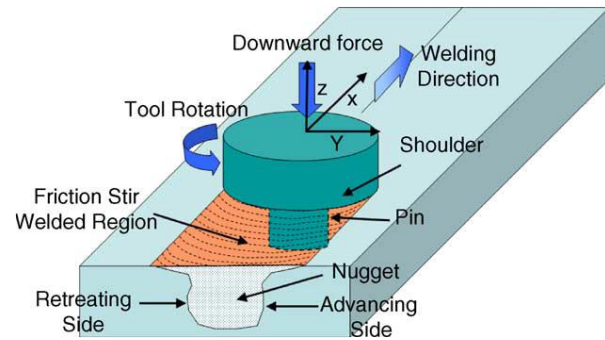
Proses pengelasan FSW merupakan teknik penyambungan yang memiliki energi efisien, tidak merusak lingkungan dan memiliki kegunaan yang lain [1]. Proses *friction stir welding* aluminium dilakukan untuk meningkatkan kekuatan hasil proses pengelasan [3]. Pengelasan dissimilar menggunakan metode *friction stir welding* (FSW) antara aluminium paduan seri 6061 dan seri 7075 telah diteliti oleh [4] terkait dengan perilaku sifat mekanik dan struktur mikronya. Penempatan aluminium seri 6061 pada sisi maju *tool* (*advancing side*) pada saat proses pengelasan FSW ternyata mampu menghasilkan hasil pengelasan yang

lebih efektif. Posisi seperti ini menghasilkan penurunan nilai kekerasan hasil pengelasan terutama pada daerah HAZ dibandingkan dengan nilai kekerasan daerah HAZ pada logam induk. Pengelasan dissimilar menggunakan metode *friction stir welding* (FSW) antara aluminium paduan seri 2024 dan seri 7075 dengan jenis sambungan tipe *lap joint* menghasilkan sifat mekanik yang lebih baik ketika paduan aluminium seri 7075 ditempatkan pada sisi maju (*advancing side*), hal ini dibuktikan dengan tidak munculnya cacat *void* pada hasil pengelasan [5]. Jika seri 2024 ditempatkan pada sisi maju, cacat *void* pada hasil pengelasan akan muncul. Penelitian juga menunjukkan bahwa nilai tegangan geser pada sambungan las meningkat dimana hal ini dipengaruhi oleh kecepatan pengelasan.

Aluminium paduan AA2024-T3 banyak digunakan sebagai bahan untuk struktur pesawat terbang seperti badan pesawat (*fuselage*), sekat pada badan pesawat (*fuselage bulkhead*) dan sayap (*wing*) pesawat [6]; [7]. Aluminium paduan AA2024-T3 merupakan paduan Al-Cu dengan kandungan tembaga (Cu) antara 3.8-4.9% sedangkan simbol T3 merupakan perlakuan larutan dan diikuti dengan proses penuaan alami (*natural ageing*) untuk mendapatkan kekerasan yang diinginkan [8]; [9]. Namun demikian, aluminium AA2024-T3 dan kelompok aluminium seri 2xxx tidak bisa dilas menggunakan las busur konvensional seperti *shield metal arc welding* (SMAW) atau las *gas tungsten arc welding* (GTAW) karena dapat menghasilkan retak las yang terjadi saat las mengalami pembekuan [1] sehingga pada kebanyakan industri pesawat terbang masih menggunakan paku keling (*rivet*) untuk proses penyambungan pada struktur. Proses pengelasan *friction stir welding* (FSW) merupakan jenis pengelasan yang sesuai untuk jenis material aluminium, karena pengelasan dengan metode FSW mampu menghindari retak panas, porositas dan distorsi [10-13].

