

EFEK FRICTION STIR SPOT WELDING DALAM PEMASANGAN RIVET TERHADAP SIFAT MEKANIK MATERIAL ALMUNIUUM SERI 2024

¹Sehono, ²Haris Ardianto

¹Aeronautika, STTKD, ²Teknik Dirgantara, STTKD

Abstrak

Melakukan pemilihan dan perlakuan pada suatu material merupakan hal yang sangat penting. Khususnya dibidang industri kedirgantaraan, mariner, alat transportasi dan industri manufaktur merupakan tujuan dalam pengembangan material tersebut. Bahan aluminium merupakan logam yang ringan dan memiliki ketahanan korosi yang baik, hantaran listrik yang baik dan sifat-sifat lainnya. Paduan ini memiliki keunggulan, yaitu pada perbandingan kekuatan yang dihasilkan dengan berat struktur yang lebih tinggi daripada baja, ketahanan lelah yang baik, keuletan serta sifat mampu bentuk yang tinggi. Dibidang manufaktur saat ini telah dikembangkan teknologi penyambungan yang mana hal tersebut berawal dari cara konvensional seperti riveting (paku keling), sambungan susut tekan, hingga kini dilakukannya proses pengelasan. Friction stir spot welding sebuah metode untuk menggabungkan lembaran atau pelat dengan pekerjaan termomekanis yang awalnya dikembangkan untuk industri otomotif. Keunggulan dari metode (FSSW) tidak menggunakan busur listrik untuk menyambungkan potongan logam, tidak menghasilkan asap atau radiasi berbahaya, juga tidak memerlukan personel yang berkualifikasi tinggi. Selain itu, tidak meninggalkan tegangan sisa yang kecil dan hasil permukaan yang baik. Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah paduan aluminium 2024 dengan dimensi 200 x 20 x 2 mm. Proses pengelasan dilakukan dengan putaran mesin 2500 rpm. Parameter lainnya yaitu dilakukan proses drilling pada plat aluminium kemudian penggunaan tool untuk FSSW dengan tool ukuran diameter 2.5 mm. Kemudian pengamatan yang dilakukan meliputi pengukuran temperatur, uji geser, kekerasan, makro dan mikro struktur. Hasil pengujian didapatkan bahwa metode FSSW dapat mengubah ukuran butiran pada daerah HAZ, tingkat kekerasan meningkat dan kekuatan geser juga terjadi peningkatan. Penggunaan metode FSSW memberikan hasil pada peningkatan kekerasan pada daerah las. Sebagai kesimpulannya, perlakuan FSSW pada aluminium 2024 memberikan hasil yang maksimal pada setiap pengujian dibandingkan dengan proses.

Kata kunci: aluminum 2024, FSSW, Drilling

Abstract

Perform the selection and treatment of a material is very important. Especially in the aerospace industry, mariner, transportation equipment and the manufacturing industry is the goal in the development of these materials. Aluminum is a light metal and has good corrosion resistance, good electrical conductivity and other properties. This alloy has advantages, namely in the ratio of the resulting strength to a higher structural weight than steel, good fatigue resistance, ductility and high formability. In the manufacturing sector, joining technology has been developed which starts from conventional methods such as riveting (rivets), compression shrinkage joints, until now the welding process is carried out. Friction stir spot welding is a method for joining sheets or plates by thermomechanical work originally developed for the automotive industry. The FSSW method are that it does not use an electric arc to connect metal pieces, does not produce harmful fumes or radiation, nor does it require highly qualified personnel. In addition, it does not leave a small residual stress and a good surface yield. The material used in this research is 2024 aluminum alloy with dimensions of 200 x 20 x 2 mm. The welding process is carried out with the engine speed of 2500 rpm. Another parameter is the drilling process on the aluminum plate and then the use of a tool for FSSW with a 2.5 mm diameter tool. Then the observations made include temperature measurements, shear tests, hardness, macros and micro structures. The test results showed that the FSSW method can change the grain size in the HAZ area, the hardness level increases and the shear strength also increases. The results is FSSW method in an increase in the hardness of the weld area. In conclusion, the FSSW treatment in 2024 aluminum gave maximum results in each test compared to the process.

Keywords: aluminum 2024, FSSW, Drilling.

