

Pengaruh *shoulder plunge depth* dan panjang pin terhadap sifat fisik dan kekerasan pada sambungan *friction stir spot welding* aluminium 1100 dengan penambahan serbuk Zn

David Lukmanto¹, Nurul Muhayat², Triyono²

¹Program Studi Teknik Mesin, Universitas Sebelas Maret

²Staf Pengajar, Program Studi Teknik Mesin, Universitas Sebelas Maret
Jl. Ir. Sutami No.36 A, Pucangsawit, Kec. Jebres, Surakarta 57126

Email korespondensi: nurulmuhayat@staff.uns.ac.id

Abstrak

Friction Stir Spot Welding (FSSW) adalah proses penyambungan benda padat yang menggunakan gaya gesek terhadap material sebagai sumber panas. Friction Stir Spot Welding (FSSW) secara luas digunakan di industri otomotif untuk mendapatkan produk yang ringan dengan kekuatan yang baik. Tujuan dari kajian ini adalah untuk menentukan panjang pin dan kedalaman penetrasi shoulder pada kekerasan dari FSSW AA110. Variasi yang digunakan adalah panjang pin 1,5, 1,7, 2 mm dan kedalaman penetrasi 0,5, 0,75, 1 mm. Kajian ini menggunakan dan tanpa tambahan partikel Zn. Kecepatan putaran spindel adalah 1600 rpm, waktu dwell adalah 7 detik, partikel Zn 0,2 mm, diameter shoulder adalah 12 mm, dan diameter pin adalah 5 mm. Karakteristik fisik dianalisis melalui pengamatan makro dan mikrostruktur, sedangkan karakteristik kekerasan melalui uji kekerasan vickers. Hasil dari kajian ini menunjukkan semakin bertambahnya panjang pin dan kedalaman penetrasi shoulder maka nilai kekerasan semakin meningkat. Variasi dengan penambahan Zn memiliki memiliki kekerasan yang lebih baik dibandingkan tanpa penambahan Zn.

Kata kunci: FSSW, AA1100, panjang pin, kedalaman penetrasi shoulder, partikel Zn, Hardness Micro Vickers.

Abstract

Friction Stir Spot Welding (FSSW) is a solid-state jointing process that uses tool friction against the material as a heat source. Friction Stir Spot Welding (FSSW) is widely used in the automotive industry to get lightweight products with the best strength. The purpose of this research is to determine the pin length and shoulder plunge depth penetration on hardness of FSSW AA110. The variations used are pins 1.5, 1.7, 2 mm long and plunge depth of 0.5, 0.75, 1 mm. The study was conducted with and without the addition of Zn particles. Spindle rotation speed 1600 rpm, dwell time 7 s, Zn particles 0.2 mm, shoulder diameter 12 mm, and pin diameter 5 mm. Physical characteristics were analyzed through observation of macro and microstructures, while hardness characteristics through vickers hardness testing. The results of this study indicate that the increasing the pin length and the depth of shoulder penetration, the higher the hardness value. The variation with the addition of Zn has a better hardness than without the addition of Zn.

Keywords: FSSW, AA1100, pin length, shoulder plunge depth, Zn particle, Hardness Micro Vickers.

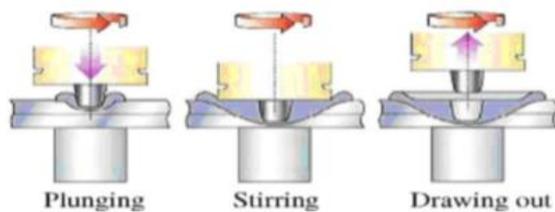
1. Pendahuluan

Material paduan ringan dewasa ini sudah menjadi tren penggunaan di dalam industri manufaktur sebagai pengganti baja. Penggunaan material paduan ringan untuk bodi mobil mengarah pada penurunan berat kendaraan guna mendapatkan pengurangan bahan bakar, emisi gas buang dan peningkatan kinerja [1]. Desain dan produksi pada bodi mobil menggunakan material ringan menjadi inovasi manufaktur yang sangat penting untuk pembangunan berkelanjutan di industri otomotif. Material paduan ringan pada kendaraan bermotor memberikan manfaat seperti efisiensi energi yang lebih besar, konsumsi energi yang lebih sedikit, ergonomi yang lebih baik, keamanan yang lebih baik, pengoperasian yang lebih baik dan efektivitas biaya yang lebih tinggi [2].

FSSW adalah proses penyambungan *solid-state* yang menggunakan gesekan *tool* terhadap material sebagai sumber panas. Pengelasan ini memanfaatkan gesekan dari putaran *tool* yang diberikan tekanan pada kedua permukaan material yang akan disambung. Gesekan antara *tool* dan material akan menimbulkan panas awal proses pengelasan [3]. FSSW dapat dikatakan sebagai teknik pengelasan dengan biaya yang lebih kecil jika dibandingkan dengan teknik pengelasan busur karena FSSW tidak menggunakan *filler metal* dalam proses pengelasannya. Hasil pengelasan FSSW tergolong memiliki sifat mekanik yang baik karena *heat input* yang rendah dan HAZ yang sempit sehingga membuat *residual stress* yang dihasilkan sangat kecil. Pengelasan ini sepenuhnya aman bagi lingkungan karena tidak menggunakan gas pelindung dan aman dari radiasi sinar ultraviolet [4]. Kelemahan pengelasan FSSW adalah terjadi

penurunan kemampuan sambungan. Penurunan sambungan disebabkan sebagian permukaan mengalami lengkungan yang disebut *hook regions* [5]. Kegagalan sambungan terjadi adanya tumpang tindih di daerah yang tersambung dan sifat kegagalan sambungan itu sendiri juga dipengaruhi oleh karakter daerah *hook* yang terbentuk [6]. Untuk menanggulangi permasalahan tersebut dilakukan dengan menambahkan partikel pada kedua permukaan material [7].