Saat ini, berbagai inovasi telah dilakukan di bidang pengelasan yang

bertujuan untuk memecahkan permasalahan retak pada las. Salah satu upaya yang dilakukan adalah pengembangan las *friction stir welding* (FSW). Skema pengelasan *friction stir welding* ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Skema Pengelasan *friction stir welding* (FSW)

Las FSW merupakan las padat dimana proses penyambungan dilakukan dengan memasukkan *tool* berputar yang dilengkapi dengan pin dan selanjutnya *tool* bergerak sepanjang garis las sehingga terjadi sambungan las [1]. Teknik pengelasan seperti ini memungkinkan logam paduan aluminium seperti AA2024-T3 untuk disambung tanpa terjadi retak beku karena proses pengelasan berlangsung pada kondisi lumer (padat).

Metode Penelitian

Material

Bahan untuk penelitian ini adalah pelat *aluminium alloy* seri AA2024-T3 dengan ketebalan 3 mm, yang banyak digunakan untuk konstruksi pesawat dengan komposisi kimia ditunjukkan pada Tabel 1. Pengelasan menggunakan las FSW dengan tool dari baja AISI H13.

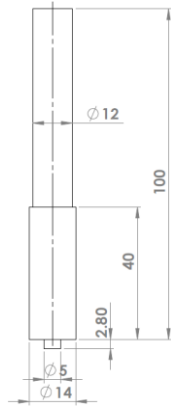
Tabel 1. Komposisi kimia AA2024-T3

Material	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Al
AA2024-T3	0.1	4.9	0.5	1.2	0.9	Bal.

Pengelasan FSW

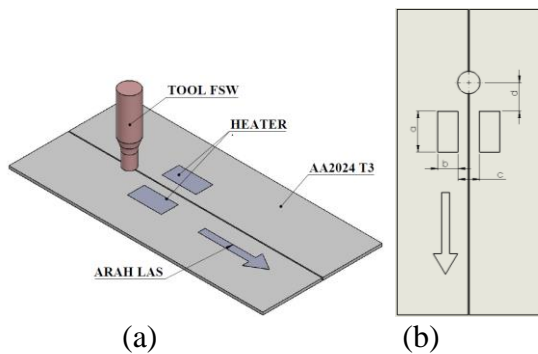
Proses pengelasan yang dilakukan menggunakan metode *friction stir welding* dengan tanpa perlakuan *transient thermal tensioning* (TTT) dan dengan menambahkan perlakuan *transient thermal tensioning*. Proses pengelasan FSW menggunakan 2

variasi kecepatan putar *tool* dan kecepatan las (*feeding*) yaitu: 1100 rpm, *feeding* 11 mm/menit tanpa perlakuan TTT (*as welded*) dan dengan perlakuan TTT (spesimen 1100) serta 1500 rpm, *feeding* 60 mm/menit (spesimen 1500). Bentuk dan dimensi *tool* ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Geometri *tool*.

Proses pengelasan FSW dilakukan dengan penambahan perlakuan *transient thermal tensioning* (TTT), dengan suhu 200°C, dengan posisi *heater* di depan *tool*. Skema pengelasan FSW dan TTT ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Skema pengelasan, (a) Skema isometrik, (b) posisi *heater*

Struktur mikro

Pengamatan mikrostruktur dilakukan menggunakan mikroskop jenis optik. Proses penyiapan spesimen untuk uji struktur mikro dilakukan dengan *downscale* memasukkan potongan spesimen pada resin bening, dilanjutkan dengan proses grinding polesing dengan kertas amplas dari ukuran kasar sampai ukuran halus, dikilapkan dengan bahan abrasive seperti autosol dan terakhir dengan melakukan pengetsaan menggunakan cairan kimia larutan reagen

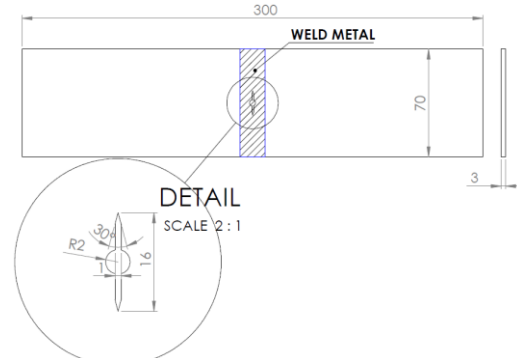
Keller dengan komposisi 2 ml HF + 3 ml HCl + 5 ml HNO₃ + 190 ml H₂O.

