

KARAKTERISASI KUALITAS LASAN PADA BAHAN SERUPA AZ31B DENGAN PROSES *MICRO-FRICTION STIR SPOT WELDING* (μ FSSW) UNTUK APLIKASI KENDARAAN

Agus Widyianto^{1*}, Aan Yudianto¹, Herminarto Sofyan², Gunadi²

¹Departemen Teknik Mesin dan Otomotif, Fakultas Vokasi, Universitas Negeri Yogyakarta
Kampus UNY Wates 55652

²Departemen Pendidikan Teknik Otomotif, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Yogyakarta
Kampus UNY Karang Malang 55281

*Corresponding Author: aguswidyianto@uny.ac.id

Abstract

This study's successful implementation of micro-friction stir spot welding (μ FSSW) on AZ31B material has significant implications for its practical application in various industries. The study's findings suggest that this welding technique can produce firm joints in AZ31B materials with a thickness of 0.3 mm and 0.5 mm. The optimal welding geometry was obtained at 500 milidetik and 500 microns, resulting in maximum shear load and cross load of 326 N and 88 N, respectively. The study also examined the mechanical properties of the joint, including its hardness, and analyzed the material's microstructure. The hardness of the material increased at the center stir zone (SZ), indicating the formation of a stronger joint. The SZ also showed smaller grains compared to the thermo-mechanically affected zone (TMAZ), suggesting that the μ FSSW technique had a positive impact on grain refinement. However, the heat-affected zone (HAZ) exhibited partially recrystallized grains. Overall, these findings demonstrate the potential of μ FSSW as a reliable welding technique for AZ31B materials, with promising mechanical properties and improved microstructure. Further research could explore its applicability in other materials and industries, as well as optimize the welding parameters for even better results.

Key Words: Micro-friction stir spot welding, Magnesium alloy, Mechanical properties, Metallography

Abstrak

Keberhasilan penerapan *micro-friction stir spot welding* (μ FSSW) pada bahan AZ31B pada penelitian ini memiliki implikasi yang signifikan untuk aplikasi praktisnya di berbagai industri. Temuan penelitian menunjukkan bahwa teknik pengelasan ini dapat menghasilkan sambungan yang kokoh pada material AZ31B dengan ketebalan 0,3 mm dan 0,5 mm. Geometri pengelasan optimal diperoleh pada 500 milidetik dan 500 mikron, menghasilkan beban geser maksimum dan beban silang masing-masing sebesar 326 N dan 88 N. Studi ini juga meneliti sifat mekanik sambungan, termasuk kekerasannya, dan menganalisis struktur mikro material. Kekerasan material meningkat pada *center stir zone* (SZ), menandakan terbentuknya sambungan yang lebih kuat. SZ juga menunjukkan butiran yang lebih kecil dibandingkan dengan *thermo-mechanically affected zone* (TMAZ), menunjukkan bahwa teknik μ FSSW memiliki dampak positif pada penyempurnaan butiran. Namun, *heat-affected zone* (HAZ) menunjukkan butiran yang terrekristalisasi sebagian. Secara keseluruhan, temuan ini menunjukkan potensi μ FSSW sebagai teknik pengelasan yang andal untuk material AZ31B, dengan sifat mekanik yang menjanjikan dan struktur mikro yang lebih baik. Penelitian lebih lanjut dapat mengeksplorasi penerapannya pada bahan dan industri lain, serta mengoptimalkan parameter pengelasan untuk hasil yang lebih baik.

Kata Kunci: *Micro-friction stir spot welding*, Paduan magnesium, Sifat mekanik, Metalografi

PENDAHULUAN

Friction stir spot welding (FSSW) adalah teknik penyambungan *solid-state* untuk pengelasan spot lembaran bahan tipis seperti aluminium, magnesium, dan titanium tanpa bahan tambahan seperti perekat atau logam pengisi (Matsuda et al., 2022; Z. Zhang et al., 2011). FSSW telah mendapatkan perhatian yang signifikan di berbagai industri karena dapat menghasilkan sambungan yang berkualitas tinggi, andal, dan hemat biaya (Tozaki, Uematsu, & Tokaji, 2007). Prosesnya melibatkan alat berputar yang menghasilkan panas dan tekanan, menyebabkan logam melunak dan terikat. Meskipun FSSW memiliki beberapa keunggulan serta tantangan dibandingkan teknik las konvensional, seperti keausan pahat dan pelepasan chip masih perlu diperhatikan (Badarinarayan, Shi, Li, & Okamoto, 2009).

Paduan magnesium AZ31B memiliki potensi tinggi di berbagai industri karena sifatnya yang sangat baik, seperti rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi dan sifat mampu bentuk yang baik. Namun, pemrosesan dan pengelasannya menghadirkan tantangan karena reaktivitasnya yang tinggi dan keuletannya yang rendah (Sun et al., 2021; Yaknesh, Sampathkumar, & Sevvell, 2022). Teknik seperti pengelasan tempat pengadukan gesekan, pengelasan laser, dan ikatan perekat telah dikembangkan untuk mengatasi tantangan ini. FSSW telah menjadi teknik pengelasan yang menjanjikan karena melunakkan dan merekatkan lembaran logam (Ahmed et al., 2022).

Meskipun *friction stir spot welding* (FSSW) memiliki banyak keunggulan sebagai teknik pengelasan, penelitian terbatas telah dilakukan pada penerapannya untuk paduan magnesium. Beberapa penelitian telah melaporkan bahwa FSSW menghasilkan pertumbuhan butir dan mengurangi kekerasan di zona pengelasan paduan magnesium AZ31B-H24, seperti dicatat oleh Lee dkk. (Lee, Yeon, & Jung, 2003). Esparza dkk (Esparza, Davis, Trillo, & Murr, 2002) mengamati struktur butir dengan butir rekristalisasi equiaxed di zona FSW paduan magnesium AZ31B, dan paduan magnesium AZ31 lainnya memiliki kehalusan butir dan kekerasan mikro yang lebih tinggi di zona FSW, menurut penelitian mereka (Xunhong & Kuaishe, 2006). Zhang dkk. (H. Zhang, Lin, Wu, Feng, & Ma, 2006) meneliti korelasi antara aliran material dan cacat pada pengelasan gesekan paduan magnesium AZ31, sementara Abbasi Garache dkk. (Gharacheh, Kokabi, Daneshi, Shalchi, & Sarrafi, 2006) mempelajari pengaruh rasio kecepatan transportasi yang berbeda pada sifat mekanik zona yang berbeda dalam paduan magnesium AZ31. Studi terakhir menemukan bahwa peningkatan rasio kecepatan/kecepatan transpor menyebabkan sedikit penurunan pada hasil dan kekuatan akhir zona campuran dan transisi. Meningkatkan rasio kecepatan rotasi terhadap kecepatan lintasan menghasilkan nugget las yang lebih besar dan mengurangi penetrasi akar yang tidak sempurna. David Lukmanto dkk.

(Lukmanto, Muhayat, & Triyono, 2020) meneliti pengaruh dari geometri pahat terhadap sifat mekanik pada material AA1100 yang ditambahkan dengan interlayer Zn ditengahnya. Metode pengelasan yang digunakan adalah *friction stir spot welding* dan hasilnya menunjukkan bahwa penambahan interlayer Zn dapat memperbaiki kekerasan material.