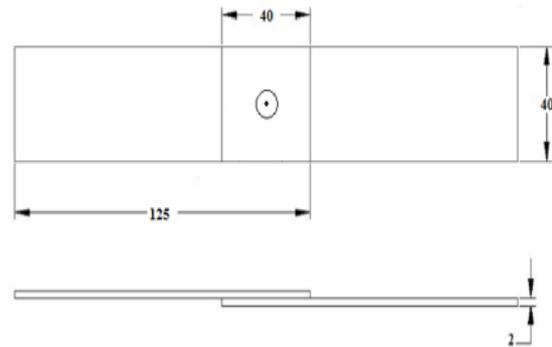
Kajian yang dilakukan oleh Xu [8] menyatakan Zn partikel dan substrat Mg dapat berdifusi di antara keduanya, membentuk intermetalik Mg-Zn. Kekuatan sambungan meningkat karena cacat *hook* berkurang dan area zona sambungan membesar. Balamsundaram dkk [9] menyatakan pada sambungan *ultrasonic spot welded* Al dan Cu dengan partikel Zn, adanya pembentukan struktur eutektik seperti bunga spiral yang menunjukkan fase padat Al-Zn yang terbukti dengan tingginya kandungan Al dan Zn pada pengujian SEM. Data tersebut dikonfirmasi dengan pengujian *X-ray diffraction* untuk menentukan senyawa intermetalik. Penggunaan *tool* sangat berpengaruh pada hasil pengelasan dan terbentuknya *hook defects* [10]. Penggunaan pin pada *tool* pada sambungan las AA2024-T3 menunjukkan tidak semua *hook defects* dapat dihilangkan, tetapi penggunaan pin pada *tool* dapat mempengaruhi meningkatkan kekuatan tarik sambungan [11] dan *tool* silinder dapat memperbaiki terbentuknya *hook defects* [10]. Oleh karena itu, dalam kajian ini akan membahas tentang pengelasan FSSW aluminium dengan penambahan partikel Zn dengan parameter *shoulder plunge depth* dan panjang pin, proses FSSW ditunjukkan pada Gambar 1 berikut.



Gambar 1. Ilustrasi proses FSSW.

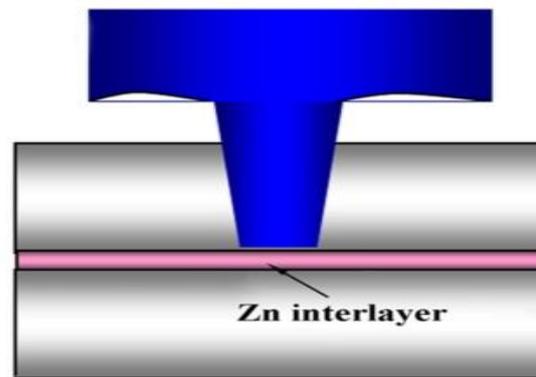
2. Metode

Kajian FFSW ini menggunakan material plat aluminium alloy 1100 dengan penambahan partikel Zn. Plat dipotong dengan ukuran 125 mm x 40 mm x 2 mm seperti pada Gambar 2. Di permukaan tengah antara plat diberikan partikel Zn berbentuk serbuk seperti pada Gambar 3. Partikel Zn memiliki ketebalan 0,2 mm dan berat 0,3 gram.



Gambar 2. Skema ukuran spesimen FSSW.

Setiap spesimen dengan dan tanpa partikel Zn dilakukan pengelasan di bagian tengah plat seperti pada Gambar 2. Parameter yang digunakan adalah panjang pin 1,5, 1,7, 2 mm dan *shoulder plunge depth* 0,5, 0,75, 1 mm. Pengujian kekerasan spesimen menggunakan mesin uji *Micro Vickers* dengan *load* sebesar 0,1 kg dan *dwell time* selama 10 detik.



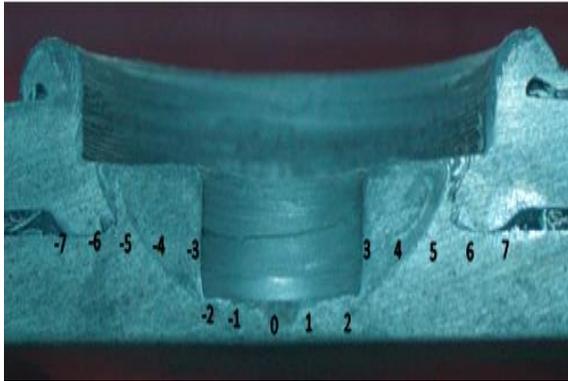
Gambar 3. Skema penempatan partikel Zn.