Pendahuluan

Pemilihan dan pemberian perlakuan pada material merupakan hal yang sangat penting. Industri dalam bidang kedirgantaraan, mariner, alat transportasi dan industri manufaktur merupakan tujuan dalam

¹Email Address : sehono.ase@gmail.com

Received 1 Agustus 2021, Available Online 30 Desember 2021

pengembangan material tersebut. Penggunaan material aluminium saat ini banyak menjadi pilihan dalam bidang konstruksi, karena aluminium merupakan logam yang memiliki kekuatan yang relatif rendah dan lunak. Aluminium merupakan logam yang ringan dan memiliki ketahanan korosi yang baik, hantaran listrik yang baik dan sifat-sifat lainnya (Ramakrishnan, 1972). Pada umumnya aluminium dicampur dengan logam lainnya membentuk aluminium paduan. Aluminium 2024 merupakan paduan Al–Cu–Mg dengan kadar Al 90.7– 94.7%, Cu 3.8–4.9%, dan Mg 1.2–1.8% (Ozesmi et al., 1985). Paduan ini memiliki keunggulan pada perbandingan kekuatan yang dihasilkan dengan berat struktur yang lebih tinggi daripada baja, ketahanan leleh yang baik, keuletan serta sifat mampu bentuk yang tinggi. Selain sifat mekanik tersebut, sifat yang amat disukai pada paduan ini adalah sifat mampu dikuatkan dengan penuaan (*age-hardening*). Material ini dimanfaatkan bukan saja pada peralatan rumah tangga, tetapi juga dipakai untuk keperluan industri, konstruksi dan lain sebagainya.

Khususnya pesawat memiliki sistem yang kompleks diantaranya struktur dengan berbagai bahan, dimensi, dan bentuk bervariasi. Struktur yang relevan dengan proses penyambungan termasuk dibagian hidung, badan, belakang dan sayap. Sebuah struktur yang tidak bisa berdiri sendiri pada komponen contohnya bagian sayap memiliki skala besar serta bentuk yang kompleks, sehingga tidak dapat diproduksi satu lembar. Salah satu metode yang digunakan untuk membentuk sayap yang besar yaitu proses penyambungan (Zhao et al., 2020). Persyaratan utama dari karakteristik, bentuk dan dimensi bahan pesawat yaitu kuat dan handal.

Dalam bidang manufaktur saat ini telah dikembangkan teknologi penyambungan yang mana hal tersebut berawal dari cara konvensional seperti riveting (paku keling), sambungan susut tekan, hingga kini dilakukannya proses pengelasan (Yang et al., 2014). Sambungan adalah menghubungkan satu benda dengan lainnya. Ada dua jenis sambungan yaitu sambungan tetap (*permanent joint*) dan sambungan tidak tetap (*semi-permanent joint*). Penggunaan rivet banyak dipakai untuk plat-plat yang sukar dilas dan dipatri dengan ukuran yang relatif kecil. Selain itu ada beberapa keuntungan diantaranya proses penyambungan sederhana, intensitas penyambungan yang baik, efisien, tidak memerlukan tambahan bahan lain (Zhang et al., 2011). Penggunaan rivet dapat diaplikasikan dalam berbagai bidang salah satunya adalah penyambungan bodi pesawat terbang.

Friction stir welding (FSW) merupakan teknik pengelasan relatif baru yang dikembangkan oleh *The Welding Institute* (TWI) pada tahun 1991 (Mishra & Ma, 2005; Thomas & Nicholas, 1997). FSW termasuk dalam jenis teknik pengelasan padat (*solid state welding*), berbeda dengan jenis pengelasan lainnya yang terjadi pada kondisi cair, proses penyambungan FSW terjadi pada kondisi lumer (padat). Beberapa keuntungan dari proses ini diantaranya deformasi termal kecil, suara yang ditimbulkan kecil, mikrostruktur las yang halus dan seragam, efisiensi las yang tinggi dan proses pengelasan yang ramah. Pengembangan FSW sudah semakin meningkat, diantara bahan yang digunakan paduan Mg, Cu, Ti, Fe dan sebagainya. *Friction stir spot welding* (FSSW) merupakan bagian dari variasi FSW yang memberikan potensi dalam menggantikan proses penyambungan titik tunggal seperti pengelasan titik resistansi dan rivet (M. Li et al., 2020).

Metode baru untuk mengabungkan material dengan proses pengelasan, rivet dan teknologi *adhesive bonding* untuk mendapatkan sambungan bahan yang berbeda (Meschut et al., 2014). Menggunakan dua mekanisme melakukan pengeboran dan *friction stir spot welding* dalam penyambungan bahan aluminium 2024. Memanfaatkan teknologi pengelasan tersebut peneliti dapat mendapatkan mengetahui sifat mekanik yang terbaik, sehingga bisa diterapkan pada industri pesawat terbang. Untuk itu penelitian ini mengambil metode penyambungan dengan memakai proses *friction stir spot welding* dalam pemasangan rivet pada materi aluminium seri AA2024.