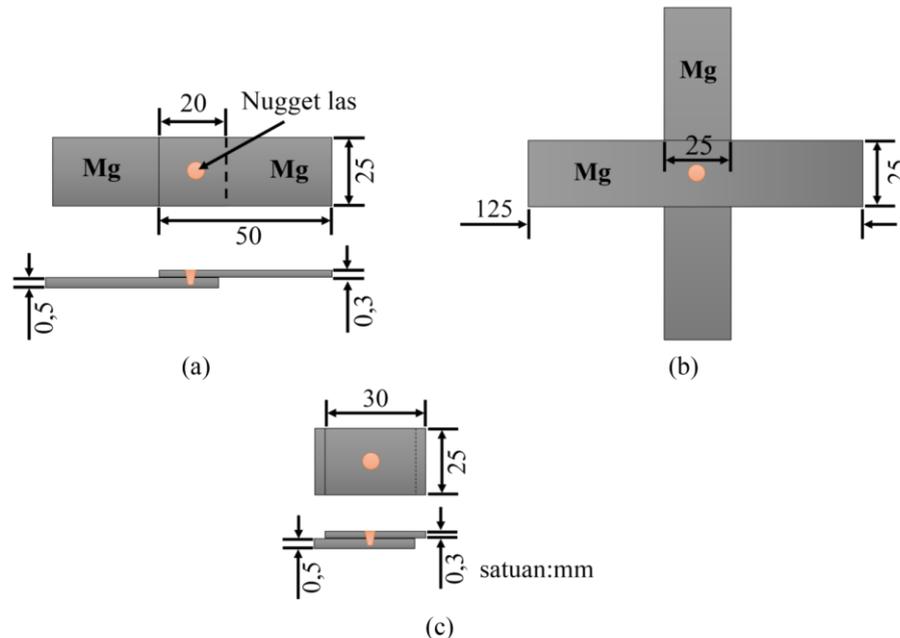
Parik dkk. (Pareek, Polar, Rumiche, & Indacochea, 2007) meneliti modifikasi struktur mikro yang disebabkan oleh gesekan aduk las paduan magnesium AZ31B-H24. Selain itu, mereka memeriksa dampak pada sifat mekanik sambungan dan kinerja korosi. Ukuran butir rata-rata dari semua sampel yang dilas lebih besar dari sampel paduan magnesium yang disetujui yang dianalisis dalam penelitian mereka. Dalam penelitian lain, Zhang Hua dkk. (Hua Zhang, Wu, Huang, Sanbao, & Lin, 2007) mempelajari pengaruh kecepatan pengelasan pada pola aliran material, dan di dalam nugget, mereka mengamati dua aliran material yang signifikan. Oleh karena itu, mereka mengusulkan agar Aliran 1 menentukan apakah lasan itu sempurna.

Selanjutnya, pengaruh kecepatan pengelasan pada kualitas sambungan untuk paduan magnesium AZ31B-H24 dipelajari oleh Cao dkk. (Cao & Jahazi, 2009) menggunakan pengelasan adukan gesek. Menurut temuan, tingkat kekerasan menurun secara progresif dari logam dasar ke zona yang terkena termomekanik melalui zona yang terpengaruh panas, dan akhirnya ke zona pencampuran, di mana kekerasan terendah diamati. Hasilnya juga menunjukkan bahwa kecepatan pengelasan yang lebih cepat menghasilkan kekerasan yang sedikit lebih tinggi di zona pencampuran. Kapasitas menahan beban sambungan las merupakan pertimbangan penting di banyak industri, dan biasanya dievaluasi dengan memeriksa kekuatan tarik sambungan (Afrin, Chen, Cao, & Jahazi, 2008). Kekuatan tarik sambungan las terkait erat dengan struktur mikro dan kekerasan las, keduanya sangat dipengaruhi oleh siklus termal dari proses pengelasan (Mohammadi et al., 2015). Siklus termal dari proses pengelasan, pada gilirannya, terutama ditentukan oleh berbagai parameter proses pengelasan.

Namun, terlepas dari pentingnya faktor-faktor ini, hanya ada sedikit penyelidikan sistematis yang dilakukan sampai saat ini untuk mengeksplorasi efek dari berbagai parameter proses μ FSSW pada kualitas las paduan magnesium AZ31B dengan ketebalan kurang dari 1 mm, yaitu biasanya dibuat melalui pengelasan adukan gesek. Secara khusus, peran parameter seperti kecepatan putaran pahat, waktu pengelasan, kedalaman pengelasan, dan gaya aksial tetap dipahami sepenuhnya. Mengingat pentingnya paduan ini dan tantangan unik yang ditimbulkan oleh pengelasannya, penelitian lebih lanjut di bidang ini dapat secara signifikan meningkatkan pemahaman kami tentang μ FSSW dan membantu mengoptimalkan proses pengelasan untuk paduan magnesium AZ31B.

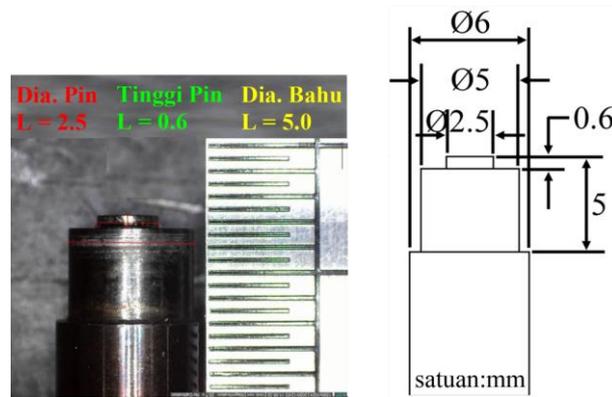
METODE

Studi ini menggunakan bahan dengan ketebalan 0,3 mm dan 0,5 mm yang sejenis jenis paduan magnesium AZ31B. Bahan AZ31B dianalisis secara kimia menggunakan perangkat spektroskopi plasma optik untuk memastikan hasil yang akurat. Selain itu, pelat dibersihkan dengan aseton sebelum pengelasan untuk mencegah kontaminasi. Material AZ31B mengandung berbagai unsur, antara lain Al (3,10%), Cu (0,0009%), Zn (0,99%), Mn (0,30%), Fe (0,0029%), Si (0,14%), Ni (0,00063%), dan Mg (seimbang).



Gambar 1. Spesimen untuk pengujian memiliki ukuran yang berbeda untuk tiga jenis pengujian: a) beban tegangan geser, b) beban tegangan silang, dan c) analisis metalografi

Penelitian ini menggunakan las titik dengan μ FSSW dan melakukan tiga pengujian: beban tegangan geser, beban tegangan silang, dan analisis metalografi. Benda uji disiapkan dengan ukuran yang berbeda-beda untuk setiap pengujian, dengan dimensi benda uji untuk uji beban tarik geser adalah 50 mm x 25 mm (Gambar 1a), dan untuk uji beban tarik silang adalah 125 mm x 25 mm. (Gambar 1b). Untuk pengujian metalografi, spesimen pada Gambar 1c memiliki panjang 30 mm dan lebar 25 mm. Bahan dengan ketebalan 0,3 mm diletakkan di atas bahan lain dengan ketebalan 0,5 mm. Setiap benda uji diulang sebanyak tiga kali.