Pengujian tarik

Pengujian tarik merupakan jenis karakterisasi material yang menghasilkan beberapa karakter material yang sangat berguna untuk tujuan desain, seperti tegangan luluh (σ_Y), tegangan tarik maksimal (σ_{UTS}), modulus Young (E), keuletan, resilien dan elongasi material (pengurangan penampang). Selain itu, pengujian tarik dapat memberikan informasi tentang kinerja (efisiensi sambungan) sambungan las. Proses pengujian tarik ini akan dilakukan dengan menggunakan mesin Universal Testing Machine tipe servo pulser, dengan menggunakan standar ASTM E-8.

Pengujian fatik

Material untuk pengujian fatik dibuat dengan bentuk dan ukuran sesuai dengan standar ASTM E-647, dengan ukuran lebar 70mm dengan profil berlubang dan bersudut 30° pada bagian ujungnya. Profil lubang yang difungsikan sebagai retakan awal dibuat pada sisi tengah material atau dikenal dengan CCT (*center-cracked tension*). Profil spesimen uji fatik ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Bentuk spesimen uji fatik sesuai standar ASTM E 647-00

Pengujian dilakukan dengan $R = 0,1$ frekuensi 15 Hz, tingkat tegangan ~ 20 F kekuatan luluh. Retak awal dibuat pada daerah las dan tegak lurus terhadap arah pengerolan logam induk. Data berupa panjang retak a dan siklus N diplot sebagai fungsi dari K dalam bentuk kurva da/dN .

Kekuatan lelah (*fatigue strength*) tergantung pada arah beban yang berlawanan dengan arah pengelasan dan beban yang diterapkan. Laju perambatan retak dapat diprediksi menurut Persamaan Paris (Broek, 1982) dengan formula seperti dibawah ini :

$$\frac{da}{dN} = A(\Delta K)^n \quad (1)$$

dimana :

A dan n : konstanta (bahan penelitian).

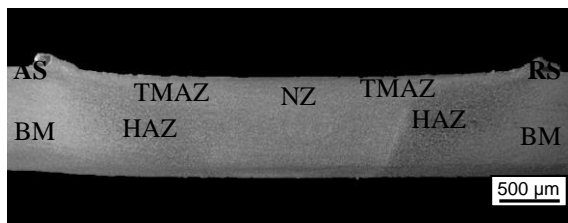
ΔK : faktor intensitas tegangan ($\Delta K = K_{max} - K_{min}$)

da/dN : kecepatan perambatan retak

Hasil dan Pembahasan

Struktur mikro

Bentuk mikrostruktur zona las (*nugget*) seragam dengan bentuk *fine grain equiaxed*. Zona yang terjadi pada hasil pengelasan FSW terbagi menjadi BM (*base metal*), HAZ (*heat affected zone*), TMAZ (*thermo-mechanically affected zone*) dan NZ (*nugget zone*). Zona pengelasan FSW ditunjukkan pada Gambar 5.

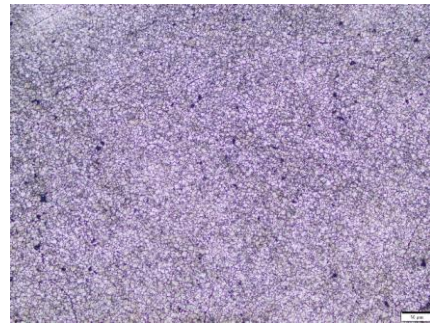


Gambar 5. Zona pada hasil pengelasan FSW

Bentuk *nugget* sangat dipengaruhi proses pengadukan dan gesekan, bentuk dan dimensi tool, *heat input*, jenis material, dan *thermal conductivity material*.