Tinjauan Pustaka dan Pengembangan Hipotesis

Alumunium 2024

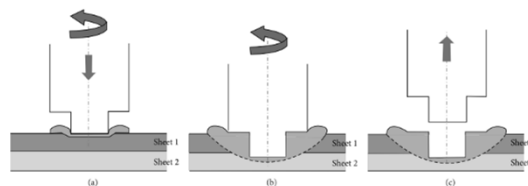
Paduan aluminium merupakan material rekayasa yang banyak digunakan untuk kepentingan konstruksi kedirgantaraan karena sifatnya yang ringan dan kuat. Kedua sifat tersebut merupakan syarat utama suatu material dapat dijadikan bahan dasar struktur pesawat terbang. Aluminium sekarang sudah banyak dipakai bahan bodi pesawat diantaranya seri 2024 yang memiliki kekuatan lebih baik serta tahan terhadap korosi seperti pada Gambar 1(I. Galvão 1,*, D. Verdera 2, D. Gesto 2 & 1, n.d.). Seri 2024 sendiri memiliki presentasi unsur yang terkandung diantaranya 4,4% Cu, 1,5% Mg, dan 0,6% Mn. Berikut data sifat mekanik aluminium paduan 2024 ASM Handbook Tabel 1.

Table 1. Sifat Mekanik Aluminium Paduan 2024 (I. Galvão 1,*, D. Verdera 2, D. Gesto 2 & 1, n.d.) .

Mechanical Properties	Metric	English
Ultimate Tensile Strength	469 MPa	68000 psi
Tensile Yield Strength	324 MPa	47000 psi
Shear Strength	283 MPa	41000 psi
Fatigue Strength	138 MPa	20000 psi
Modulus of Elasticity	73.1 GPa	10600 ksi
Shear Modulus	28 GPa	4060 ksi

Proses FSSW

Friction stir spot welding dikerjakan secara konvensional oleh MazdaMotor Corporation tahun 1993 dengan konsep dan tampilan sama dengan FSW. Seperti pada Gambar 1, dimana proses FSSW memiliki tiga tahapan: *plunging*, *stirring* dan *retracting* (Nguyen et al., 2011). Proses tersebut dilakukan dengan mesin *milling and drilling* dengan kecepatan putaran mesin 2500 rpm. Kemudian tool ditekan ke benda kerja sampai bahu tool menyentuh permukaan atas benda kerja untuk membentuk titik. Gerakan dan putaran tool kebawah menyebabkan adanya gesekan yang menimbulkan panas. Panas tersebut dihasilkan dari gesekan tool, sehingga benda kerja menjadi lebih lunak dan mudah dilubangi. Proses pengadukan ini memiliki fungsi untuk sambungan *solid state* antara dua spesimen sehingga mudah terbentuk. Tahap terakhir ketika penyambungan sudah terjadi yaitu tool ditarik keatas kembali.



Gambar 1. Ilustrasi proses FSSW: (a) plunging, (b) stirring, dan (c) retracting
(Nguyen et al., 2011)

Keunggulan dari metode FSSW diantaranya tidak menggunakan busur listrik untuk menyambungkan potongan logam, tidak menghasilkan asap atau radiasi berbahaya, juga tidak memerlukan personel berkualifikasi tinggi. Selain itu, tidak meninggalkan tegangan sisa yang kecil dan hasil permukaan (Ilman, Sriwijaya, et al., 2020).

Metode Penyambungan

Terdapat beberapa metode penyambungan terhadap aluminium paduan diantaranya baut, riveting, *tungsten inert gas* (TIG), las *metal inert gas* (MIG) serta *friction stir welding* (FSW) (*Materials Joining Methods*, n.d.). Sambungan paku keling merupakan metode penyambungan yang digunakan untuk mengikat suatu bagian dengan bagian lainnya. Sambungan paku keling merupakan sambungan yang bersifat permanen atau tetap, dimana sambungan paku keling tidak dapat dilepas kembali atau dibongkar pasang, seperti sambungan baut dan mur, kecuali dengan cara merusaknya.

Paku keling biasanya dibuat dari bahan aluminium, perunggu, tembaga, nikel atau baja. Sebuah paku keling umumnya terdiri dari bagian kepala dan tangkai. Ada beberapa jenis paku keling yang banyak dipakai, seperti paku keling kepala bulat, paku keling kepala tirus, paku keling kepala persegi, paku keling silinder flens, paku keling eksplosif dan pop rivet (blind rivet) seperti Gambar 2 (The et al., n.d.). Spesifikasi dari rivet seri MS20470 yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 2.



Gambar 2. Jenis Rivet (The et al., n.d.)