Gambar 2. Mengilustrasikan ukuran dan bentuk pahat *micro-friction stir spot welding*

Pahat yang digunakan pada μ FSSW dijelaskan pada Gambar 2, terdiri dari *High Speed Steel* (HSS) dengan diameter bahu 5,0 mm, diameter pin 2,5 mm, dan tinggi pin 0,6 mm. Mesin las yang digunakan adalah mesin milling EMCO CNC TU-3A hasil modifikasi dengan ketelitian 0,01 mm. Spindel diambil dari mesin bor turner tipe MT912 Maktec dengan spesifikasi die grinder 6 mm dan kecepatan putaran spindel 33.000 rpm. Parameter proses pengelasan, termasuk kedalaman penetrasi (*plunge depth/PD*) dan waktu pengadukan (*dwelt time/DT*) dirinci dalam Tabel 1.

Tabel 1. Parameter yang digunakan pada proses μ FSSW

No	<i>Dwell time</i> (milidetik)	<i>Plunge depth</i> (mikron)
1	300	400
2	300	500
3	300	600
4	500	400
5	500	500
6	500	600
7	700	400
8	700	500
9	700	600

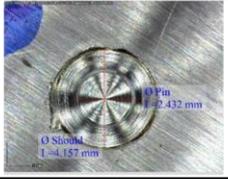
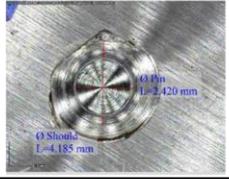
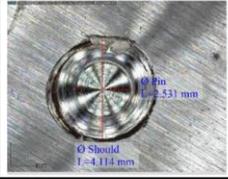
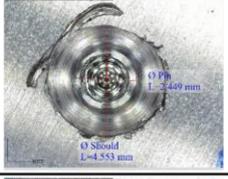
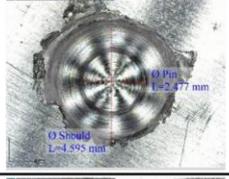
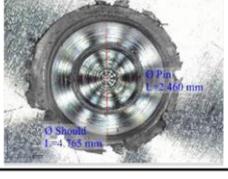
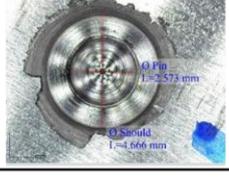
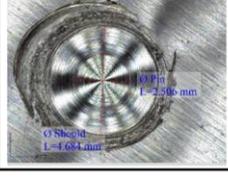
Evaluasi geometri las melibatkan pengukuran diameter nugget las, area *Thermo-mechanically affected zone* (TMAZ), dan kedalaman penetrasi. Uji geser dan tegangan silang dilakukan menggunakan mesin tegangan A&D CNC. Pengamatan metalografi dilakukan dengan pemotongan dan pemasangan las, pengamplasan, dan pemolesan. Struktur mikro diperiksa menggunakan mikroskop optik, khususnya model Oxion Inverso OX 2153-PLM, dan struktur makro dilihat menggunakan mikroskop digital. Etsa dengan reagen Keller digunakan untuk memvisualisasikan struktur mikro hasil pengelasan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

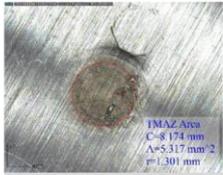
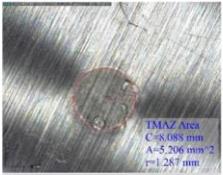
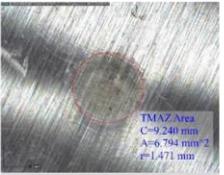
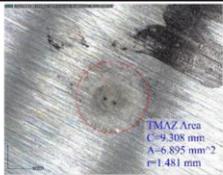
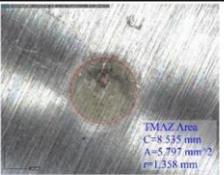
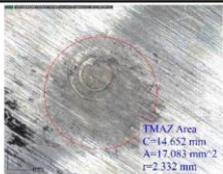
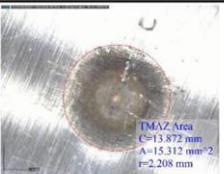
Karakterisasi kualitas lasan salah satunya adalah geometri las meliputi mengukur diameter

nugget las, luas TMAZ, dan kedalaman penetrasi untuk mengevaluasi kualitas geometri las. Selain itu, mikroskop digital dan kaliper digunakan untuk melakukan pengukuran dari atas dan belakang lasan untuk mendapatkan data yang akurat. Pengukuran ini penting untuk menilai kualitas lasan dan memastikannya memenuhi standar untuk aplikasi yang dimaksud.

DT (md) PD (mikron)	300	500	700
400			
500			
600			

Gambar 3. Pengukuran diameter nugget las tampak bagian atas untuk material Mg-Mg

Gambar 3 menunjukkan hasil pengukuran diameter nugget las material Mg-Mg bagian atas. Pengukuran meliputi diameter pin las dan bahu las. Penelitian ini mencakup tiga variasi waktu pengadukan dan kedalaman penetrasi yang berbeda. Diameter bahu las telah diamati mulai terbentuk pada 400 mikron perendaman dan meningkat dengan meningkatnya perendaman.

DT (md) / PD (mikron)	300	500	700
400			
500			
600			

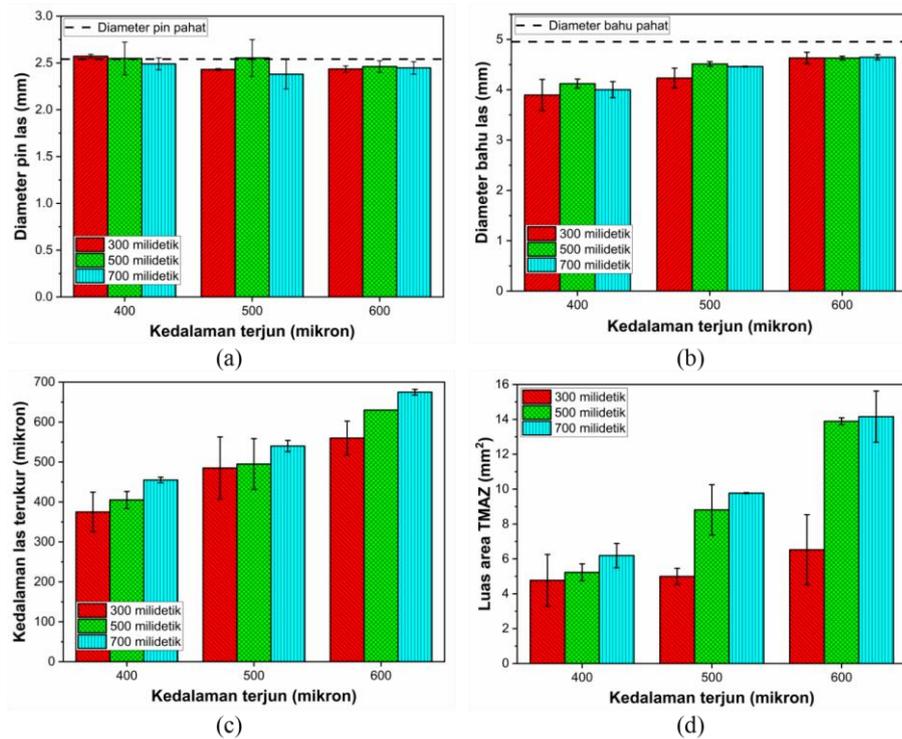
Gambar 4. Hasil pengukuran area TMAZ pada permukaan belakang material Mg-Mg

Selanjutnya dilakukan pengukuran TMAZ yang terbentuk pada pelat belakang. Area TMAZ diukur dan ditampilkan pada Gambar 4. Semakin luas area TMAZ, semakin dalam kedalaman tusukan. Selain itu, waktu pencampuran antara alat dan bahan juga berdampak pada area TMAZ, karena panas yang lebih tinggi dihasilkan antara alat dan bahan. Dari hasil ini akan dianalisis lebih lanjut dari geometri las, sifat mekanik dan metalografi untuk mengkarakterisasi kualitas lasan pada material AZ31B.