Gambar 6. Foto struktur mikro *nugget zone* spesimen *as welded*



Gambar 7. Foto struktur mikro *nugget zone* spesimen 1100

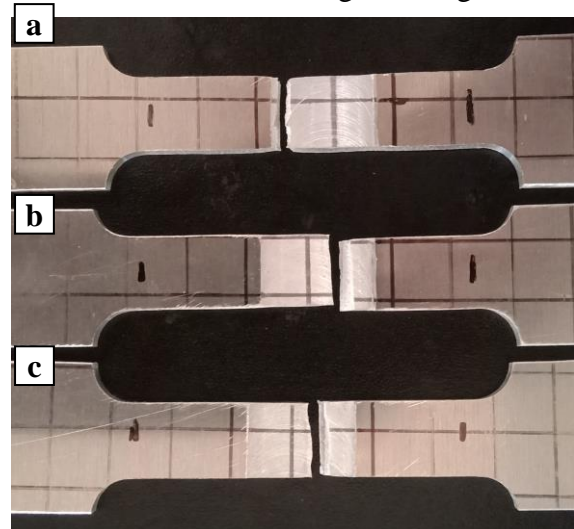


Gambar 8. Foto struktur mikro *nugget zone* spesimen 1500

Zona daerah las adalah zona yang mengalami deformasi plastis dan mengalami proses pemanasan selama proses pengelasan, mengalami direkristalisasi, dan berbutir halus pada zona *stirring*.

Uji tarik

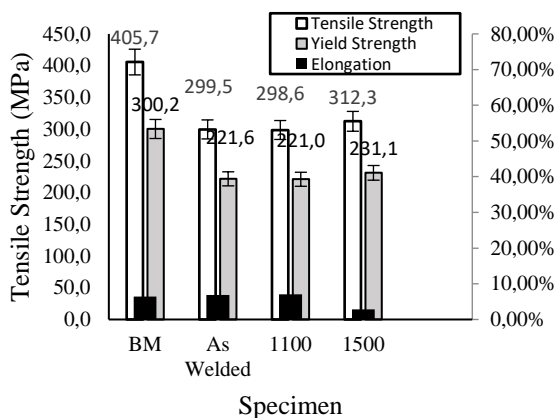
Proses pengujian tarik menghasilkan perpatahan material di zona *nugget zone* (NZ). Profil perpatahan hasil uji tarik ditunjukkan pada Gambar 9. Profil pengelasan ini menunjukkan bahwa daerah NZ lebih lemah dibandingkan dengan BM.



Gambar 9. Penampang patah uji tarik (a) *as welded*, (b) 1100, (c) 1500

Bentuk penampang patahan pada uji tarik tampak tegak lurus terhadap arah gaya tarik, menunjukkan bahwa patahan las bersifat getas. Nilai tegangan tarik (σ_{UTS}) terbesar hasil proses pengelasan FSW diperoleh pada spesimen 1500 dengan nilai tegangan tarik sebesar 312,3 MPa. Pada spesimen 1100 diperoleh nilai tegangan tarik sebesar 298,5 MPa, sedangkan nilai tegangan tarik pada spesimen *as welded* sebesar 299,5 MPa. Secara umum nilai tegangan tarik dari semua spesimen hasil proses pengelasan FSW masih dibawah nilai tegangan tarik logam induk.

Nilai tegangan luluh (σ_Y) juga menunjukkan kecenderungan yang sama yaitu nilai tegangan luluh tertinggi diperoleh pada spesimen 1500. Secara umum nilai tegangan luluh dari semua spesimen hasil proses pengelasan FSW masih dibawah nilai tegangan luluh logam induk. Hasil pengujian tarik untuk semua spesimen ditunjukkan pada Gambar 10.