Pengujian struktur makro dilakukan untuk mengamati persebaran partikel Zn dan zona *Stir Zone* pada setiap variasi panjang pin dan *shoulder plunge depth*. Pengujian struktur mikro dilakukan untuk mengetahui perbedaan butir pada daerah *Stir Zone*. Dugaan aliran Zn yang tersebar pada sambungan FSSW akan dibuktikan melalui pengujian SEM dan EDS. Perbedaan komposisi antara dengan dan tanpa partikel Zn dibuktikan dengan pengujian XRD.

3. Hasil dan Pembahasan

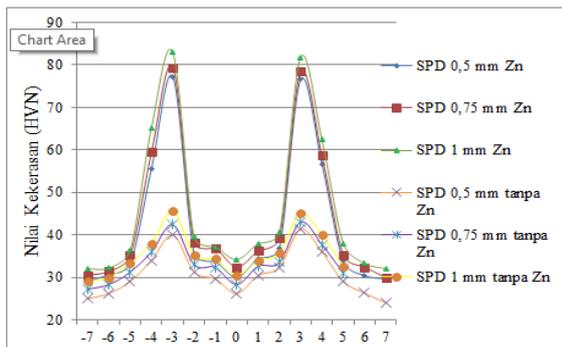
Hasil Uji Vickers

Pengujian *Vickers* atau kekerasan bertujuan untuk mengetahui kekerasan pada pengelasan FSSW dan mengetahui perbedaan kekerasan pada spesimen partikel Zn dengan tanpa partikel Zn. Pengambilan titik pada pengujian kekerasan diambil dengan interval 1 mm pada tiap titik. Pengujian kekerasan ini menggunakan *holding time* 10 detik dan beban 100 gf. Pemetaan pengujian *Vickers* ini dapat dilihat pada Gambar 4 berikut.



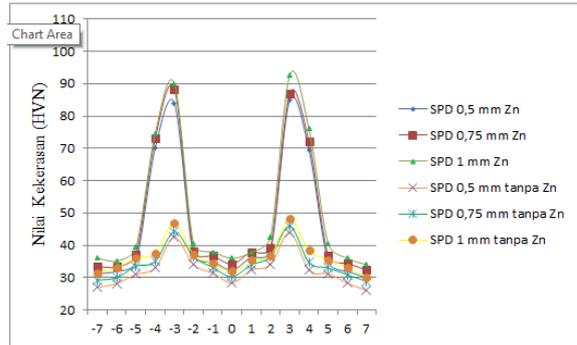
Gambar 4. Pemetaan pengujian kekerasan Vickers.

Gambar 5 menunjukkan grafik data hasil kekerasan variasi panjang pin 1,5 mm dan penetrasi *shoulder* 0,5 mm sampai 1 mm dengan penambahan dan tanpa partikel Zn. Tingkat kekerasan tertinggi diperoleh sebesar 82,9 HVN pada variasi penetrasi *shoulder* 1 mm dengan penambahan partikel Zn. Tingkat kekerasan terendah didapatkan sebesar 24 HVN pada variasi penetrasi *shoulder* 0,5 mm tanpa penambahan partikel Zn.



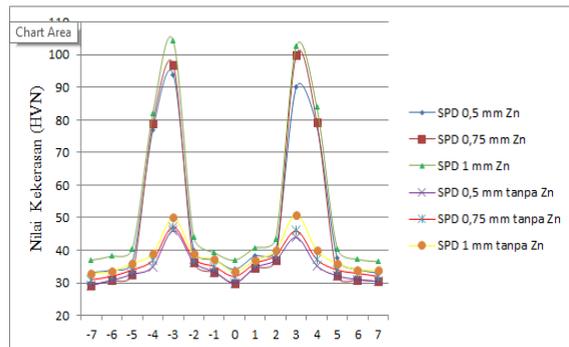
Gambar 5. Kekerasan pada panjang pin 1,5 mm.

Gambar 6 merupakan grafik data hasil kekerasan variasi panjang pin 1,7 mm dan penetrasi *shoulder* 0,5 mm sampai 1 mm dengan penambahan dan tanpa partikel Zn. Tingkat kekerasan tertinggi diperoleh sebesar 92,7 HVN pada variasi penetrasi *shoulder* 1 mm dengan penambahan partikel Zn. Tingkat kekerasan terendah didapatkan sebesar 26 HVN pada variasi penetrasi *shoulder* 0,5 mm tanpa penambahan partikel Zn.



Gambar 6. Kekerasan pada panjang pin 1,7 mm.

Gambar 7 merupakan grafik data hasil kekerasan variasi panjang pin 2 mm dan penetrasi *shoulder* 0,5 mm sampai 1 mm dengan penambahan dan tanpa partikel Zn. Tingkat kekerasan tertinggi diperoleh sebesar 104,3 HVN pada variasi penetrasi *shoulder* 1 mm dengan penambahan partikel Zn. Tingkat kekerasan terendah didapatkan sebesar 29,3 HVN pada variasi penetrasi *shoulder* 0,5 mm tanpa penambahan partikel Zn.



Gambar 7. Kekerasan pada panjang pin 2 mm.