Pembahasan

Geometri Las

Gambar 5a - 5d disajikan hasil geometri las untuk material Mg-Mg yang meliputi pengukuran diameter pin dan bahu las, kedalaman penetrasi, dan area TMAZ. Diameter pin las sangat mirip dengan pin pahat yang digunakan, namun saat kedalaman penetrasi mencapai 600 mikron, diameter pin menjadi lebih kecil dari diameter pahat. Diameter pin las terbesar adalah 2,57 mm, dengan kesalahan 2,3% diamati di bawah 300 milidetik dan 400 mikron.



Gambar 5. Geometri las μ FSSW untuk Mg-Mg dianalisis dalam hal (a) diameter pin, (b) diameter bahu las, (c) kedalaman penetrasi, dan (d) area TMAZ

Gambar 5b disajikan diameter bahu yang dilas, dan terlihat bahwa diameternya masih lebih kecil dari diameter alat bahu. Diameter bahu maksimum yang dicapai adalah 4,65 mm saat menggunakan 700 milidetik dan 600 mikron. Alasannya adalah kedalaman tusukan yang digunakan, karena kedalaman tusukan yang dangkal menghasilkan diameter bahu yang lebih kecil. Ario dkk. (Ario Sunar Baskoro, Amat, & Widiyanto) telah menemukan bahwa geometri las μ FSSW dipengaruhi oleh waktu tunda dan geometri pahat, di mana peningkatan waktu tunda akan menghasilkan geometri las yang lebih besar, dan mengubah bentuk pahat dapat menyebabkan bentuk las yang lebih besar (A. S. Baskoro, Riyanto, Arifardi, & Rupajati, 2020; Özgül & Dedeoğlu, 2020).

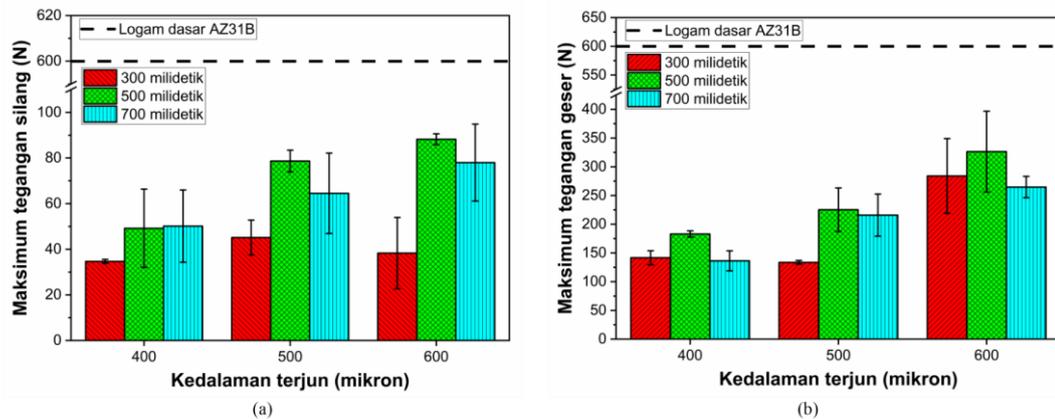
Hasil pengukuran kedalaman tusukan dan area *Thermo-mechanically affected zone* (TMAZ) untuk Mg-Mg ditunjukkan pada Gambar 5c dan 5d. Data menunjukkan bahwa lama pengadukan mempengaruhi kedalaman tusukan dan area TMAZ, dengan waktu pengadukan yang lebih lama menghasilkan kedalaman tusukan yang lebih tinggi dan area TMAZ yang lebih luas. Kedalaman tusukan berbanding lurus dengan kedalaman tusukan yang diukur. Area TMAZ maksimum yang diamati adalah 14,16 mm² dengan error 1,47%.

Sifat Mekanik

Kekuatan las bahan magnesium dievaluasi melalui pengujian tarik menurut standar ISO

14273. Benda uji yang digunakan untuk pengujian memiliki dimensi 0,8 mm x 175 mm x 25 mm. Dua jenis pengujian, beban tegangan silang (BTS) dan beban tegangan geser (BTG), dilakukan untuk menentukan kekuatan spesimen. BTS menerapkan pembebanan lateral, sedangkan BTG menerapkan pembebanan aksial.

Gambar 6 menggambarkan hasil uji tarik yang dilakukan pada material magnesium. Hal ini menunjukkan bahwa kuat tarik beban geser lebih besar daripada beban silang. Beban geser tertinggi yang dicapai adalah 326 N dengan error 7,35%, diperoleh pada waktu *dwell time* 500 milidetik dan kedalaman tusukan 600 mikron. Beban silang maksimum terbesar yang diperoleh adalah 88 N dengan error 2,37%, dicapai pada waktu diam dan kedalaman tusukan yang sama. Logam dasar AZ31B memiliki ketebalan 5 mm dan kekuatan tarik 600 N, yang jauh lebih tinggi daripada nilai kekuatan geser dan tarik silang.



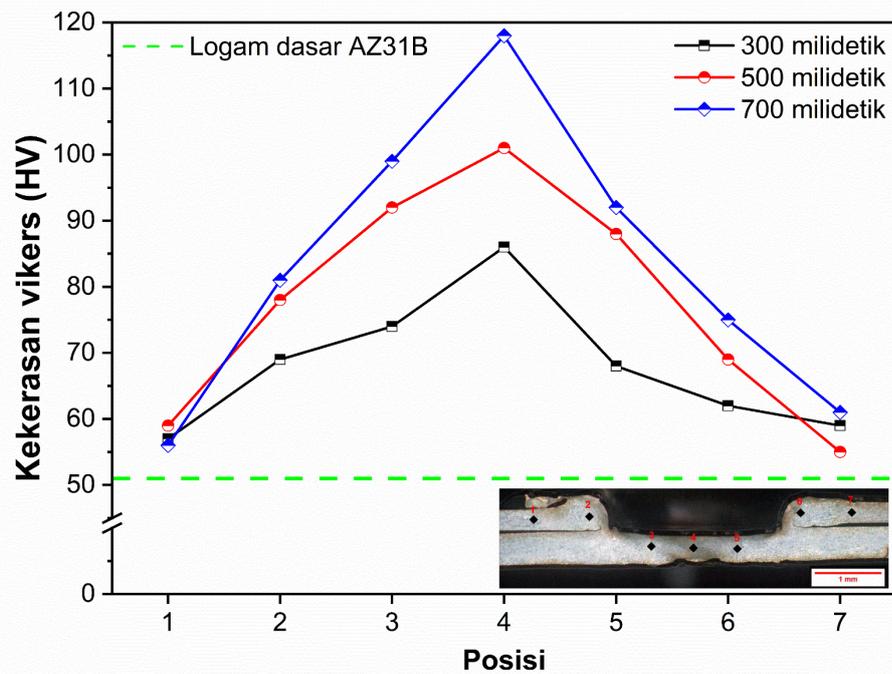
Gambar 6 Uji tarik μ FSSW material Mg-Mg maksimum (a) BTS, dan (b) BTG

Kekuatan tarik maksimum dapat ditingkatkan dengan meningkatkan kedalaman tusukan dan memperpanjang waktu pengadukan. Parameter μ FSSW berdampak pada kekuatan tarik maksimum. Dengan menambah kedalaman tusukan, sambungan antara kedua spesimen dapat diperkuat, yang juga dipengaruhi oleh ketebalan pelat dan pahat yang digunakan. Selain itu, durasi gesekan antara alat dan benda uji secara signifikan mempengaruhi panas dan kualitas sambungan las (Kwon, Shigematsu, & Saito, 2008). Selain itu, Ario dkk. (Ario Sunar Baskoro et al.) telah menyatakan bahwa waktu pengadukan meningkatkan kekuatan tarik.

