

## PENGARUH PERLAKUAN MEKANIKAL PADA PENGELASAN FRICTION STIR WELDING (FSW) ALUMINIUM AA2024-T3

Pujono<sup>1\*</sup>, Dian Prabowo<sup>2</sup>, Ipung Kurniawan<sup>3</sup>, Joko Setia Pribadi<sup>4</sup>, Muhamad Yusuf<sup>5</sup>

<sup>1,2,3,4</sup>Jurusan Rekayasa Mesin dan Industri Pertanian, Politeknik Negeri Cilacap  
Jl. Dr. Soetomo No 01, Sidakaya, Cilacap, Jawa Tengah 53212

<sup>5</sup>Jurusan Rekayasa Elektro dan Mekatronika, Politeknik Negeri Cilacap  
Jl. Dr. Soetomo No 01, Sidakaya, Cilacap, Jawa Tengah 53212

\*Corresponding author: [pujono@pnc.ac.id](mailto:pujono@pnc.ac.id)

### Abstract

Aluminum is a type of light metal widely used and is the main metal in the construction of transportation equipment. AA2024-T3 series aluminum alloy is one type that is widely used in aircraft fuselages. This is because the AA2024-T3 series aluminum alloy has good formability, is corrosion-resistant, and is lightweight. The use of this alloy in construction that requires welded joints, especially MIG or TIG welding, turns out to produce poor performance because it produces porosity and hot cracking. One solution to improve the quality of the weld results on AA2024-T3 is to carry out welding using the friction stir welding (FSW) method. FSW is solid-state welding that does not require additional materials and is energy-efficient and environmentally friendly. The problems that arise in FSW welding results are quite large distortions and a decrease in the mechanical properties of the weld results. Because additional treatment is needed to overcome this problem, including providing mechanical treatment in the form of rolling. The method used is to provide FSW post-weld rolling treatment with a load of 300 kg. To determine the impact of rolling treatment, distribution measurements, macro and micro photo tests, hardness distribution tests, and tensile strength tests were carried out. The highest tensile strength was obtained in the mechanical specimen, namely 334.6 MPa, while the welded specimen obtained a tensile stress value of 333.5 MPa. The micro grains in the weld area are equiaxed fine grains. The distortion values and distribution between the two specimens are almost similar, and it seems that post-weld rolling treatment with a load of 300 kg does not have a significant impact.

**Keywords :** aluminum, rolling, friction stir welding, distortion

### Abstrak

Aluminium merupakan salah satu jenis logam ringan yang banyak digunakan dan menjadi logam utama pada konstruksi alat transportasi. Aluminium paduan seri AA2024-T3 menjadi salah satu tipe yang banyak digunakan pada badan pesawat terbang. Hal ini karena paduan aluminium seri AA2024-T3 memiliki sifat mampu bentuk (*formability*) yang baik, tahan terhadap korosi dan memiliki berat yang ringan. Penggunaan paduan ini pada konstruksi yang memerlukan penyambungan las khususnya las MIG atau TIG, ternyata menghasilkan performa yang tidak baik karena menghasilkan porositas dan retak panas (*hot cracking*). Salah satu solusi untuk memperbaiki kualitas hasil las pada AA2024-T3 adalah dengan melakukan pengelasan menggunakan metode *friction stir welding* (FSW). FSW merupakan pengelasan *solid state* yang tidak memerlukan bahan tambah, hemat energi dan ramah lingkungan. Permasalahan yang muncul pada hasil las FSW adalah adanya distorsi yang cukup besar dan menurunnya sifat mekanik hasil las. Oleh karena diperlukan perlakuan tambahan untuk mengatasi masalah tersebut, diantaranya adalah dengan memberikan perlakuan mekanik berupa rolling. Metode yang digunakan adalah memberikan perlakuan rolling pasca las FSW dengan beban 300 kg. Untuk mengetahui dampak dari pemberian perlakuan rolling maka dilakukan pengukuran distorsi, uji foto makro dan mikro, uji distribusi kekerasan dan pengujian kekuatan tarik. Kekuatan tarik tertinggi diperoleh pada spesimen mekanikal yaitu 334.6 MPa, sedangkan pada spesimen *as welded* diperoleh nilai tegangan tarik sebesar 333.5 MPa. Butiran mikro pada daerah las berbentuk *fine grain equiaxed*. Nilai distorsi dan distribusi antar kedua spesimen hampir serupa, dan nampaknya perlakuan *rolling* pasca las dengan beban 300 kg tidak memberikan dampak yang signifikan.