Hasil pengujian diperoleh nilai kekerasan tertinggi di daerah *Stir zone* pada titik 3 sebesar 104,3 HVN. *Stir zone* (SZ) adalah zona pengelasan yang terekristalisasi penuh dan teraduk akibat panas yang dihasilkan oleh *tool*. Daerah tersebut mengalami gesekan antara *tool* dengan spesimen, efek gesekan akan menimbulkan panas dan merubah struktur butir pada material menjadi halus. *Stir zone* merupakan daerah yang terkena deformasi paling tinggi karena pekatan dari *tool* yang kuat mengakibatkan struktur butir menjadi lebih halus dari daerah lainya [12]. Hasil pengujian kekerasan pada daerah HAZ, TMAZ, BM memiliki nilai kekerasan 34,3 HVN, 36,4 HVN, 47,5 HVN. *Base metal* (BM) adalah zona area material yang berada jauh dari daerah lasan yang tidak mengalami deformasi. HAZ dan TMAZ merupakan daerah yang masih terkena efek panas dari pengelasan. HAZ dan TMAZ adalah daerah yang hanya terkena efek panas serta sedikit deformasi dari desakan *tool*. [1]. Daerah tersebut ditunjukkan titik -7 sampai -5 dan 5 sampai 7. Daerah ini mengalami penurunan kekerasan karena

efek panas yang membuat ukuran butir lebih kasar dibandingkan dengan SZ.

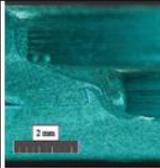
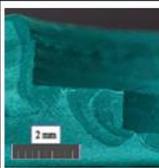
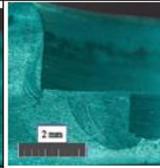
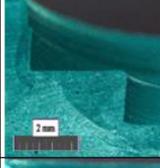
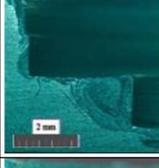
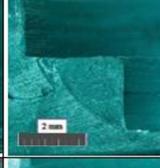
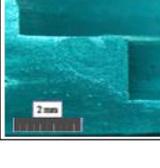
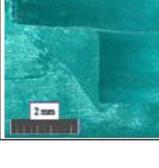
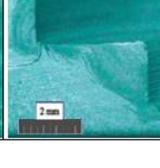
Pengujian *vickers* dengan partikel Zn menghasilkan peningkatan nilai kekerasan signifikan dibandingkan tanpa partikel Zn. Hal ini disebabkan pada partikel Zn terjadi reaksi *solid solution* antara Al dan Zn. *Solid solution* adalah pencampuran homogen yang terjadi antara dua atau lebih atom (logam) yang terjadi pada keadaan padat. Di mana ketika proses pengelasan, saat Zn sudah melewati titik leleh dan aluminium mulai melunak, atom-atom Zn akan menyisip ke celah-celah dari atom aluminium [13]. Dengan semakin bertambahnya panjang pin dan penetrasi *shoulder* maka butir yang terbentuk semakin halus dan memperbanyak batas butir sehingga menghambat pergerakan dislokasi. Banyaknya batas butir akan merubah arah bidang slip sehingga slip tidak mudah terdeformasi [14].

Hasil pengujian dari semua variasi menunjukkan *trend line* nilai kekerasan yang sama, dimana nilai kekerasan terus meningkat seiring bertambahnya panjang pin dan kedalaman penetrasi *tool*. Variasi tanpa partikel Zn untuk parameter panjang pin 2 mm dan kedalaman penetrasi *shoulder* 1 mm memiliki kekuatan yang lebih besar dari pada variasi tanpa partikel Zn untuk parameter panjang pin 1,5 mm dan kedalaman penetrasi *shoulder* 0,5 mm. Hal ini disebabkan penetrasi pin yang paling panjang menghasilkan *heat input* yang paling besar. *Heat input* yang besar menyebabkan area *Metalurgical bonded zone* (MBD) juga besar sehingga kekuatan meningkat. Kekuatan sambungan meningkat seiring dengan semakin besarnya ukuran *nugget*. Dengan semakin meningkatnya nilai kekuatan sambungan FSSW maka nilai kekerasan juga akan semakin meningkat [15].

Hasil Foto Makro

Hasil observasi makroskopik pengelasan FSSW dapat diamati pada Tabel 1 yang menunjukkan perbedaan hasil sambungan pada tiap variasi pengelasan yang telah dilakukan. Observasi makroskopik menunjukkan bahwa panjang pin dan *shoulder plunge depth* memiliki pengaruh terhadap hasil sambungan. Aliran Zn tampak berwarna lebih gelap dari daerah sekitarnya. Semakin meningkatnya panjang pin dan *shoulder plunge depth* pada parameter pengelasan FSSW maka semakin banyak juga partikel Zn yang tersebar pada daerah MBD. Dengan persebaran partikel Zn di daerah sambungan maka akan semakin meningkatkan kekuatan mekanik sambungan [15].

Tabel 1. Aliran Zn pada daerah lasan dengan partikel Zn.