Hanya tiga parameter pengelasan yang dipilih untuk pengujian kekerasan mikro: waktu pengadukan 300 milidetik, 500 milidetik, dan 700 milidetik dengan kedalaman penetrasi 500 mikron. Hal ini dilakukan untuk mengamati pengaruh waktu pengadukan pada kekerasan mikro pada bahan Mg-Mg yang serupa. Oleh karena itu, tujuh titik uji dipilih pada pelat magnesium, termasuk dua di area HAZ, dua di area samping SZ, dan tiga di area tengah SZ.

Pada Gambar 7, data dari uji kekerasan mikro disajikan. Hal tersebut menunjukkan bahwa nilai kekerasan daerah HAZ dan SZ lebih tinggi dibandingkan logam dasar magnesium yang

memiliki nilai kekerasan 51 Hardness Value (HV). Selain itu, nilai kekerasan wilayah SZ secara bertahap meningkat menuju pusat SZ. Namun, di area tengah SZ, nilai kekerasan meningkat secara signifikan untuk semua parameter waktu pengadukan. Pola kekerasan untuk material tampak seperti "V" terbalik untuk semua parameter. Nilai kekerasan maksimal untuk setiap parameter *dwelt time* 300 milidetik, 500 milidetik, dan 700 milidetik berturut-turut adalah 86 HV, 101 HV, dan 118 HV. Hanya tiga parameter pengelasan yang diuji, semuanya pada 500 mikron.

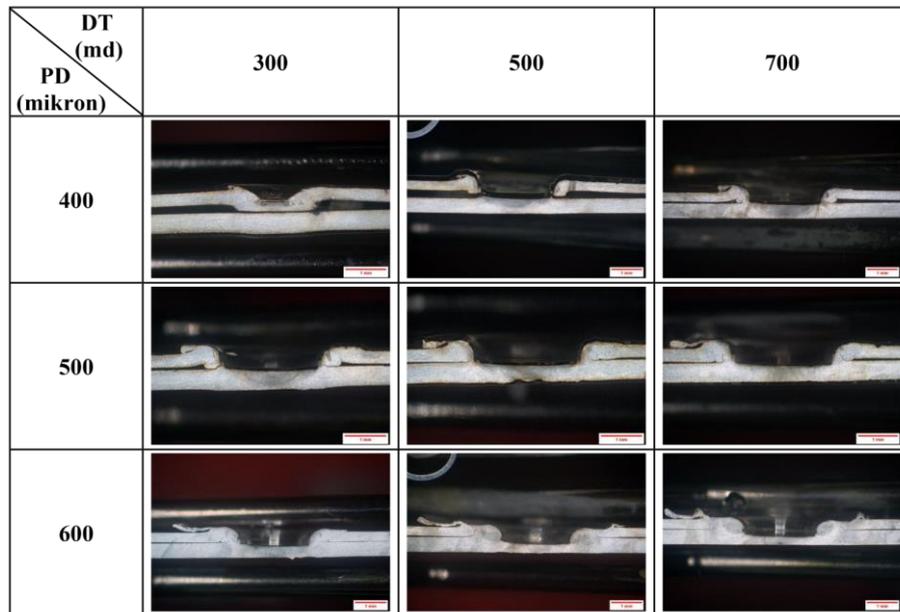


Gambar 7. Grafik uji kekerasan mikro yang dilakukan pada material Mg-Mg

Ukuran butir suatu material memainkan peran penting dalam menentukan sifat-sifatnya. Selama FSSW, material mengalami suhu tinggi, yang dapat menyebabkan butiran menjadi kasar dan selanjutnya menurunkan nilai kekerasan. Hal ini karena dengan naiknya suhu, panas yang dihasilkan juga meningkat, dan struktur butiran menjadi kasar [6]. Oleh karena itu, kekerasan sambungan yang dihasilkan oleh FSSW sangat dipengaruhi oleh ukuran butir material. Ukuran butir yang lebih halus cenderung menghasilkan nilai kekerasan yang lebih tinggi, karena batas butir yang lebih kecil bertindak sebagai penghalang pergerakan dislokasi, yang menghambat deformasi dan meningkatkan kekerasan [23]. Fenomena ini telah banyak dipelajari dan didokumentasikan dalam literatur, dan peneliti telah mengembangkan berbagai metode untuk mengontrol ukuran butir selama FSW untuk meningkatkan sifat mekanik sambungan las [1, 17].

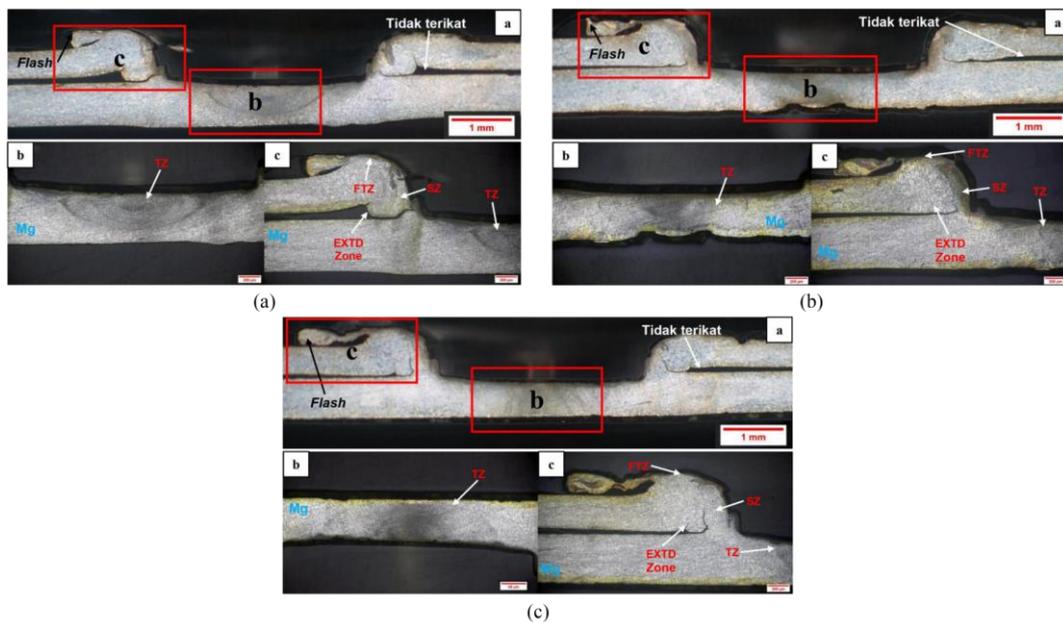
Metalografi

Struktur makro dari material Mg-Mg dianalisis dengan parameter pengelasan yang berbeda, dan temuannya disajikan pada Gambar 8. Studi ini menemukan penetrasi dan ikatan las yang tidak memadai terjadi pada 300 milidetik dan 400 mikron. Kedalaman las meningkat dengan kedalaman penetrasi yang lebih dalam, dan waktu pengadukan yang lebih lama dapat memperluas diameter nugget las. Namun, las yang buruk dihasilkan dengan waktu pengadukan 700 milidetik karena pelat atas yang terangkat dan kilatan yang lebih tebal terjadi pada pelat atas. Waktu pengadukan yang lama juga dapat mempengaruhi panas yang diterima oleh bahan.