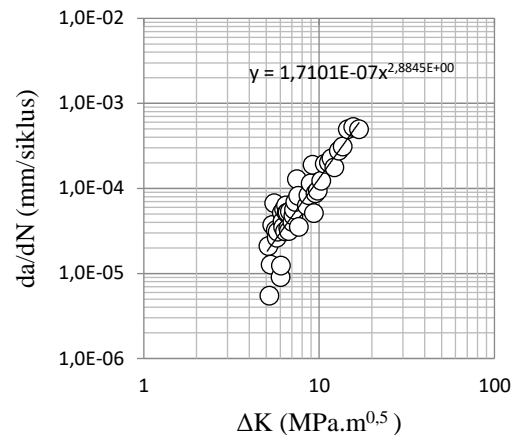
Gambar. 10 Hasil uji tarik

Uji fatik

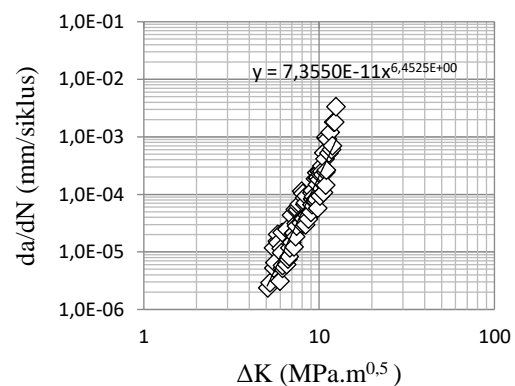
Jumlah siklus hasil uji fatik pada masing-masing spesimen ditunjukkan pada Tabel 2. Jumlah siklus pada spesimen 1100 yaitu 1293578, jumlah siklus pada spesimen 1500 yaitu 885714, sedangkan pada spesimen *as welded* diperoleh jumlah siklus sebanyak 289905 siklus.

Tabel 2. Jumlah siklus

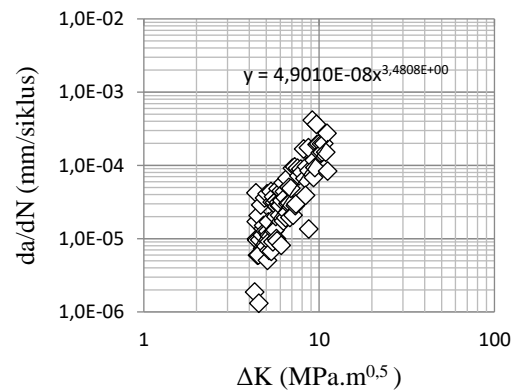
No	Spesimen	Jumlah siklus
1	<i>As Welded</i>	289905
2	Spesimen 1100	1293578
3	Spesimen 1500	885714



Gambar 11. Kurva da/dN vs ΔK spesimen *as welded*



Gambar 12. Kurva da/dN vs ΔK spesimen 1100



Gambar 13. Kurva da/dN vs ΔK spesimen 1500

Gambar 11 – 13 menunjukkan kurva hasil uji fatik dalam skala log, dengan sumbu x adalah nilai ΔK dan sumbu y adalah da/dN . Laju perambatan retak fatik paling rendah pada nilai ΔK kurang dari 7 $MPa.m^{0,5}$ terjadi pada spesimen 1500, sedangkan pada spesimen lain laju perambatan retak fatik lebih tinggi. Hal ini kemungkinan besar dipengaruhi oleh

turunnya nilai tegangan sisa pada daerah pengelasan karena munculnya pengaruh perlakuan *transient thermal tensioning* dengan posisi pemanas (*heater*) yang ditempatkan di depan *tool* dan suhu pemanas 200°C. Laju perambatan retak fatik pada spesimen *as welded* paling tinggi diantara spesimen yang lain, hal ini dimungkinkan karena adanya pengaruh nilai tegangan sisa tarik pada daerah pengelasan yang cukup besar. Nilai konstanta paris berupa nilai *n* dan *A* diperoleh dengan menarik garis *trendline* pada masing-masing kurva uji fatik. Nilai konstanta paris ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Nilai konstanta paris