Variasi	Kedalaman <i>Shoulder</i>			
	0,5 mm	0,75 mm	1 mm	
Panjang Pin	1,5 mm			
	1,7 mm			
	2 mm			

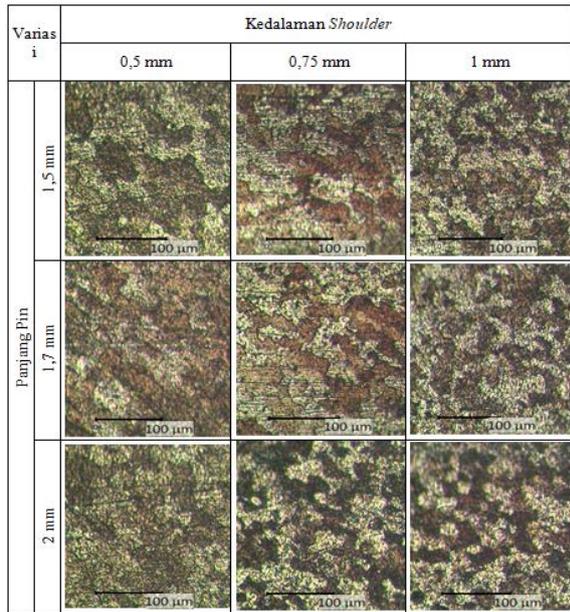
Penetrasi *shoulder* akan memberikan tekanan yang besar pada daerah *stirring* sehingga aliran material di bawah *tool* mengalir secara radial karena gaya sentrifugal dari putaran *tool* [16]. *Shoulder plunge depth* dengan kedalaman 0,5 mm memiliki luasan MBD paling kecil dibandingkan dengan variasi 0,75 mm dan 1 mm. Semakin bertambahnya kedalaman *shoulder* maka semakin banyak material dari bagian atas yang terdorong ke bagian bawah, kemudian material dari bagian bawah diekstrusi ke bagian atas dan bercampur disebabkan tekanan *shoulder* [17]. Material bagian atas akan ikut teraduk dan tercampur dengan lapisan bagian bawah sehingga menjadikan kedua material membentuk ikatan berupa sambungan las. Semakin bertambahnya panjang pin dan kedalaman penetrasi *shoulder* maka *heat input* yang dihasilkan semakin besar. Hal tersebut menyebabkan daerah pengadukan semakin luas seiring bertambahnya panjang pin dan kedalaman penetrasi *shoulder*.

Hasil Foto Makro

Data observasi struktur mikro pada *stir zone* yang diperlihatkan pada Tabel 2 menunjukkan perbedaan setiap variasi pengaruh panjang pin dan kedalaman penetrasi *shoulder* terhadap distribusi partikel Zn. Pada Tabel 2 menunjukkan variasi kedalaman penetrasi *shoulder* 1 mm memiliki batas butir yang terlihat lebih jelas dibandingkan variasi 0,5 mm dan 0,75 mm. Hal tersebut membuktikan bahwa semakin bertambahnya kedalaman penetrasi *shoulder* bentuk butir yang dihasilkan semakin halus. Pada variasi panjang pin 2 mm memiliki batas butir yang tampak lebih jelas dibandingkan variasi 1,5 mm dan 1,7 mm. Hal tersebut membuktikan bahwa semakin bertambahnya kedalaman penetrasi *shoulder* bentuk butir yang dihasilkan semakin halus. Bentuk butir seperti ini disebabkan oleh area yang terdeformasi oleh gesekan dari putaran pin [18]. Sampel uji mikro

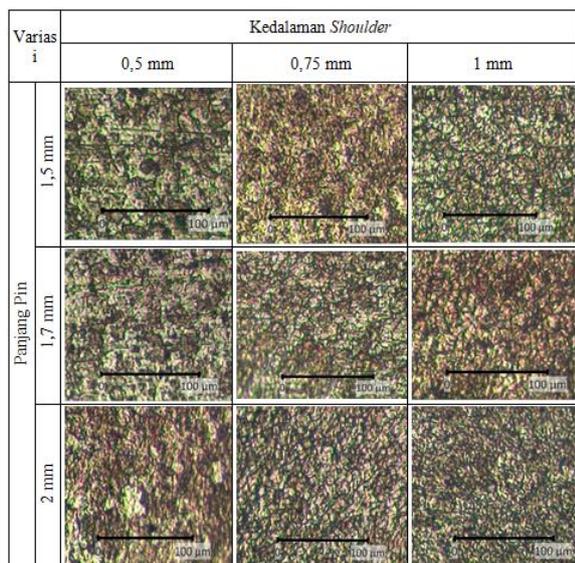
dilakukan di area MBD pada daerah *stir zone* sambungan las FSSW.

Tabel 2. Data hasil uji mikro SZ dengan penambahan partikel Zn.



Hasil observasi mikroskopik menunjukkan bagian HAZ memiliki batas butir yang lebih besar dibandingkan dengan bagian SZ. HAZ menerima efek panas yang lebih sedikit dibandingkan SZ dari putaran *tool* yang mengenainya sehingga butir HAZ lebih besar dibandingkan dengan SZ. Daerah HAZ ini terkena panas dari proses pengelasan tetapi tidak mengalami deformasi. Seperti yang disebutkan oleh Yamamoto, HAZ hanya mengalami siklus termal pengelasan yang menyebabkan butiran kasar [19]. Hasil uji mikro HAZ dengan penambahan partikel Zn ditampilkan pada Tabel 3 berikut.

Tabel 3. Data hasil uji mikro HAZ dengan penambahan partikel Zn.