**Kata kunci :** aluminium, rolling, friction stir welding, distorsi.

## 1. Pendahuluan

Industri penerbangan dalam negeri

terus berkembang dan mengalami pertumbuhan yang signifikan. Salah satu faktornya adalah kondisi geografis Indonesia

DOI: <http://dx.doi.org/10.24127/trb.v12i2.2941>

Received 19 November 2023; Received in revised form 23 November 2023; Accepted 01 December 2023

Available online 31 December 2023

391



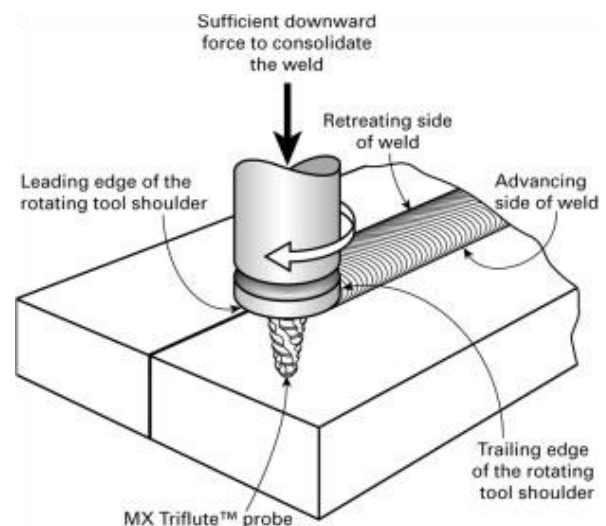
yang merupakan negara kepulauan sehingga memerlukan adanya transportasi udara yang baik seperti pesawat terbang untuk konektivitas antar pulau dan sekaligus mendorong pertumbuhan ekonomi. Pemerintah telah menerbitkan Peraturan Pemerintah Nomor 14 Tahun 2015 tentang Rencana Induk Pembangunan Industri Nasional Tahun 2015-2035, yang menetapkan fokus pengembangan industri alat transportasi kedirgantaraan sampai tahun 2035 adalah pengembangan pesawat, komponen pesawat, dan perawatan pesawat.

Salah satu bahan utama untuk konstruksi pesawat terbang adalah aluminium paduan seperti AA2024-T3. Paduan AA2024-T3 memiliki ketangguhan patah dan karakteristik perambatan retak lelah yang sangat baik dan banyak digunakan pada badan pesawat (*fuselage*) [1]. Salah satu kelemahan AA2024-T3 adalah sifat mampu las (*weldability*) rendah karena selalu terjadi retak pembekuan saat proses pengelasan berlangsung. Beberapa metode pengelasan yang sudah dikembangkan hanya metode pengelasan *friction stir welding* (FSW) yang tepat untuk material aluminium paduan. Pengelasan FSW menghasilkan kualitas hasil sambungan las yang baik, mampu menghilangkan atau meminimalkan distorsi, porositas dan juga retak panas [2]. Salah satu kelemahan pengelasan FSW adalah sifat mekanisnya yang lebih rendah dibandingkan dengan logam induknya. Selain itu, pengelasan FSW menyebabkan panas lokal yang berlebihan dan tegangan sisa. Penggetasan (*embrittlement*) dan retak korosi tegangan (*stress corrosion cracking*) dapat disebabkan oleh tegangan sisa las.

Paduan aluminium yang banyak digunakan untuk struktur pesawat adalah aluminium paduan seri AA2024-T3. Komponen pesawat yang menggunakan aluminium paduan ini adalah *body* pesawat (*fuselage*), *border body* pesawat dan sayap atau wing [1]. Hal ini karena paduan seri AA2024-T3 banyak memiliki keunggulan sifat mekanik yang sesuai dengan kebutuhan atau spesifikasi komponen pesawat, akan

tetapi jika pembuatan komponen pesawat melalui proses pengelasan, maka seri AA2024-T3 tidak begitu sesuai untuk pesawat karena kualitas hasil sambungan lasnya jelek. Perlu metode pengelasan lain untuk mengatasi masalah ini, dan metode *friction stir welding* (FSW) menjadi metode pengelasan yang tepat untuk meningkatkan kualitas sambungan las AA2024-T3 karena dengan metode FSW ini kegagalan las seperti porositas, distorsi dan retak panas dapat dihindari.

Skematik pelaksanaan metode las *friction stir welding* (FSW) dapat dilihat pada gambar 1. Pengelasan FSW adalah metode pengelasan *solid state welding* atau las padat [2]. Pengelasan dilakukan dengan menggunakan alat bantu berupa *tool* yang tersusun dari *shoulder* dan *pin* yang diputar dengan kecepatan tertentu sambil dimasukkan ke dalam spesimen pengelasan. Tool kemudian digerakan ke arah pengelasan dengan kecepatan (*feeding*) tertentu, sampai terbentuk sambungan las [3]. Melalui metode FSW inilah memungkinkan hasil sambungan las AA2024-T3 tidak akan terjadi *hot cracking* atau retak panas.



Gambar 1. Pengelasan FSW [2]