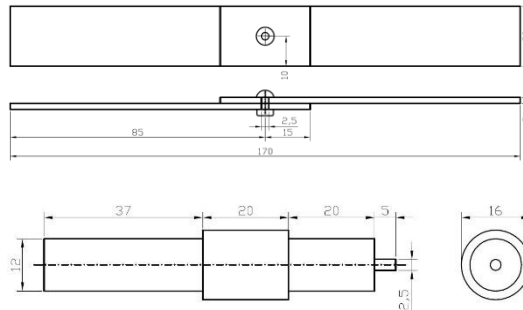
Table 2. Deskripsi rivet seri MS20470 (Toma et al., 2016)

Item	Description
Fastener Length:	0.428 Inches Minimum And 0.448 Inches Maximum
Head Style:	Universal
Head Height	0.093 Inches Minimum And 0.103 Inches Maximum
Shank Diameter:	0.218 Inches Minimum And 0.223 Inches Maximum
Shank Style:	Straight W/radius Chamfered Tip
Head Major Diameter:	0.415 Inches Minimum And 0.459 Inches Maximum
Shear Strength:	26000 Single Pounds Per Square Inch
Heat Treatment:	T-4 Solution Heat Treated Overall
Material:	Aluminum Alloy 2117 Overall
Material Document And Classification:	Qq-a-430 Fed Spec Single Material Response Overall
Surface Treatment:	Anodize Overall Or Oxide Film Overall
Surface Treatment Document And Classification:	Mil-a-8625 Mil Spec 1st Treatment Response Overall Or Mil-c-5541 Mil Spec 2nd Treatment Response Overall

Metode Penelitian

Penelitian ini berawal dari adanya literature beberapa materi yang mendukung diantaranya spesifikasi material, *friction stir spot welding*, mekanisme pengujian, penggunaan rivet dalam penyambungan.

Kemudian melakukan pengukuran dimensi dan pemotongan bahan, dilanjutkan dengan proses pelubangan dengan metode drill (mesin bor) dan metode FSSW dengan mesin milling. Pemasangan rivet dilakukan dengan menggunakan *pneumatic riveting* terhadap material yang dilakukan pelubangan. Selanjutnya dari spesimen tersebut dilakukan distribusi kekerasan (hardness), kekuatan geser (*share stress*), pengamatan metalografi. Desain pengujian materil seri AA2024 dan juga dimensi tool holder dalam proses FSSW dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 3. (a) Sampel specimen, (b) Tool holder

Distribusi Kekerasan

Nilai kekerasan merupakan kemampuan material untuk menahan pijakan atau goresan. Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui nilai kekerasan pada material sambungan aluminium setelah melalui proses drilling dan FSSW. Jenis pengujian kekerasan pada penelitian ini menggunakan *microhardness vickers*. Parameter yang digunakan dalam pengujian kekerasan yaitu beban 100 gf, 10 detik, 500 μm . Hasil pijakan berbentuk belah ketupat dapat dihitung panjang diagonalnya kemudian dikonversi menjadi nilai kekerasan.

$$D = \frac{d1+d2}{2} \quad (1)$$

$$VHN = \frac{1854 F}{D^2} \quad (2)$$

dimana; $d1$ = pijakan 1 (mm); $d2$ = pijakan 2 (mm); F = beban (kg)

Kekuatan Geser

Tujuan dari pengujian adalah untuk mengetahui nilai kekuatan geser, kekuatan luluh, regangan, dan karakter patahan. Kekuatan geser dapat dilihat dari nilai tegangan tarik maksimum, sedangkan kekuatan luluh berdasarkan tegangan luluhnya. Tegangan luluh dan geser bisa dilihat dari grafik yang dihasilkan selama pengujian. Tegangan adalah reaksi yang timbul dalam rangka spesimen menahan beban yang diberikan. Kekuatan geser dan luluh dari spesimen dapat dihitung dengan persamaan.

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad (3)$$

dimana: σ = Kekuatan maksimum (MPa); P = Beban maksimal (N) ; A_0 = Luas penampang (mm^2)