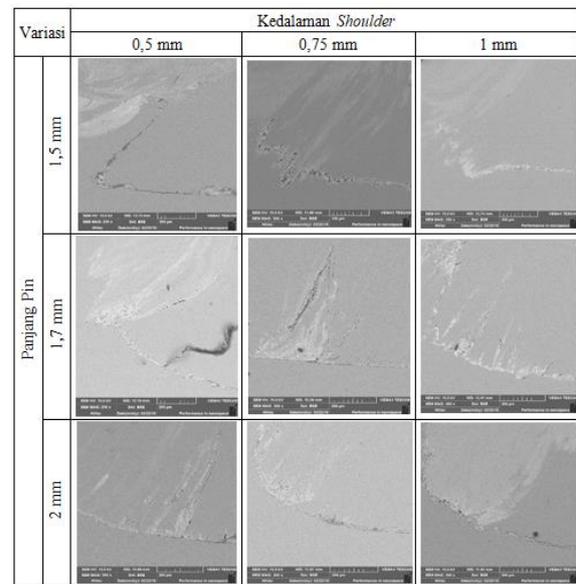


Bertambahnya panjang pin dan penetrasi *shoulder* akan meningkatkan energi panas yang dihasilkan. Bertambahnya energi panas menyebabkan lambatnya proses pendinginan sehingga butir-butir aluminium ikut membesar. Semakin lama proses pendinginan maka butir-butir akan semakin mudah mengikat satu sama lain dan membentuk butir yang semakin besar [20]. Hal tersebut menyebabkan butir-butir HAZ pada variasi panjang pin 1.5 mm dan SPD 0,5 mm tampak lebih besar dibandingkan variasi lainnya.

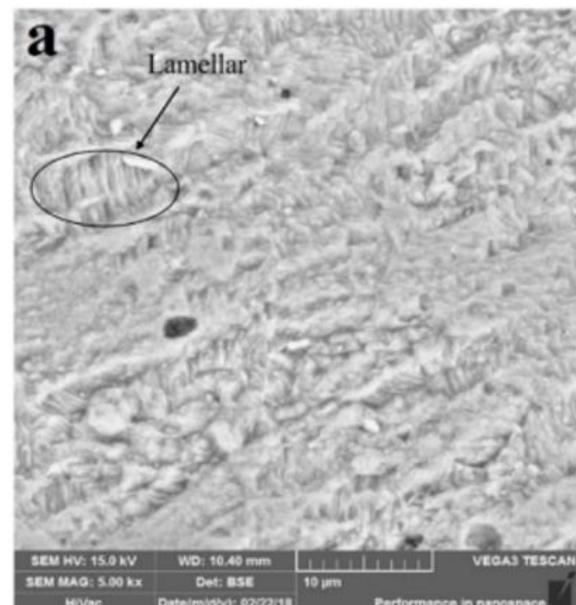
Hasil Uji SEM dan EDS

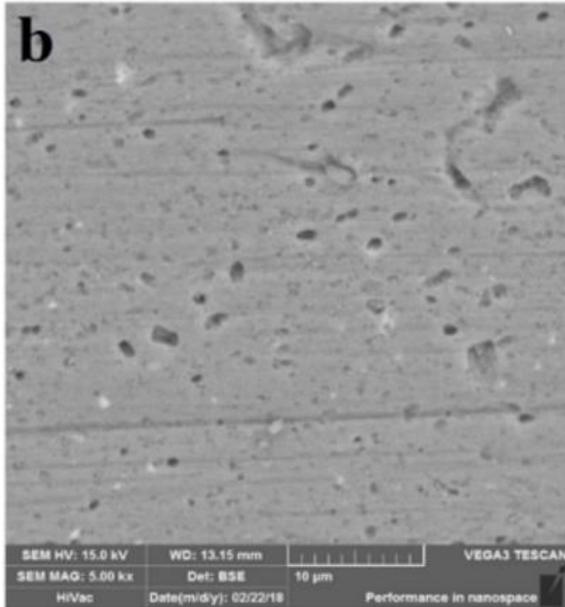
Tabel 4 menunjukkan bagian cacat *hook* yang terisi aliran Zn dari proses pengelasan FSSW.

Tabel 4. Hasil uji SEM cacat hook.



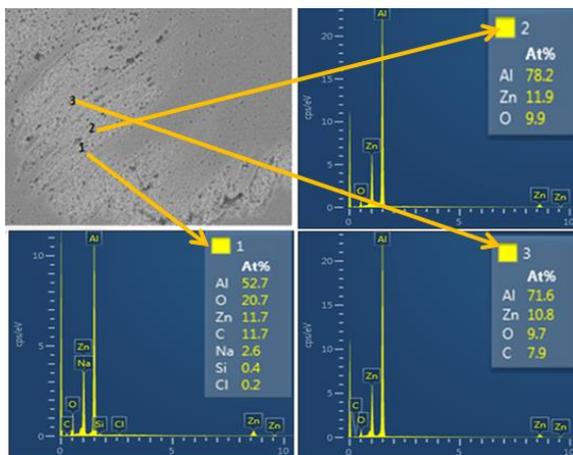
Gambar 8 (a) menunjukkan hasil uji SEM pada daerah *stir zone* dengan partikel Zn, sedangkan pada Gambar 8 (b) menunjukkan hasil uji SEM pada daerah *stir zone* tanpa partikel Zn.