Permasalahan utama pada pengelasan terutama jika diaplikasikan untuk bahan pesawat terbang yang mengalami beban dinamis adalah terbentuknya tegangan sisa akibat siklus thermal selama pengelasan berlangsung, laju pemuaihan dan penyusutan di

sekitar sambungan las dengan bagian lain yang temperaturnya relatif lebih dingin tidak sama sehingga menyebabkan perubahan modulus elastisitas  $E$ , tegangan luluh, Poisson's ratio, dll. Tegangan sisa ini dapat menyebabkan penggetasan sambungan las, menurunkan kekuatan lelah (*fatigue strength*) dan retak korosi tegangan (*stress corrosion cracking*) seperti dilaporkan oleh Messler [4]. Berbagai penelitian telah dilakukan dalam upaya untuk mengurangi tegangan sisa pada las. Beberapa hasil penelitian memnunjukkan bahwa tegangan sisa longitudinal maksimum terjadi di bagian las dan berupa tegangan tarik yang besarnya sama dengan nilai tegangan luluhnya sedangkan tegangan sisa pada kaki las (*weld toe*) merupakan penyebab timbulnya retak awal [5]. Secara umum teknik pengendalian tegangan sisa dan distorsi bisa dilakukan sebelum atau saat pengelasan (*in-process welding*) atau setelah pengelasan (*post weld treatment*) sedangkan dari aspek gaya/tegangan yang diperlukan, teknik pengendalian tegangan sisa dan distrosi dapat dikelompokkan menjadi perlakuan mekanik (*mechanical treatment*) atau perlakuan termal (*thermal treatment*). Pemanfaatan efek thermal untuk mitigasi tegangan sisa mula pertama dilakukan oleh Burak dkk. [6]. Disamping prinsip thermal, pengendalian tegangan sisa dan distrosi dengan memanfaatkan efek tarikan mekanis juga dikembangkan mengingat teknik ini lebih ramah lingkungan, tidak menyebabkan perubahan mikrostruktur seperti halnya metode termal dan mudah dalam mengoperasikan [7]. Studi tentang pengaruh penarikan mekanis (*mechanical tensioning*) telah dilakukan oleh Price dkk., [8] dengan hasil menunjukkan bahwa pemberian tarikan mekanis dapat mengurangi tegangan sisa dan distorsi

## 2. Metode Penelitian

### Material

Penelitian ini dilakukan menggunakan pelat lembaran aluminium seri AA2024-T3 dengan tebal spesimen 3 mm, panjang 300 mm dan lebar 10 mm yang disambung dengan las FSW. Baja AISI H13 dipilih sebagai bahan

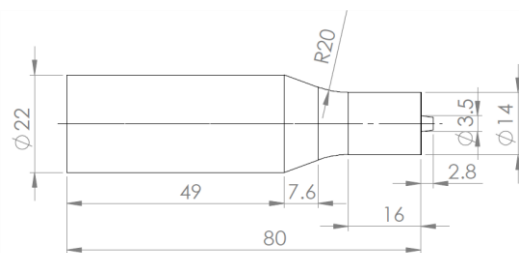
*tool* untuk pengelasan FSW. Komposisi kimia aluminium AA2024-T3 dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi kimia AA2024-T3

Material	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Al
AA2024-T3	0.1	4.85	0.5	1.2	0.9	Bal.

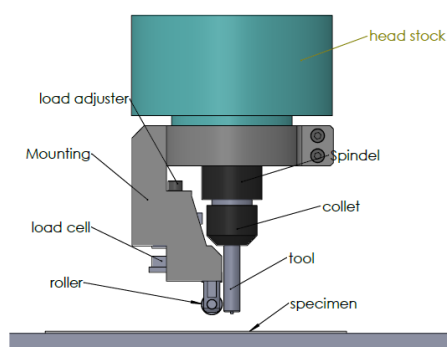
### Pengelasan FSW

Metode *friction stir welding* (FSW) akan dilakukan untuk menyambung pelat AA2024-T3 dengan dua variasi, yaitu pengelasan FSW (*as welded*) dan pengelasan FSW yang dilanjutkan dengan proses mekanikal *rolling* pasca pengelasan (mekanikal). Parameter las yang digunakan yaitu kecepatan putar 1100 rpm, *feeding* 30 mm/menit. Geometri alat bantu (*tool*) las yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 2.

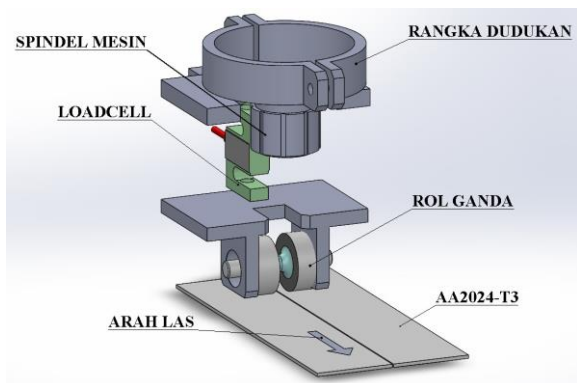


Gambar 2. Geometri *tool*.

Pengelasan FSW akan dilakukan dengan 2 tahap yaitu pengelasan FSW dan pengelasan FSW dengan *rolling* yang dilakukan setelah pengelasan dengan beban roll 300kg (3000N), Skema pengelasan FSW ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Skema pengelasan FSW dan pengerolan  
Konstruksiudukan *roller* untuk proses *rolling* ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Konstruksiudukan roller

### Pembuatan roller

Bahan roller yang digunakan AISI H13 yang merupakan jenis baja *tool steel*. Komposisi kimia baja AISI H13 ditunjukkan pada tabel 3 [8].