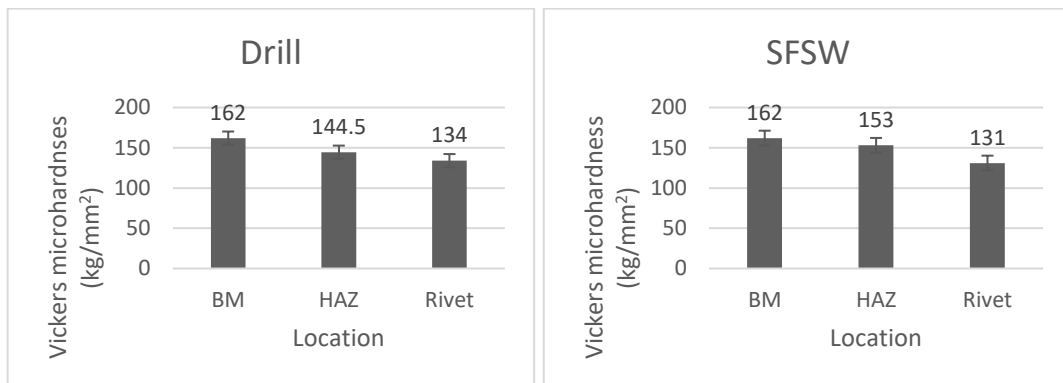
Pengamatan Metalografi

Pengamatan makro dan mikrostruktur dilakukan pada bagian material asli (*base material*), rivet dan bagian HAZ menggunakan mikroskop optik. Sampel spesimen yang sudah dilakukan drill, FSSW dipotong dengan ukuran 20 x 20 mm kemudian di resin. Selanjutnya dilakukan penghalusan, pemolesan dan etsa menggunakan standart ASTM E 407 (2 mL HF, 3 mL HCl, 5 mL HNO₃ dan 190 mL water)(ASTM Standard, 2015).

Hasil dan Pembahasan

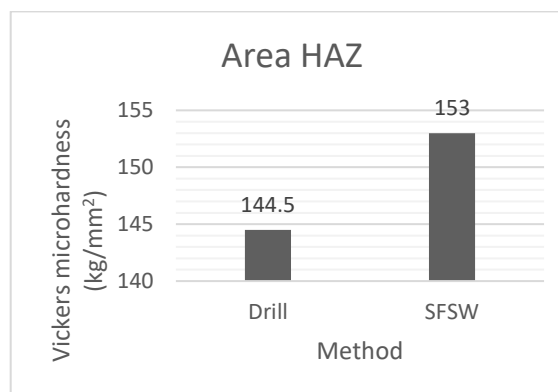
Distribusi kekerasan

Pemasangan rivet pada bahan aluminium 2024 dilakukan dengan proses *drilling* dan FSSW dengan menggunakan mesin drilling milling di Lab STTKD Yogyakarta. Proses *drilling* dilakukan dengan mata bor ukuran 2.5 mm, sedangkan untuk tool dibuat dengan panjang 7 mm. Pengaruh gesekan antara mata bor dan tool dengan bahan aluminium menimbulkan panas pada kedua logam tersebut. Pengaruh penggunaan FSSW dalam pemasangan rivet adanya gesekan antar pin solder terhadap aluminium sehingga terjadi panas yang berada dekat tool, hal itu dapat mempengaruhi sifat kekerasan bahan. Bagian yang diakibatkan oleh adanya gesekan tersebut dinamakan daerah *heat affective zone* (HAZ). Sehingga nantinya akan berbeda tingkat kekerasannya terhadap bagian yang tidak terkena panas atau juga disebut bagian *base material* (BM). Adapun grafik kekerasan dari bagian tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Grafik mikrohardness vickers metode drill dan FSSW

Pengaruh panas yang ditimbulkan saat proses drill dan tool terdapat selisih pada bagian HAZ. Distribusi kekerasan bagian HAZ untuk mata bor memiliki hasil 144.5 (kg/mm²) sedangkan pada bagian HAZ metode FSSW sebesar 153(kg/mm²). Mengacu pada Gambar 5 dapat dilihat bahwa perlakuan FSSW mempengaruhi kenaikan kekerasan, kemungkinan terkait dengan adanya sisa tekan dan tegangan tarik. Selain itu, menurut Ilman dkk (Ilman, Sehonon, et al., 2020) telah menunjukkan bahwa adanya korelasi antara sisa tegangan tarik dan kekerasan yang terbentuk di bagian las.



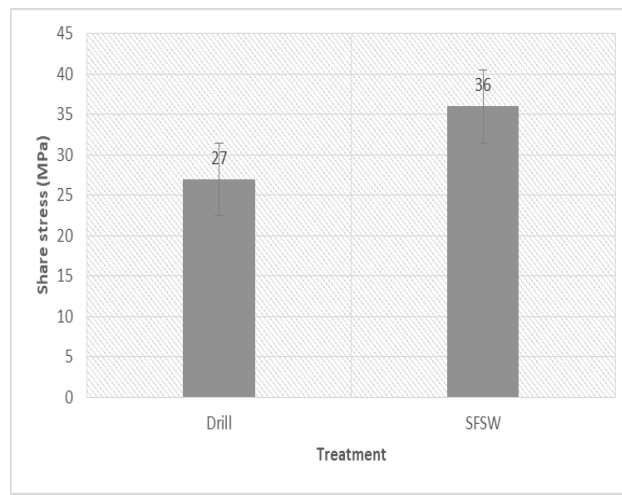
Gambar 5. Grafik profil dari mikrohardness vickers pada bagian HAZ dengan metode drill dan FSSW