Gambar 8. Makrostruktur material Mg-Mg dengan beberapa variasi *dwell time* dan *plunge depth*

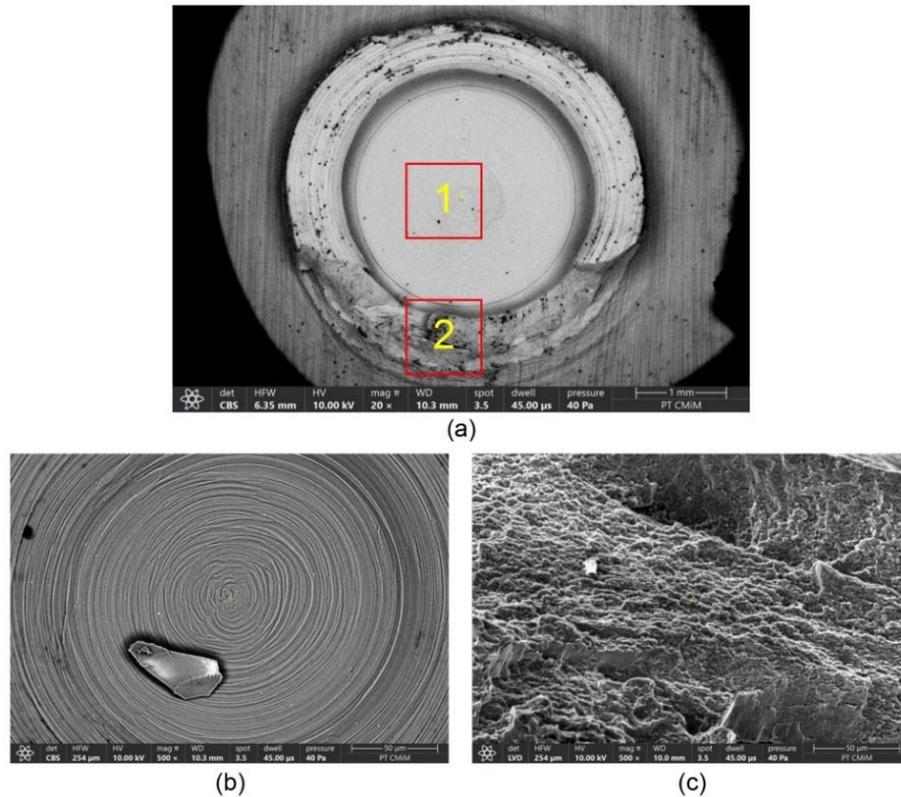
Struktur makro dan struktur mikro bahan Mg-Mg dengan kedalaman penetrasi 500 mikron dan waktu pengadukan yang berbeda dianalisis dengan mikroskop (Gambar 9a). Pemeriksaan menunjukkan bahwa pada 300 milidetik dan 500 mikron, sisi las yang tidak ditekan tampaknya tidak tercampur dengan tepat, dengan kilatan kecil terlihat jelas di sisi kiri las. Selain itu, area yang terkena panas memiliki struktur mikro yang berbeda dari area sekitarnya. Beberapa daerah, termasuk zona ekstrusi (*extended zone/EXTD*), zona aduk (*stir zone/SZ*), zona transisi aliran (*flow transition zone/FTZ*), dan zona torsi (*torsion zone/TZ*), diamati. Selain itu, retakan diamati menuju area aduk zona.



Gambar 9. Metalografi Mg-Mg pada kedalaman penetrasi 500 mikron dan *dwell time*: a) 300 milidetik, b) 500 milidetik, dan c) 700 milidetik

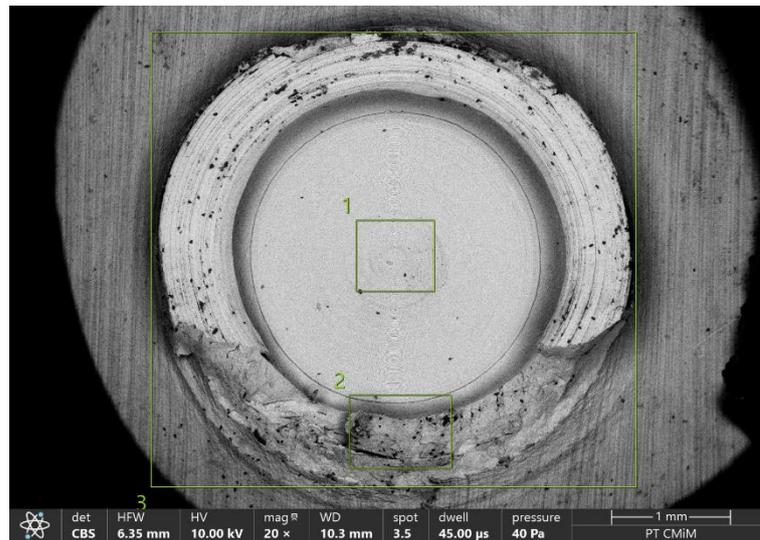
Analisis makroskopik material Mg-Mg pada 500 mikron dan 500 milidetik menunjukkan kilatan kecil pada pelat atas las dan beberapa area pada sisi las yang tidak terikat sempurna (Gambar 9b). Pengamatan mikrostruktur menunjukkan struktur mikro yang berbeda di daerah *torsion zone* (TZ) dan membentuk kait di tepi area las yang cenderung mengarah ke pelat atas, dengan beberapa area di samping kait yang tidak terikat dengan baik. Pengamatan metalografi dilakukan pada material Mg-Mg pada 500 mikron dan 700 milidetik (Gambar 9c). Temuan menunjukkan sedikit elevasi pada pelat atas, menyebabkan ikatan yang tidak sempurna antara bahan. Flash yang dihasilkan relatif lebih kecil dibandingkan material magnesium lainnya. Mikrostruktur daerah tengah las menunjukkan struktur mikro yang berbeda dari daerah tetangganya karena efek panas yang lebih signifikan di zona aduk.

Area SZ memiliki butir yang lebih kecil karena rekristalisasi dinamis, sedangkan wilayah TMAZ memiliki butir rekristalisasi yang lebih besar. Wilayah HAZ terdiri dari butiran yang direkristalisasi sebagian dan butiran logam dasar. Pada kedalaman penetrasi 500 mikron, ukuran butir di SZ dan TMAZ lebih besar, sekitar 400 mikron. Kedalaman penetrasi yang sangat besar dan waktu pengadukan alat menyebabkan peningkatan panas yang dihasilkan, menghasilkan rekristalisasi yang lebih besar. Sebaliknya, kedalaman penetrasi alat yang lebih rendah dan kecepatan putaran menghasilkan panas yang lebih sedikit, menghasilkan struktur butiran yang lebih halus (Ario Sunar Baskoro, Hadisiswojo, Kiswanto, Amat, & Chen, 2020). Hubungan antara kecepatan putaran pahat dan ukuran butir telah dilaporkan sebelumnya (Rao et al., 2013).