Gambar 8. Uji SEM daerah stir zone, (a) variasi dengan partikel Zn, (b) variasi tanpa partikel Zn [15].

Gambar 8(a) berbentuk seperti struktur lamellar karena dipengaruhi oleh Zn. Hal tersebut menunjukkan adanya Al dan Zn yang berdifusi di daerah stir zone sehingga menghasilkan struktur butir seperti lamellar [16]. Gambar 9 merupakan hasil uji EDS dari spesimen hasil FSSW. Uji EDS dilakukan untuk membuktikan bahwasanya gambar berwarna gelap pada MBD di Tabel 1 merupakan unsur Zn yang mengalir ke bagian tepi stir zone. Gambar 9 menunjukkan bahwa warna abu-abu terang yang terdapat pada tepi stir zone merupakan unsur Zn. Titik-titik hasil EDS menunjukkan bahwa Zn mengalir keatas dimulai dari titik 1 pada bagian bawah. Zn mengalir karena pergerakan tool pada interface saat proses stirring. Presentae Zn pada titik 1 sebesar 11,7 % pada titik 2 yakni 11,9 % dan titik 3 sebesar 10,8%.

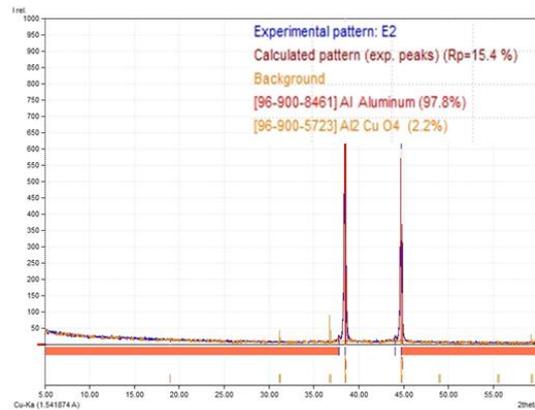


Gambar 9. Pengujian EDS point SZ.

Hasil Uji XRD

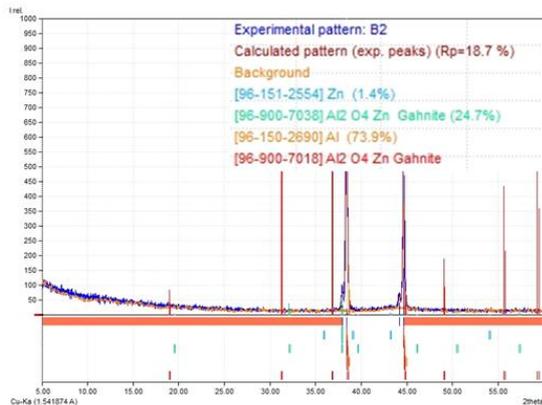
Pengujian X-Ray Diffraction (XRD) menggunakan radiasi Cu-Ka. Hasil dari pengujian XRD bertujuan

untuk mengetahui fasa apa saja yang terdapat pada sambungan FSSW [22]. Dalam pengujian XRD dilakukan dua pengujian, yaitu pengujian pada interface sambungan FSSW dengan partikel Zn dan tanpa partikel Zn. Gambar 10 merupakan hasil dari pengujian XRD pada pengelasan FSSW dengan variasi panjang pin 1,7 mm dan penetrasi shoulder 0,75 mm tanpa partikel Zn. Gambar tersebut menunjukkan komposisi fasa dari interface penampang melintang pada hasil pengelasan FSSW. Komposisinya terdiri dari Al dan Al₂CuO₄.



Gambar 10. Hasil uji XRD tanpa menggunakan partikel Zn.

Hasil pengujian XRD pada interface sambungan pengelasan FSSW dengan menggunakan partikel Zn dapat dilihat pada Gambar 11. Perbedaan pengujian XRD antara pengelasan tanpa partikel Zn dan dengan partikel Zn dapat ditunjukkan dengan adanya unsur Zn dan senyawa Al₂O₄Zn. Hal ini disebabkan pada partikel Zn terjadi reaksi solid solution antara Al dan Zn [21]. Dimana ketika proses pengelasan, saat Zn sudah melewati titik leleh dan aluminium mulai melunak, atom-atom Zn akan menyisip ke celah-celah dari atom aluminium [13]. Selain itu dengan bertambahnya penetrasi shoulder memperbanyak terjadinya solid solution, membuat butir di daerah reaksi tersebut menjadi semakin halus. Sehingga bertambahnya penetrasi shoulder akan membuat semakin keras, karena halusnya ukuran butir akan menghambat pergerakan dislokasi di daerah solid solution [18].



Gambar 11. Hasil uji XRD dengan menggunakan partikel Zn.

4. Kesimpulan

Kesimpulan yang diperoleh dari kajian ini adalah area MBD meningkat seiring bertambahnya panjang pin dan kedalaman *shoulder* sehingga cacat *hook* menjauh dari titik lasan. Al dan Zn dapat berdifusi dengan cara *solid solution* dan membentuk butir yang semakin halus seiring bertambahnya panjang pin dan kedalaman *shoulder*. Sambungan AA1100 dengan penambahan partikel Zn memiliki butir yang lebih halus dibandingkan sambungan AA1100 tanpa penambahan partikel Zn. Partikel Zn juga berhasil mengisi celah cacat *hook* sehingga cacat *hook* berkurang. Kekerasan sambungan meningkat seiring bertambahnya panjang pin dan kedalaman *shoulder*. Terjadi peningkatan kekerasan pada sambungan AA1100 dengan penambahan partikel Zn dibandingkan sambungan AA1100 tanpa penambahan partikel Zn. Partikel Zn efektif dalam meningkatkan kekerasan.