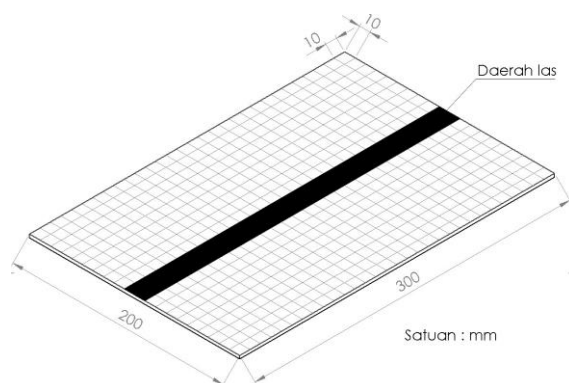
Tabel 3. Komposisi kimia (%) AISI H13

Nama	C	Mn	Si	Cr	Mo	V
AISI H13	0.32-0.45	0.2-0.5	0.8-1.2	4.75-5.5	1.1-1.75	0.8-1.2

### Pengukuran distorsi

Pengukuran distorsi dilakukan untuk mengetahui besarnya nilai distorsi akibat proses pengelasan. Pengukuran dilakukan secara manual dengan menggunakan dial indikator dan mesin grinding milling (frais). Pengukuran dilakukan pada permukaan spesimen dengan jarak antar ukuran adalah 10mm atau ada 300 buah titik pengukuran.

Ilustrasi titik-titik pengukuran distorsi ditunjukkan pada Gambar 5.



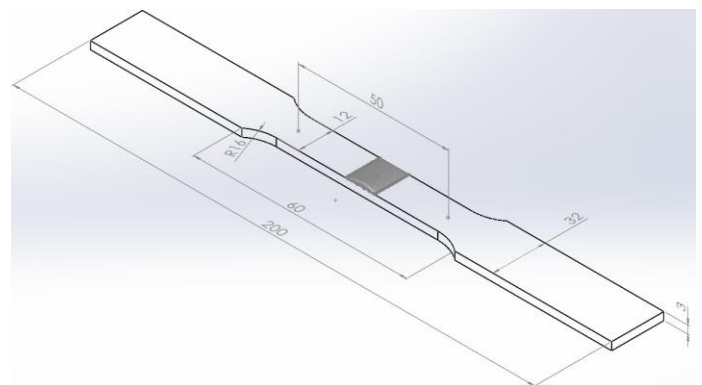
Gambar 5. Titik pengukuran distorsi

### Struktur Mikro

Pengujian untuk mendapatkan foto mikro pada spesimen dilakukan menggunakan mikroskop optik. Agar diperoleh foto mikro yang baik maka perlu disiapkan spesimen dengan optimal. Spesimen disiapkan dengan cara melakukan grinding menggunakan amril atau ampelas dari ukuran kekasaran sekitar 250 sampai ukuran yang halus yaitu 5000 hal ini dilakukan untuk mendapatkan permukaan spesimen yang rata dan halus. Selanjutnya permukaan spesimen dikilapkan dengan menggunakan autosol. Untuk menampilkan foto mikro maka spesimen harus dikorosikan menggunakan cairan kimia tertentu. Proses ini dinamakan pengetsaan (*etching*). Cairan kimia yang sesuai untuk aluminium paduan seri AA2024-T3 adalah cairan kimia dengan komposisi 190 ml H<sub>2</sub>O + 5 ml HNO<sub>3</sub> + 3 ml HCl + 2 ml HF atau yang biasa disebut reagen Keller [10]

### Pengujian Tarik

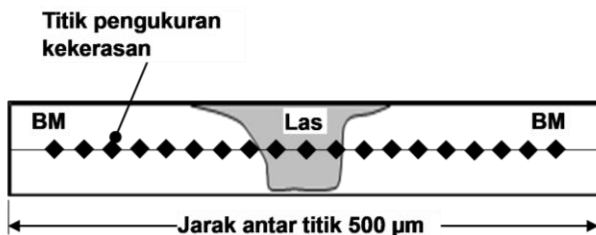
Salah satu pengujian yang mampu menghasilkan beberapa sifat mekanik material adalah pengujian tarik. Pengujian tarik akan memberikan hasil diantaranya adalah kekuatan tarik, keuletan, modulus elastisitas, modulus resilien, elastisitas dan plastisitas. Pelaksanaan pengujian ini harus mengacu pada salah satu standar uji baik dari JIS, DIN, ASTM maupun standar uji lainnya, agar nilai sifat mekanik sebuah material akan sama dimanapun pengujian itu dilakukan. Untuk penelitian kali ini pengujian tarik akan dilakukan sesuai dengan standar ASTM E-8. Profil dan dimensi spesimen uji tarik ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar. 6 Spesimen uji tarik

### Pengujian kekerasan

Uji kekerasan dilakukan dengan pengujian kekerasan metode microVickers (VHN) dengan indentor yang kecil (*microhardness*) sehingga variasi kekerasan sebagai akibat dari variasi struktur mikro di daerah las dan HAZ dapat diidentifikasi. Beban yang digunakan adalah 500gram, dengan jarak antar titik uji adalah 500 $\mu$ m. Pengujian dilakukan melintang mulai dari logam induk atau *base metal* (BM), HAZ, TMAZ, NZ dan sampai ke BM lagi. Ilustrasi titik uji kekerasan ditunjukkan pada gambar 7.