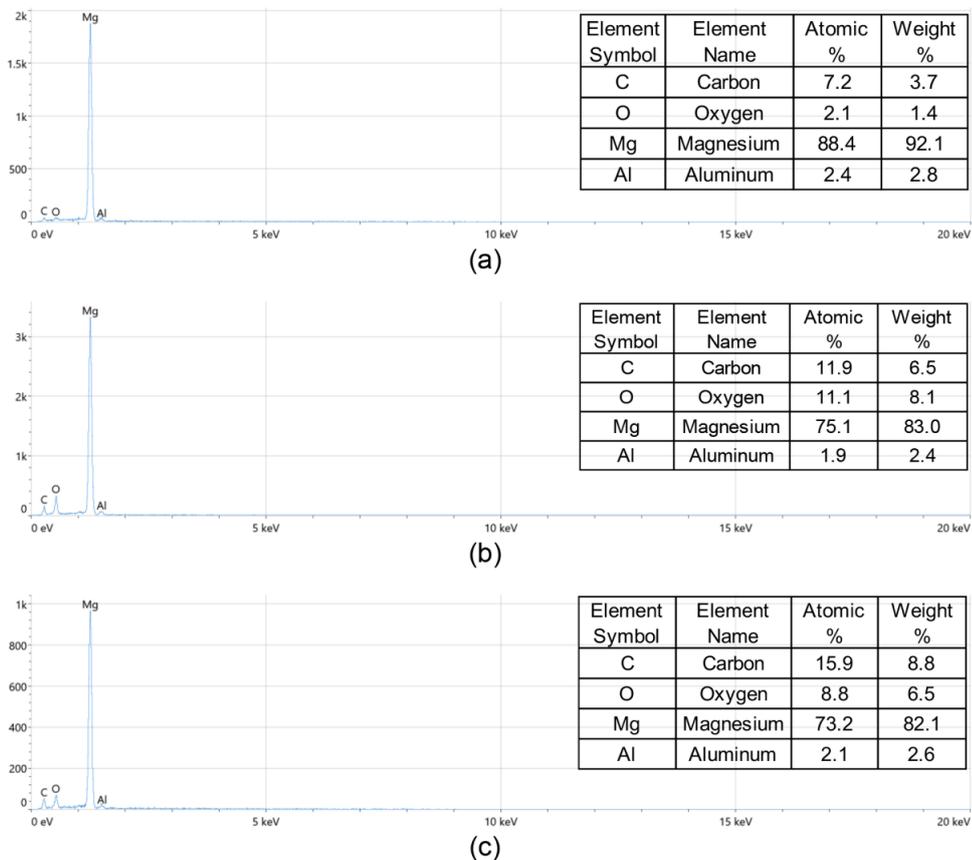
Gambar 10. SEM lokasi patahan uji tarik geser pada Mg-Mg sejenis: a) perbesaran rendah, b) perbesaran tinggi pada daerah 1 dan c) perbesaran tinggi pada daerah 2

Pengujian SEM dilakukan pada permukaan sampel uji tarik geser atau lokasi patahan untuk mengidentifikasi patahan kasar yang memiliki ciri-ciri dengan dimensi yang mirip dengan ukuran butiran weld nugget. Gambar 10 menampilkan pengamatan SEM dari salah satu parameter pengelasan. Sisa patahan dari hasil uji tarik untuk material Mg-Mg sejenis menempel pada pelat bawah (Gambar 10a), menandakan material sudah tersambung dengan baik. Area pusat sesar tampak lebih dalam, dan hasilnya disajikan pada Gambar 10b. Hasil di tengah mirip dengan bekas gesekan alat yang digunakan pada bahan magnesium. Selain itu, Gambar 10c menampilkan pengamatan kesalahan di wilayah tepi. Pada permukaan rekahan yang dipilih, beberapa lekukan dan tepi sobekan dengan mode rekahan ulet menunjukkan kapasitas deformasi plastis diamati (Dedeoğlu & Güler Özgül, 2019; Özgül & Dedeoğlu, 2020).



Gambar 11. Lokasi pengambilan area uji EDS pada material Mg-Mg

Pengujian EDS dilakukan untuk melihat unsur Mg dan unsur lainnya pada lokasi patahan shear tensile test. Terdapat tiga area uji EDS yaitu area 1 tepat ditengah lasan, area 2 bagian tepi patahan dan area 3 merupakan luasan area patahan yang ditunjukkan pada Gambar 11. Analisis unsur lebih lanjut dilakukan pada sampel patahan shear tensile test untuk menyelidiki pengaruh parameter μ FSSW. Analisis unsur sampel patahan untuk parameter PD 500 mikron dan DT 700 milidetik telah dilakukan, dimana hasil spectrum EDS disajikan pada Gambar 12.



Gambar 12. Spektrum EDS pada similar Mg-Mg dari area a) 1, b) 2 dan c) 3

Area 1 merupakan area tengah lasan pada lokasi patahan shear tensile test yang ditunjukkan pada Gambar 12a. Unsur Mg pada area 1 ini adalah 92,1 wt.%. Kandungan unsur Mg masih sangat tinggi pada area 1 ini karena patahan plat bagian atas menempel ke bagian plat bawah. Gambar 12b menunjukkan spektrum EDS pada area 2 yang merupakan tepi lokasi patahan. Kandungan unsur Mg sebesar 83,0 wt.%. Di area 2 ini unsur Mg turun kandungannya. Hal ini karena ada sebagian di area 2 yang menguji plat bagian bawah yaitu material magnesium. Area 3 merupakan area yang lebih luas dari area 1 dan 2 yang menunjukkan daerah patahan, spektrum EDS nya ditunjukkan pada Gambar 12c. Kandungan unsur Mg sebesar 82,1 wt.%. Area yang lebih luas menyebabkan spektrum EDS yang diuji lebih luas untuk plat magnesium, namun unsur Mg tidak mengalami penurunan kandungan yang signifikan.

Tabel 2. Hasil pengujian EDS pada material Mg-Mg

Nama elemen	Atom (%)			Berat (%)		
	Area 1	Area 2	Area 3	Area 1	Area 2	Area 3
Karbon	7,2	11,9	15,9	3,7	6,5	8,8
Oksigen	2,1	11,1	8,8	1,4	8,1	6,5
Magnesium	88,4	75,1	73,2	92,1	83,0	82,1
Aluminium	2,4	1,9	2,1	2,8	2,4	2,6

Rincian dari perubahan unsur dari area 1 sampai dengan area 3 direpresentasikan pada Tabel 2. Selain unsur Mg, ada juga unsur Al, O dan C pada lokasi patahan. Ketiga unsur ini juga mengalami perubahan pada tiap area. Berdasarkan data diatas dapat dilihat bahwa unsur Mg mengalami penurunan sebesar 11% dari area 1 ke area 3. Lokasi patahan ini berada di plat bagian bawah yaitu material magnesium, namun patahan yang tersisa dari shear tensile test adalah material magnesium yang sama. Sehingga hal ini yang menyebabkan unsur Mg lebih tinggi dibagian tengah.