Spesimen	n	A
<i>As welded</i>	2,8845	1,7101E-07
1100	6,4525	7,3550E-11
1500	3,4808	4,9010E-10

Kesimpulan

Hasil penelitian pengelasan FSW paduan aluminium AA2024-T3 tebal 3 mm tanpa perlakuan TTT dan dengan perlakuan TTT dapat disimpulkan bahwa zona struktur mikro hasil pengelasan terbagi dalam zona base metal, HAZ, TMAZ, NZ, TMAZ, HAZ dan base metal. Bentuk struktur mikro pada daerah NZ adalah *fine grain equiaxed*. Sifat mekanis berupa nilai kekuatan tarik tertinggi diperoleh pada spesimen 1500, dengan profil patahan getas dan perpatahan terjadi pada daerah NZ. Laju perambatan retak fatik terbaik pada spesimen 1500 pada nilai ΔK kurang dari 7 MPa.m^{0,5}.

Ucapan terimakasih

Peneliti menyampaikan ungkapan terimakasih pada Politeknik Negeri Cilacap atas pendanaan yang diberikan untuk penelitian ini melalui Dana Penelitian Internal dengan nomor kontrak 190/PL43/PM.01.01/2022 tanggal 02 Juni 2022.

Referensi

[1] Mishra, R. S., Ma, Z. Y., 2005, Friction stir welding and processing,

Materials Science and Engineering R: Reports, 50(1–2), 1–78.

- [2] Cavaliere, P. E., Squillace, A., 2005, Mechanical response of 2024-7075 aluminium alloys joined by Friction Stir Welding, *Journal of Materials Science*. Vol. 40, pp. 3669-3676
- [3] Sutton, M. A., Yang, B., Reynolds, A. P., dan Yan, J., 2004, Banded microstructure in 2024-T351 and 2524-T351 aluminum friction stir welds. Part II. Mechanical characterization, *Materials Science and Engineering A*, 364(1–2), 66–74.
- [4] Guo, J. F., Chen, H. C., Sun, C. N., Bi, G., Sun, Z., dan Wei, J., 2014, Friction stir welding of dissimilar materials between AA6061 and AA7075 Al alloys effects of process parameters, *Materials and Design*, 56, 185–192.
- [5] Song, J., dan Zhang, Y., 2016, Effect of vibratory stress relief on fatigue life of aluminum alloy 7075-T651, *Advances in Mechanical Engineering*, 8(6), 1–9.
- [6] Staley JT, Lege DJ, 1993. Advances in aluminium alloy products for structural applications in transportation, *Journal De Physique III*. 3:179-190.
- [7] Zhou, H., Yi, B., Shen, C., Wang, J., Liu, J., Wu, T., 2022, Mitigation of welding induced buckling with transient thermal tension and its application for accurate fabrication of offshore cabin structure, *Marine Structures*, 81(June 2021), 103104.
- [8] Polmear, I. J., 2006, *Light Alloys From Traditional Alloys to Nanocrystals* (fourth edi). Typeset by Integra Software Services Pvt. Ltd, Pondicherry, 4th edition, India www.integra-india.com Printed in United Kingdom.
- [9] Mathers, G., 2000, *Welding of aluminum and its alloys*, In *Welding of aluminum and its alloys*, 1st edition, Woodhead

Publishing Limited, Cambridge, England.

- [10] Al-Roubaiy, A. O., Nabat, S. M., dan DI Batako, A, 2019, An Investigation into Friction Stir Welding of Aluminium Alloy 5083-H116 Similar Joints, *Materials Today: Proceedings*, 22, 2140–2152.
- [11] Nugroho, E., Budiyanto, E., & Suseno, E. B. (2021). Experimental evaluation of mechanical properties of friction welded mild steel. *Turbo: Jurnal Program Studi Teknik Mesin*, 10(1).
- [12] Budiyanto, E. (2020). *Pengujian Material*. Laduny Alifatama.
- [13] Budiyanto, E., & Yuono, L. D. *Proses Manufaktur*. Eko Budiyanto.