Gambar 7. Titik uji kekerasan

### Uji fraktografi

Permukaan patahan hasil uji tarik akan dilakukan pengamatan profil patahan menggunakan metode SEM (*scanning electrone microscope*)

## 3. Hasil dan Pembahasan

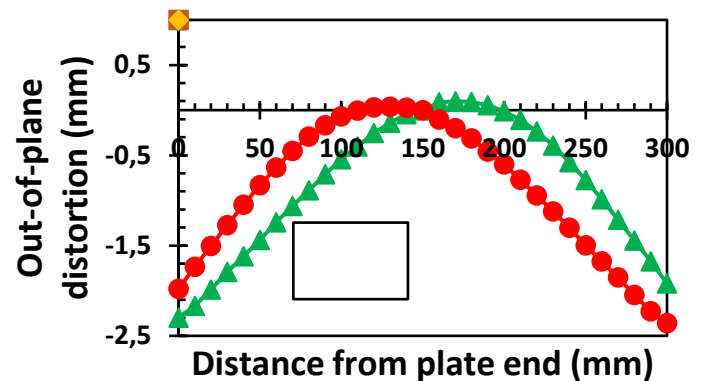
### Pembuatan roller

Material yang digunakan sebagai bahan roller adalah baja AISI H13. Proses pembuatan dilakukan dengan proses pemesinan bubut presisi dan dilanjutkan dengan proses *hardening*. Proses pemanasan dilakukan secara bertahap sampai tercapai suhu *hardening* yaitu 1040°C [9] dan dilanjutkan dengan proses *quenching* menggunakan media pendingin berupa oli. Hasil *hardening* diuji kekerasannya menggunakan metode rockwell C dan dihasilkan nilai kekerasan sebesar 47 HRC.

### Distorsi

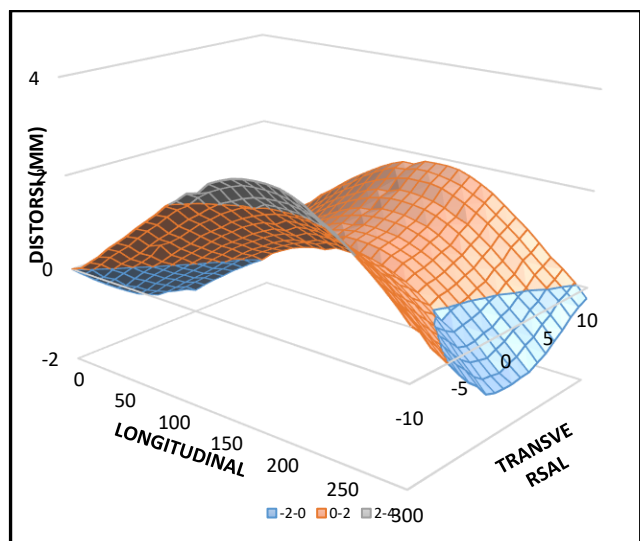
Hasil pengukuran distorsi menunjukkan bahwa distorsi yang terjadi sepanjang permukaan spesimen membentuk profil cembung. Tidak ada perbedaan signifikan antara distorsi yang terjadi pada spesimen *as welded* dan spesimen mekanikal. Profil

pengukuran distorsi ditunjukkan pada Gambar 8.

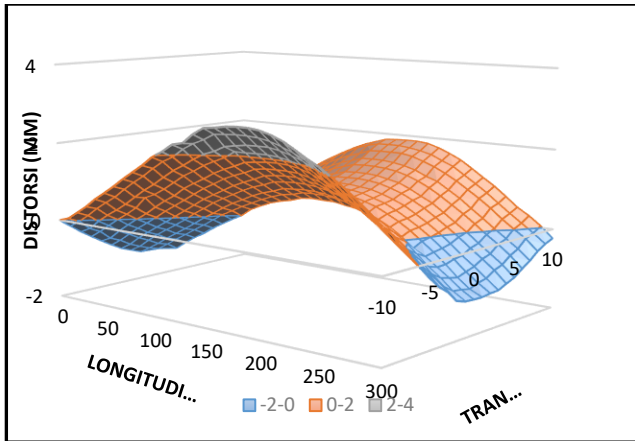


Gambar 8. Hasil pengukuran distorsi

Nilai distorsi terbesar yang terukur adalah 2.34 mm yang terjadi pada sisi kanan-kiri arah las pada spesimen *as welded*. Distorsi terjadi karena pengaruh suhu pada saat proses pengelasan. Pada gambar 9 ditunjukkan sebaran nilai distorsi pada spesimen *as welded*, sedangkan pada gambar 10 ditunjukkan sebaran nilai distorsi pada spesimen mekanikal



Gambar 9. Distorsi spesimen *as welded*

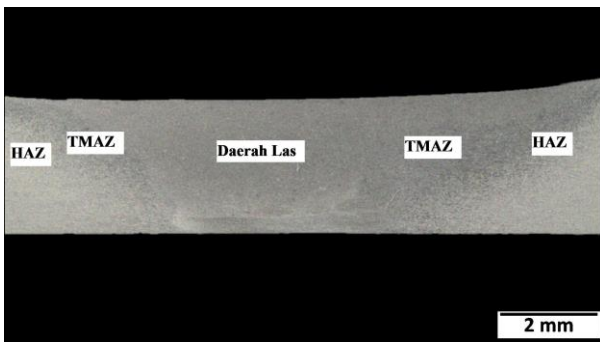


Gambar 10. Distorsi spesimen mekanikal

Distorsi yang terjadi pada spesimen mekanikal lebih kecil, hal ini dimungkinkan karena efek gaya *rolling* mampu menjaga spesimen dari distorsi.