SIMPULAN

Studi ini menyelidiki berbagai parameter *micro-friction stir spot welding* (μ FSSW) mempengaruhi metalografi, sifat mekanik, dan geometri las material AZ31B. Parameter yang diperiksa adalah kedalaman penetrasi (*plunge depth*/PD) dan waktu pengadukan (*dwell time*/DT), dengan beberapa tes, termasuk geometri las, beban silang, beban geser, kekerasan mikro, dan metalografi, dilakukan untuk menilai efek dari parameter ini. Hasilnya menunjukkan bahwa bentuk las dipengaruhi oleh waktu pengadukan dan kedalaman penetrasi, dengan hasil terbaik dicapai dengan waktu pengadukan 700 milidetik dan kedalaman penetrasi 600 mikron. Nilai tertinggi untuk beban geser dan silang dicapai dengan parameter pengelasan 500 milidetik dan 600 mikron, sedangkan kekerasan material menunjukkan bentuk "V" terbalik

untuk semua parameter. Pada kedalaman penetrasi yang berbeda, terdapat perbedaan ukuran butiran di tiga wilayah material (SZ, TMAZ, dan HAZ), dengan struktur butiran yang lebih halus diamati pada kedalaman penetrasi yang lebih rendah, sedangkan kedalaman penetrasi 500 menghasilkan ukuran butiran yang lebih besar di SZ. dan TMAZ karena pembangkitan panas dan rekristalisasi yang lebih besar.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih atas pendanaan penelitian ini melalui skema Research Group Auto-Body, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Yogyakarta dengan nomor kontrak: T/2.31/UN34.15/PT.01.02/2022.

DAFTAR PUSTAKA

- Afrin, N., Chen, D. L., Cao, X., & Jahazi, M. (2008). Microstructure and tensile properties of friction stir welded AZ31B magnesium alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 472(1-2), 179-186.
- Ahmed, M. M. Z., El-Sayed Seleman, M. M., Ahmed, E., Reyad, H. A., Touileb, K., & Albaijan, I. (2022). *Friction stir spot welding* of Different Thickness Sheets of Aluminum Alloy AA6082-T6. *Materials*, 15(9), 2971.
- Badarinarayan, H., Shi, Y., Li, X., & Okamoto, K. (2009). Effect of tool geometry on hook formation and static strength of friction stir spot welded aluminum 5754-O sheets. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49(11), 814-823.
- Baskoro, A. S., Amat, M. A., & Widiyanto, M. A. (2019). *Effect of Tools Geometry and Dwell time on Mechanical Properties and Macrograph of Two-Stage Refilled Friction Stir Spot Micro Weld*.
- Baskoro, A. S., Hadisiswojo, S., Kiswanto, G., Amat, M. A., & Chen, Z. W. (2020). Influence of welding parameters on macrostructural and thermomechanical properties in micro friction stir spot welded under high-speed tool rotation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 106(1), 163-175. doi:<https://doi.org/10.1007/s00170-019-04490-8>
- Baskoro, A. S., Riyanto, A., Arifardi, M. F., & Rupajati, P. (2020, 2020). *Influence of Tools Diameters and Plunge depth on Mechanical Properties of Micro Friction stir spot welding Materials A1100*.
- Cao, X., & Jahazi, M. (2009). Effect of welding speed on the quality of friction stir welded butt joints of a magnesium alloy. *Materials & design*, 30(6), 2033-2042.
- Dedeoğlu, O., & Güler Özgül, H. (2019). The Joint Properties of 5754 Aluminium Alloy by *Friction stir spot welding*. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 3(1), 8.
- Esparza, J. A., Davis, W. C., Trillo, E. A., & Murr, L. E. (2002). Friction-stir welding of magnesium alloy AZ31B. *Journal of materials science letters*, 21(12), 917-920.
- Gharacheh, M. A., Kokabi, A. H., Daneshi, G. H., Shalchi, B., & Sarrafi, R. (2006). The influence of the ratio of “rotational speed/traverse speed”(ω/v) on mechanical properties of AZ31 friction stir welds. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46(15), 1983-1987.
- Kwon, Y. J., Shigematsu, I., & Saito, N. (2008). Dissimilar friction stir welding between magnesium and aluminum alloys. *Materials Letters*, 62(23), 3827-3829.

- Lee, W. B., Yeon, Y. M., & Jung, S. B. (2003). Joint properties of friction stir welded AZ31B–H24 magnesium alloy. *Materials Science and Technology*, 19(6), 785-790.
- Lukmanto, D., Muhayat, N., & Triyono, T. (2020). Pengaruh shoulder *plunge depth* dan panjang pin terhadap sifat fisik dan kekerasan pada sambungan *friction stir spot welding* aluminium 1100 dengan penambahan serbuk Zn. *Jurnal Teknik Mesin Indonesia*, 15(2), 13-20.
- Matsuda, T., Ogaki, T., Hayashi, K., Iwamoto, C., Nozawa, T., Ohata, M., & Hirose, A. (2022). Fracture dominant in friction stir spot welded joint between 6061 aluminum alloy and galvanized steel based on microscale tensile testing. *Materials & Design*, 213, 110344. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110344>
- Mohammadi, J., Behnamian, Y., Mostafaei, A., Izadi, H., Saeid, T., Kokabi, A. H., & Gerlich, A. P. (2015). Friction stir welding joint of dissimilar materials between AZ31B magnesium and 6061 aluminum alloys: Microstructure studies and mechanical characterizations. *Materials Characterization*, 101, 189-207.
- Özgül, H. G., & Dedeoğlu, O. (2020). Investigations of the mechanical and microstructural effects of pinless tool geometry on *friction stir spot welding* process. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 73, 2281-2289.
- Pareek, M., Polar, A., Rumiche, F., & Indacochea, J. E. (2007). Metallurgical evaluation of AZ31B-H24 magnesium alloy friction stir welds. *Journal of materials engineering and performance*, 16(5), 655-662.
- Rao, H. M., Jordon, J. B., Barkey, M. E., Guo, Y. B., Su, X., & Badarinarayan, H. (2013). Influence of structural integrity on fatigue behavior of friction stir spot welded AZ31 Mg alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 564, 369-380.
- Sun, T., Wu, S., Shen, Y., Jin, J., Lu, J., & Qin, T. (2021). Investigation on Friction Stir Welding of Mg/Al T-Joints. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 74(12), 3045-3061. doi:<https://doi.org/10.1007/s12666-020-02148-8>
- Tozaki, Y., Uematsu, Y., & Tokaji, K. (2007). Effect of tool geometry on microstructure and static strength in friction stir spot welded aluminium alloys. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47(15), 2230-2236.
- Xunhong, W., & Kuaishu, W. (2006). Microstructure and properties of friction stir butt-welded AZ31 magnesium alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 431(1-2), 114-117.
- Yaknesh, S., Sampathkumar, K., & Sevvil, P. (2022). Effect of tool pin geometry and process parameters during FSW of dissimilar alloys of Mg. *Materials Research*, 25.
- Zhang, H., Lin, S. B., Wu, L., Feng, J. C., & Ma, S. L. (2006). Defects formation procedure and mathematic model for defect free friction stir welding of magnesium alloy. *Materials & design*, 27(9), 805-809.
- Zhang, H., Wu, H., Huang, J., Sanbao, L. I. N., & Lin, W. U. (2007). Effect of welding speed on the material flow patterns in friction stir welding of AZ31 magnesium alloy. *Rare Metals*, 26(2), 158-162.
- Zhang, Z., Yang, X., Zhang, J., Zhou, G., Xu, X., & Zou, B. (2011). Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir spot welded 5052 aluminum alloy. *Materials & Design*, 32(8-9), 4461-4470.