Daftar Pustaka

- [1] J. M. Piccini and H. G. Svoboda, 2015, "Effect of the tool penetration depth in Friction Stir Spot Welding (FSSW) of dissimilar aluminum alloys," *Procedia Mater. Sci.*, vol. 8, pp. 868–877.
- [2] H. T. Zhang, X. Y. Dai, and J. C. Feng, 2014, "Joining of aluminum and magnesium via pre-roll-assisted A-TIG welding with Zn interlayer," *Mater. Lett.*, vol. 122, pp. 49–51.
- [3] L. Zhang, E. Han, Y. Wu, X. Wang, D. Wu, 2018, "Surface decoration of short-cut polyimide fibers with multi-walled carbon nanotubes and their application for reinforcement of lightweight PC/ABS composites," *Applied Surface Science*, vol. 442, pp. 124–137.
- [4] T. Liyanage, J. Kilbourne, A. P. Gerlich, and T. H. North, 2009, "Joint formation in dissimilar Al alloy/steel and Mg alloy/steel friction stir spot welds," *Sci. Technol. Weld. Join.*, vol. 14, no. 6, pp. 500–508.
- [5] W. Yuan *et al.*, 2005, "Effect of tool design and process parameters on properties of Al alloy 6018 friction stir spot welds," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 211, no. 6, pp. 972–977, 2011.
- [6] R.S. Mishra, Z.Y. Ma, "Friction stir welding and processing," *J. Manuf. Process.*, vol. 19, pp. 108–119.
- [7] W. Li, J. Li, Z. Zhang, D. Gao, W. Wang, and C. Dong, 2014, "Improving mechanical properties of pinless friction stir spot welded joints by eliminating hook defect," *Mater. Des.*, vol. 62, pp. 247–254.
- [8] C. D. Cox, B. T. Gibson, A. M. Strauss, and G. E. Cook, 2014, "Energy input during friction stir spot welding," *J. Manuf. Process.*, vol. 16, no. 4, pp. 479–484.
- [9] J. Y. Cao, M. Wang, L. Kong, and L. J. Guo, 2016, "Hook formation and mechanical properties of friction spot welding in alloy 6061-T6," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 230, pp. 254–262.
- [10] R. Z. Xu, D. R. Ni, Q. Yang, C. Z. Liu, and Z. Y. Ma, 2015, "Influencing mechanism of Zn interlayer addition on hook defects of friction stir spot welded Mg-Al-Zn alloy joints," *Mater. Des.*, vol. 69, pp. 163–169.
- [11] M. Miyagawa, K., Tsubaki, M., Yasui, T., Fukumoto, 2008, "Spot Welding between Aluminum Alloy and Zn Coated Steel by Friction Stirring," *J. Japan Inst. Light Met.* 23, pp. 131–136.
- [12] R. Z. Xu, D. R. Ni, Q. Yang, C. Z. Liu, and Z. Y. Ma, 2015, "Influencing mechanism of Zn interlayer addition on hook defects of friction stir spot welded Mg-Al-Zn alloy joints," *Mater. Des.*, vol. 69, pp. 183–189.
- [13] R. S. Mishra, M. W. Mahoney, and R. S. Company, 2007, "Chapter 1".
- [14] R. Balasundaram, V. K. Patel, S. D. Bhole, and D. L. Chen, 2018, "Effect of zinc interlayer on ultrasonic spot welded aluminum-to-copper joints," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 607, pp. 277–286.
- [15] S. Hirasawa, H. Badarinarayan, K. Okamoto, T. Tomimura, and T. Kawanami, 2010, "Analysis of effect of tool geometry on plastic flow during friction stir spot welding using particle method," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 210, no. 11, pp. 1855–1863.
- [16] M. K. Bilici and A. I. Yüklér, 2018, "Influence of tool geometry and process parameters on macrostructure and static strength in friction stir spot welded polyethylene sheets," *Mater. Des.*, vol. 33, no. 1, pp. 185–192.
- [17] R. S. Mishra and M. W. Mahoney, 2007, "Friction Stir Welding and Processing," *ASM Int.*, p. 368.
- [18] M. Dr. Ir. I KT. Suarsana, 2017, *Ilmu Material Teknik*.

- [19] W. Callister and D. Rethwisch, 2007, *Materials science and engineering: an introduction*, vol. 94.
- [20] Adhi, P., N. Muhayat, and Triyono, 2018, Pengaruh Panjang pin dan Penetrasi shoulder pada sambungan FSSW AA 1100 dengan intrlayer Zn. *Mekanika*. 1-6.
- [21] A. Boucherit and R. Taillard, 2017, "Effect of a Zn interlayer on dissimilar FSSW of Al and Cu," *Mater. Des.*, vol. 23, no. 124, pp. 87–99.
- [22] Y. C. Lin and J. N. Chen, 2015, "Influence of process parameters on friction stir spot welded aluminum joints by various threaded tools," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 225, pp. 347–356.