Kekuatan geser

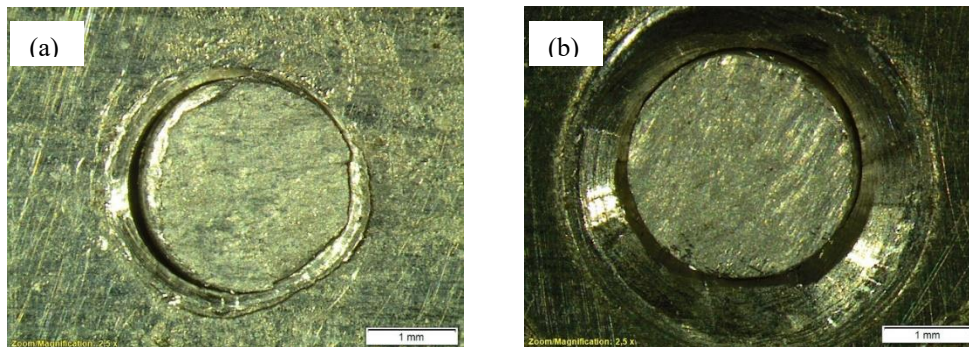
Kemampuan dari penyambungan rivet dengan metode drill dan FSSW juga dilakukan dengan pengujian kekuatan geser. Universal Testing Machine merupakan alat untuk mengetahui kekuatan sambungan rivet tersebut. Pengujian dilakukan di Institut Teknologi Nasional Yogyakarta kapasitas

UTM 15 ton. Tujuan melakukan pengujian mengetahui kekuatan sambungan rivet dengan dua metode.

Gambar 6 menunjukkan grafik rata-rata kekuatan geser maksimum pemasangan rivet dengan metode drill dan FSSW. Pengaruh metode FSSW memberikan perubahan terhadap kekuatan geser dari penyambungan rivet pada aluminium 2024 dengan nilai 36 MPa. Metode pemasangan rivet dengan menggunakan bor/drill mendapatkan nilai 27 MPa, untuk hasil patahan dari pengujian geser dapat dilihat pada Gambar 7. Zhou dkk, melakukan penelitian tentang pengaruh kecepatan putar dan waktu berhenti terhadap kekuatan tarik sambungan FSSW bahan Al Cu. Hasil yang didapat bahwa kecepatan putaran yang tepat dapat menghasilkan rasio HH/FBR yang lebih tinggi, sehingga dapat meningkatkan interlock mekanis dengan demikian juga meningkatkan sifat mekanik sambungan (G. Li et al., 2019).



Gambar 6. Grafik tegangan geser pada pemasangan rivet metode drill dan FSSW



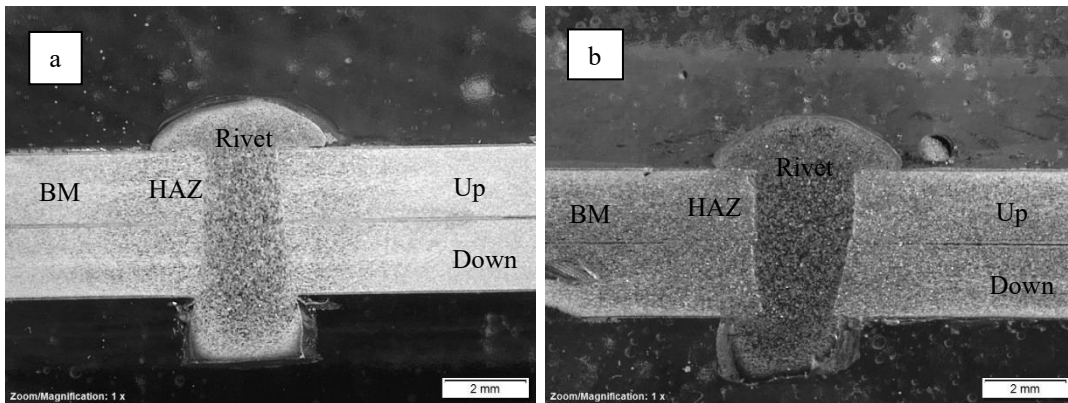
Gambar 7. Hasil patahan spesimen rivet proses (a) drill dan (b) FSSW dari pengujian geser