**Struktur Mikro**

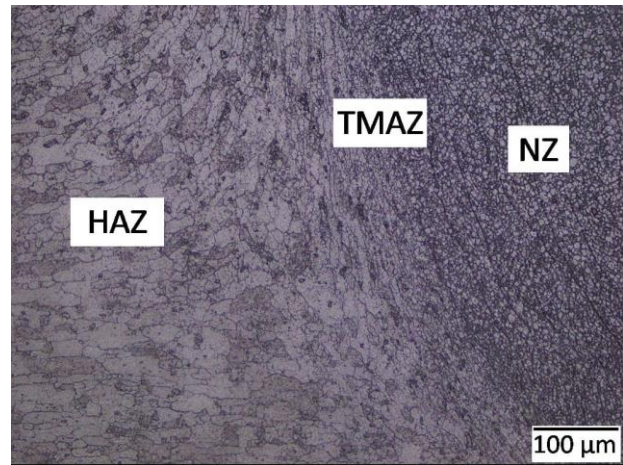
Struktur makro pada gambar 11 menunjukkan tentang profil pembagian daerah las yang muncul pada proses pengelasan FSW. Terlihat dibagian tengah adalah daerah pengelasan (*nugget zone/NZ*), disamping kanan-kirinya adalah daerah TMAZ (*thermo-mechanically affected zone*) dan selanjutnya adalah daerah HAZ (*heat affected zone*).



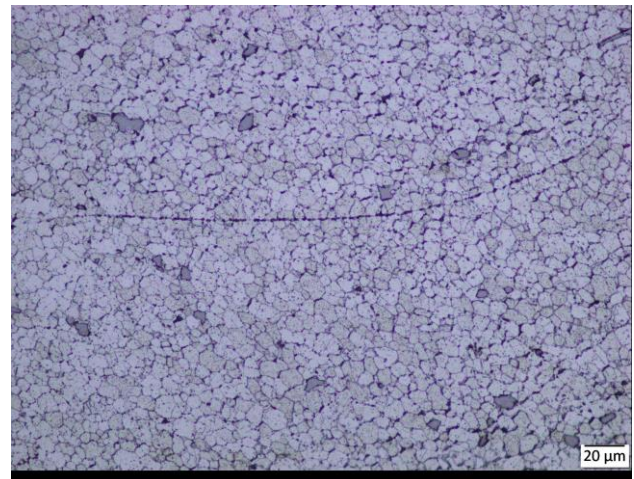
Gambar 11. Struktur makro las FSW

Foto mikrostruktur antara daerah las, TMAZ dan HAZ secara jelas ditunjukkan pada gambar 12. Terlihat bahwa butiran pada *nugget* lebih kecil, sedangkan butiran pada daerah HAZ berbentuk pipih dengan ukuran yang lebih besar. Butiran yang halus pada daerah las untuk masing-masing spesimen ditunjukkan pada Gambar 13 dan 14. *Heat input* tertinggi selama proses pengelasan FSW terjadi pada daerah las (*nugget*), hal ini

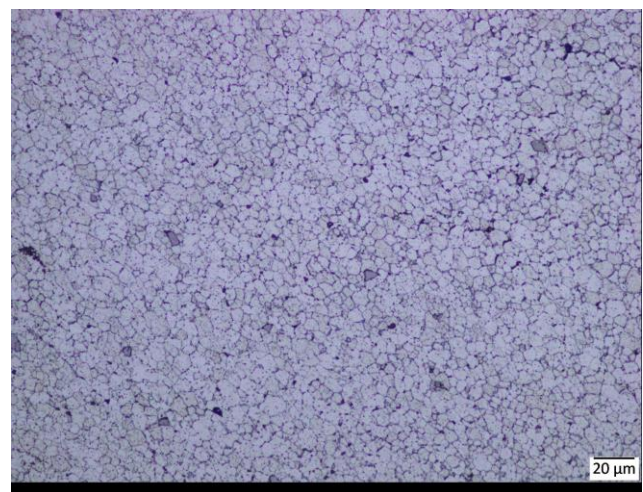
menyebabkan butiran pada daerah las menjadi halus dan memungkinkan terjadinya *precipitation hardening*.