Pengamatan Metalografi dari sambungan las

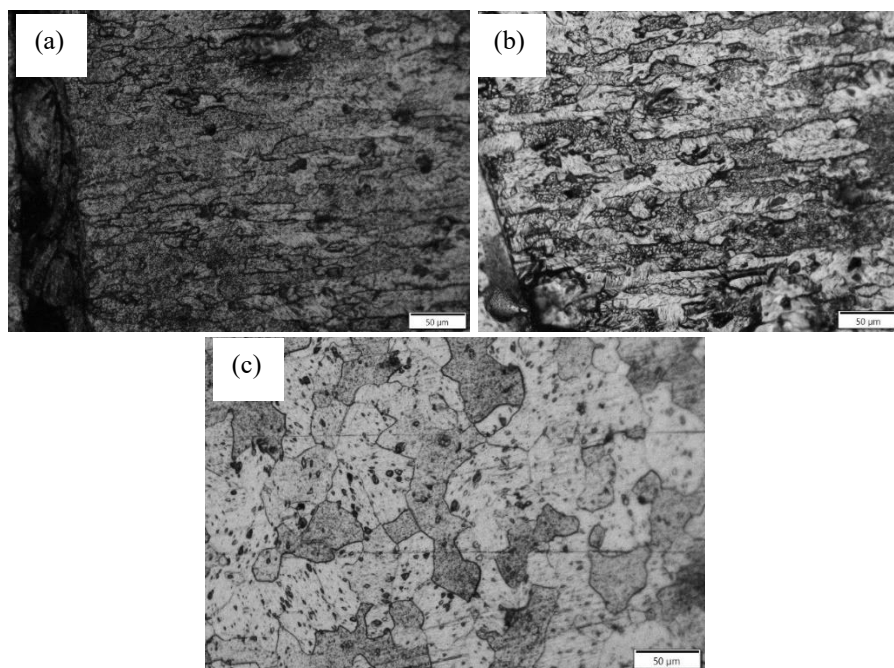
Makro struktur

Gambar 8 menunjukkan perbandingan struktur makro dari metode drill dan FSSW. Bagian makro tersebut memperlihatkan bagian dari material yang telah dilakukan proses riveting yaitu BM, HAZ, Rivet, Up dan Dwon. BM merupakan material dasar aluminium 2024 yang tidak terkena adanya perlakuan panas akibat dilakukan pelubangan. HAZ yaitu bagian yang terkena perlakuan oleh mata bor dan tool akibat adanya gesekan dari keduanya menimbulkan perubahan pada base material. Rivet berada ditengah untuk menyambungkan bagian material atas dan bawah. Up dan down merupakan

material aluminium 2024 yang disambung dengan metode drill dan FSSW di bagian atas dan bawah.



Gambar 8. Struktur makro dari pemasangan rivet dengan drill dan FSSW.



Gambar 9. Bagian strukturmikro dari bagian (a) HAZ proses drill, (b) HAZ proses FSSW dan (c) material rivet

Mikro struktur

Spot friction stir welding memberikan pengaruh terhadap perubahan struktur material khususnya pada material aluminium 2024. Efek gesekan antara tool dan aluminium ini menimbulkan panas, sehingga bagian yang dekat dengan tool berubah bentuk mikro struktur menjadi lebih kecil dan panjang. Adapun bagian yang tidak terkena panas atau bagian *base material* (BM) masih sama bentuk strukturnya, seperti terlihat pada bagian Gambar 9. Seperti penelitian yang dilakukan Toma, dkk. (Toma et al., 2016) bahwa penggunaan FSSW dan kecepatan putaran selain mempengaruhi peningkatan nilai kekerasan juga ukuran butiran menjadi lebih kecil memanjang.

Kesimpulan

Pengaruh pembuatan lubang rivet dengan metode drill dan FSSW pada material aluminium 2024 telah dilakukan penelitian adapun kesimpulan sebagai berikut:

FSSW menghasilkan perubahan pada bahan akibat adanya gesekan dengan tool, sehingga dari perlakuan tersebut adanya sisa tekan dan tegangan tarik. Kemampuan dari perlakuan tersebut merubah sifat materil menjadi lebih keras. Sementara itu pemberian proses FSSW juga mempengaruhi struktur mikro di HAZ sebaiknya ada menggunakan perlakuan pemanasan untuk menghilangkan residual stress akibat gesekan. Selepas dari itu peningkatan terjadi pada kekuatan geser yang diberikan proses FSSW yang secara awal kedua materil sudah menyatu dibanding proses drill. Dari hasil tersebut masih perlu adanya perlakuan dalam proses FSSW seperti pemanasan, mengetahui distribusi temperature sehingga nantinya dapat memperbaiki sifat dari materil tersebut.

Daftar Pustaka

- ASTM Standard. (2015). E407-07 Standard Practice for Microetching Metals and Alloys. *ASTM International*, 07(Reapproved 2015), 1–22.
- I. Galvão 1,*, D. Verdera 2, D. Gesto 2, A. L. 1 D. M. R. 1, & 1. (n.d.). *ANALYSING THE CHALLENGE OF ALUMINIUM TO COPPER FSW*. 148, 148–162.
- Ilman, M. N., Sehono, Muslih, M. R., & Wibowo, H. (2020). The application of transient thermal tensioning for improving fatigue crack growth resistance of AA5083-H116 FSW joints by varying secondary heating temperature. *International Journal of Fatigue*, 133(January 2019), 105464. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.105464>
- Ilman, M. N., Sriwijaya, R. A., Muslih, M. R., Triwibowo, N. A., & Sehono. (2020). Strength and fatigue crack growth behaviours of metal inert gas AA5083-H116 welded joints under in-process vibrational treatment. *Journal of Manufacturing Processes*, 59(October), 727–738. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.10.035>
- Li, G., Zhou, L., Zhou, W., Song, X., & Huang, Y. (2019). Influence of dwell time on microstructure evolution and mechanical properties of dissimilar friction stir spot welded aluminum-copper metals. In *Journal of Materials Research and Technology* (Vol. 8, Issue 3, pp. 2613–2624). <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.02.015>
- Li, M., Zhang, C., Wang, D., Zhou, L., Wellmann, D., & Tian, Y. (2020). Friction stir spot welding of aluminum and copper: A review. *Materials*, 13(1), 156. <https://doi.org/10.3390/ma13010156>
- Materials joining methods*. (n.d.).
- Meschut, G., Janzen, V., & Olfermann, T. (2014). Innovative and highly productive joining technologies for multi-material lightweight car body structures. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23(5), 1515–1523. <https://doi.org/10.1007/s11665-014-0962-3>
- Mishra, R. S., & Ma, Z. Y. (2005). Friction stir welding and processing. *Materials Science and Engineering R: Reports*, 50(1–2), 1–78. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2005.07.001>
- Nguyen, N. T., Kim, D. Y., & Kim, H. Y. (2011). Assessment of the failure load for an AA6061-T6 friction stir spot welding joint. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 225(10), 1746–1756. <https://doi.org/10.1177/0954405411405911>
- Ozesmi, M., Patiroglu, T. E., Hillerdal, G., & Ozesmi, C. (1985). Peritoneal mesothelioma and malignant lymphoma in mice caused by fibrous zeolite. *British Journal of Industrial Medicine*, 42(11), 746–749. <https://doi.org/10.1136/oem.42.11.746>
- Ramakrishnan, P. (1972). Welding Metallurgy. In *Indian Welding Journal* (Vol. 4, Issue 3). <https://doi.org/10.22486/iwj.v4i3.150243>
- The, H., The, B., & Part, T. (n.d.). *Rivets and types*. 1–7.
- Thomas, W. M., & Nicholas, E. D. (1997). Friction stir welding for the transportation industries. *Materials and Design*, 18(4–6), 269–273. [https://doi.org/10.1016/s0261-3069\(97\)00062-9](https://doi.org/10.1016/s0261-3069(97)00062-9)
- Toma, E., Karash, B., Yassen, S. R., Taqi, M., & Qasim, E. (2016). *The Effect of the Cutting Depth of the Tool Friction Stir Process on the Mechanical Properties and Microstructures of Aluminium Alloy 6061-T6*. 3(5), 33–41. <https://doi.org/10.11648/j.ajma.20150305.11>
- Yang, X. W., Fu, T., & Li, W. Y. (2014). Friction stir spot welding: A review on joint macro- and microstructure, property, and process modelling. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/697170>
- Zhang, K., Cheng, H., & Li, Y. (2011). Riveting process modeling and simulating for deformation analysis of aircraft's thin-walled sheet-metal parts. *Chinese Journal of Aeronautics*, 24(3), 369–377. [https://doi.org/10.1016/S1000-9361\(11\)60044-7](https://doi.org/10.1016/S1000-9361(11)60044-7)
- Zhao, H., Xi, J., Zheng, K., Shi, Z., Lin, J., Nikbin, K., Duan, S., & Wang, B. (2020). A review on solid riveting techniques in aircraft assembling. *Manufacturing Review*, 7(January). <https://doi.org/10.1051/mfreview/2020036>