Gambar 12. Foto struktur mikro *Nugget zone*, TMAZ dan HAZ



Gambar 13. Struktur mikro daerah spesimen *as welded*

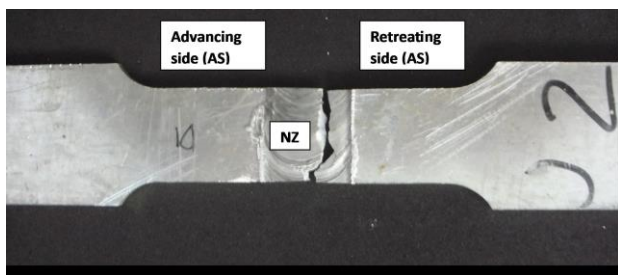


Gambar 14. Struktur mikro daerah spesimen mekanikal

Daerah las merupakan daerah yang mengalami proses *stirring* dari las FSW, sehingga butiran yang terbentuk menjadi lebih halus.

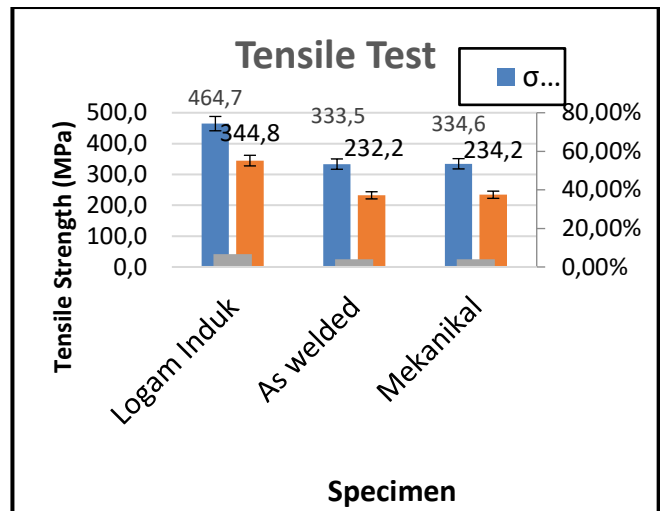
### Uji Tarik

Gambar 15 menunjukkan bahwa daerah perpatahan uji tarik terjadi pada daerah las mendekati wilayah TMAZ. Hal ini menunjukkan bahwa daerah las memiliki kekuatan yang paling lemah dibandingkan dengan wilayah lainnya.



Gambar 15. Penampang patah uji tarik

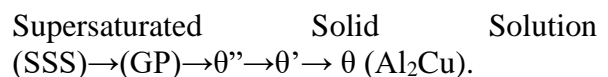
Patahan hasil uji tarik terjadi pada daerah las dan menunjukkan profil garis yang tegak lurus terhadap arah gaya tariknya. Hal ini menunjukkan bahwa perpatahan yang terjadi adalah jenis patah getas. Nilai tegangan tarik antara kedua spesimen tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan. Gambar 16 menunjukkan hasil uji tarik berupa nilai tegangan tarik maksimal dan tegangan luluh. Tegangan tarik terbesar terjadi pada spesimen mekanikal dengan nilai tegangan tarik sebesar 334.6 MPa, sedangkan pada spesimen *as welded* diperoleh nilai tegangan tarik sebesar 333.5 MPa. Perbedaan nilai tegangan tarik antara kedua spesimen sangat kecil bahkan hampir sama, dan ini nampaknya perlakuan *rolling* setelah pengelasan dengan beban 300 kg ini belum memberikan dampak yang signifikan pada nilai tegangan tarik.



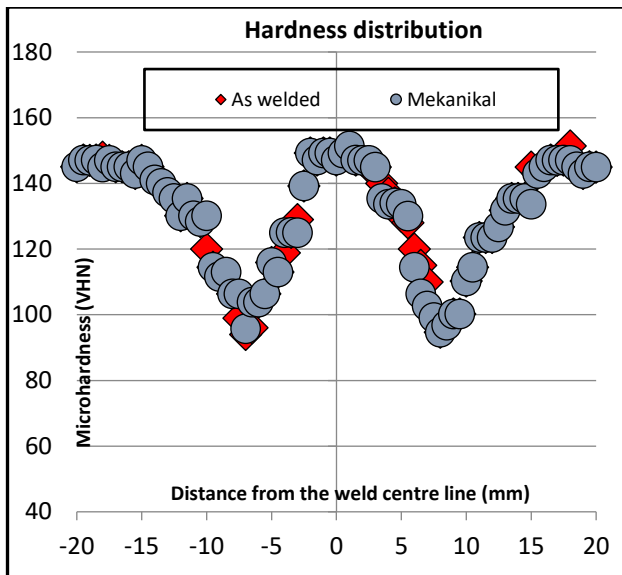
Gambar 16 Hasil uji tarik

### Distribusi nilai kekerasan

Nilai distribusi kekerasan mikrovickers menunjukkan bentuk profil W, hal ini sama dengan penelitian sebelumnya [11][12]. Nilai kekerasan pada logam induk adalah sekitar 149 VHN, kemudian nilai mulai turun saat memasuki wilayah HAZ dan TMAZ. Nilai kekerasan kembali naik pada daerah las dengan nilai yang hampir sama dengan kekerasan logam induk. Fenomena nilai kekerasan pada daerah las, kemungkinan besar terjadi karena adanya proses *precipitation hardening*, yaitu terbentuknya fasa kedua ( $\theta$ ) pada saat proses pemanasan dan pendinginan. Secara teoritis proses terjadinya *precipitation hardening* dapat digambarkan sebagai berikut [13]:



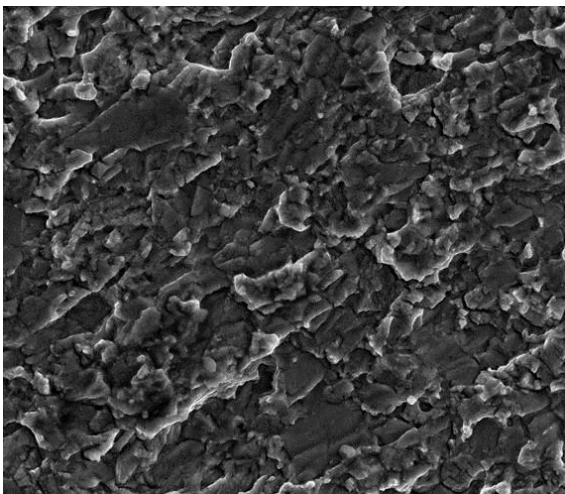
Distribusi nilai kekerasan ditunjukkan pada Gambar 17.



Gambar 17. Distribusi nilai kekerasan

### Uji fraktografi

Foto SEM pada daerah patahan uji tarik dilakukan dengan perbesaran 1000x, dan menunjukkan bentuk patahan getas. Foto SEM dapat dilihat pada Gambar 18



Gambar 18. Foto SEM spesimen *as welded*

### Kesimpulan

Beberapa kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian pengelasan FSW tanpa perlakuan dan dengan perlakuan mekanikal pasca las adalah bahwa truktur mikro pada daerah las lebih halus dibandingkan pada daerah las yang lain

Perpatahan uji tarik terjadi pada daerah las, dengan nilai kekuatan tarik pada spesimen mekanikal sebesar yaitu 334.6 MPa, sedangkan pada spesimen *as welded*

diperoleh nilai tegangan tarik sebesar 333.5 MPa

Distorsi yang terjadi membentuk profil cembung, serta profil distribusi nilai kekerasan membentuk huruf W

Secara umum, bahwa perlakuan mekanikal yang diterapkan tidak memberikan dampak yang signifikan terhadap sifat mekanik pengelasan.

### Ucapan Terima Kasih

Ucapan terimakasih yang sebesar-besarnya Peneliti sampaikan kepada Politeknik Negeri Cilacap yang telah memberikan dukungan pendanaan penelitian melalui Dana Hibah Penelitian internal tahun 2023 dengan nomor kontrak 080/PL43/HK.07/2023 Tanggal 3 Juli 2023.

### Referensi

- [1] Farid Akhmad, Basic Material Selection Design of Aluminium in Aircraft Structure, Prosiding seminar nasional perkembangan riset dan teknologi di bidang industri ke 16, Fakultas Teknik UGM, 2006
- [2] Thomas, W.M., Johnson, K. I., Wiesner, C. S., Friction stir welding-recent developments in tool and process technologies, advanced engineering materials, No 7, DOI: 10.1002/adem200300355, 2003.
- [3] Nakata K., Kim YG, Ushio M, Hashimoto T and Jyogan S, 2000, Weldability of high strength aluminium alloys by friction stir welding, ISIJ International, vol.40, pp. S15-S19.
- [4] Messler RW, Jr. Principles of welding: Processes, physics, chemistry, and metallurgy. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1999, pp.181-215.
- [5] Lancaster JF, 1999, Metallurgy of Welding, Abington Publishing, Cambridge, UK.
- [6] Burak YaI, Romanjuk YaP, Kazimirov AA, Morgun VP, 1979. Selection of the optimum fields for preheating plates before welding. Avtom Svarka, 314(5):5-9.

- [7] Song J, Zhang Y. Effect of vibratory stress relief on fatigue life of aluminum alloy 7075– T651. *Advances in Mechanical Engineering* 2016;8:1–9.
- [8] Price DA, Williams SW, Wescott A, Harrison CJC, Rezai A, Steuwer A, Peel M, Staron P, Kocak M, 2007. Distortion control in welding by mechanical tensioning. *Science and Technology of Welding and Joining*, 12(7)620-633.
- [9] ASM Handbook, Volume 4 heat treating, ASM International, the material information company, 1991
- [10] ASTM International, Standard practice for microetching metals and alloys, ASTM E407-99, ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States, 2015
- [11] Alemdar, A.S.A., Jalal, S.R., Mulapper, M. S., Influence of Friction Stir Welding Process on the Mechanical Characteristics of the Hybrid Joints AA2198-T8 to AA2024-T3, *Advances in Materials Science and Engineering* Volume, Article ID 7055446, 11 pages <https://doi.org/10.1155/2022/7055446>, 2022
- [12] Li, N., Li, Y. W., Yang, X.W., Feng, Y., Vairis, A., An investigation into the mechanism for enhanced mechanical properties in friction stir welded AA2024-T3 joints coated with cold spraying, *Applied Surface Science* 439, 623-631, 2018.
- [13] C. Y. Lin, Y. C. Xia, Y. Q. Jiang, H. M. Zhou, and L. T. Li, Precipitation hardening of 2024-T3 aluminum alloy during creep aging, *Materials Science & Engineering A* 565 (2013), 420–429.