

Studi Komparatif Hasil Friction Stir Welding (FSW) dan Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) pada Sambungan Las Luminium Seri 5083

Rifqo Anwarie^{1,a)}, Bambang Soegijono^{2,b)}, M. Yudi Masduky S^{3,c)} dan Tarmizi^{4,d)}

¹Ilmu Bahan-bahan,
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia,
Jl. Salemba Raya No.4 Jakarta, Indonesia, 10430

² Ilmu Bahan-bahan,
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia,
Jl. Salemba Raya No.4 Jakarta, Indonesia, 10430

³ Ilmu Bahan-bahan,
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia,
Jl. Salemba Raya No.4 Jakarta, Indonesia, 10430

⁴Lab Divisi Pengelasan dan Permesinan,
Balai Besar Logam dan Mesin,
Jl. Sangkuriang No. 12 Bandung, Indonesia, 40135

^{a)}rifqo.anwarie41@ui.ac.id, rifqo.anwarie@gmail.com (corresponding author)

^{b)}naufal@ui.ac.id, bambangsg@yahoo.com (corresponding author)

^{c)}y.masduky@ui.ac.id

^{d)}tarmizi@kemenperin.go.id

Abstrak

Studi ini membandingkan hasil pengelasan plat aluminium seri 5083 dengan ketebalan 6 mm menggunakan Friction Stir Welding (FSW) dengan variasi welding speed, yaitu 22, 29 dan 38 mm/menit dengan hasil pengelasan konvensional Gas Tungsten Arc Welding (GTAW). Pengelasan FSW dilakukan dengan menggunakan mesin frais. Hasil FSW dan GTAW diidentifikasi menggunakan uji tarik, uji kekerasan dan struktur makro dan mikro. Dari identifikasi Hasil analisa struktur mikro menunjukkan grain size hasil pengelasan FSW lebih kecil dari GTAW sehingga menyebabkan kekerasan hasil FSW lebih tinggi dibandingkan dengan GTAW. Dari analisa struktur makro diperoleh bahwa semua hasil pengelasan FSW terdapat cacat incomplete fusion yang diakibatkan oleh kurang sempurna proses pengelasan. Hal ini mengakibatkan hasil pengujian tarik GTAW lebih baik dari FSW.

Kata-kata Kunci : Aluminium Seri 5083, Friction Stir Welding(FSW), Gas Tungsten Arc Welding (GTAW), ujian tarik, uji kekerasan, struktur mikro.

PENDAHULUAN

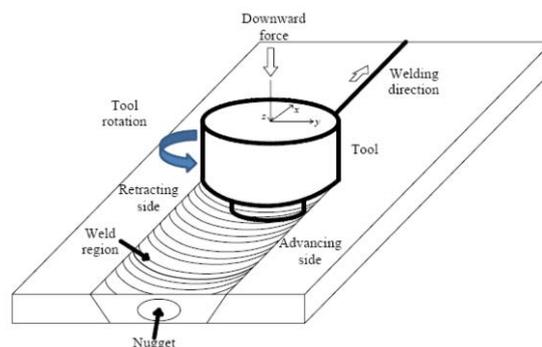
Perkembangan dunia perindustrian saat ini mulai mempertimbangkan material aluminium sebagai bahan utama dalam proses produksi. Ini dikarenakan aluminium dan paduan aluminium termasuk logam ringan yang memiliki kekuatan tinggi, tahan terhadap karat, konduktor listrik yang cukup baik dan aluminium lebih ringan daripada besi atau baja. Namun aluminium dan paduan aluminium mempunyai sifat yang kurang baik bila dibandingkan dengan baja, diantaranya adalah mempunyai panas jenis dan daya hantar yang tinggi,

mudah teroksidasi dan membentuk oksida aluminium Al_2O_3 yang mempunyai titik cair yang tinggi sehingga mengakibatkan peleburan antara logam dasar dan logam las menjadi terhalang dan bila mengalami proses pembekuan yang terlalu cepat akan terbentuk rongga halus bekas kantong hydrogen. Akan tetapi, perbedaan yang paling mendasar adalah nilai keuletan pada logam las, dimana nilai keuletan logam las baja selalu tinggi bila dibandingkan dengan logam induk, sedangkan pada aluminium nilai keuletan pada logam las cenderung lebih kecil daripada nilai keuletan pada logam induk. Seiring dengan hal tersebut maka perlu dilakukan penelitian-penelitian agar proses penyambungan aluminium menjadi lebih mudah dan memiliki kekuatan yang optimal. Proses penyambungan aluminium paduan salah satunya dapat dilakukan dengan cara pengelasan *friction stir welding*. [1]

FSW (*friction stir welding*) merupakan sebuah metode pengelasan yang telah ditemukan dan dikembangkan oleh Wayne Thomas untuk benda kerja *aluminium* dan *aluminium alloy* pada tahun 1991 di TWI (*The Welding Institute*) Amerika Serikat. Prinsip kerja FSW adalah memanfaatkan gesekan dari benda kerja yang berputar dengan benda kerja lain yang diam sehingga mampu melelehkan benda kerja yang diam tersebut dan akhirnya tersambung menjadi satu. Proses pengelasan dengan FSW terjadi pada kondisi padat (*solid state joining*). Proses pengelasan dengan FSW terjadi pada temperature *solvus*, sehingga tidak terjadi penurunan kekuatan akibat *over aging*, selain itu temperature pengelasan yang tidak terlalu tinggi mengakibatkan tegangan sisa yang terbentuk dan distorsi akibat panas juga rendah. Karakteristik mekanis sambungan pada FSW ditentukan oleh parameter : kecepatan pengelasan, putaran *tool*, dan tekanan *tool*. [2]

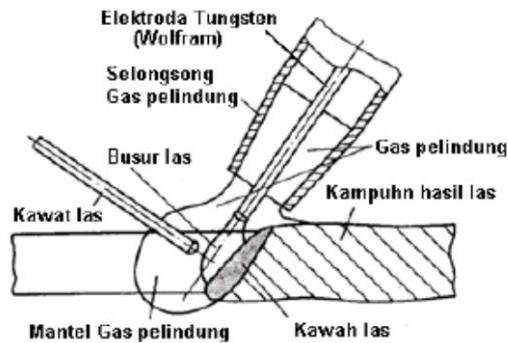
TEORI SINGKAT

Friction Stir Welding (FSW) adalah sebuah metode pengelasan yang termasuk pengelasan gesek, yang pada prosesnya tidak memerlukan bahan penambah atau pengisi. Panas yang digunakan untuk mencairkan logam kerja dihasilkan dari gesekan antara benda yang berputar (*pin*) dengan benda yang diam (benda kerja). *Pin* berputar dengan kecepatan konstan disentuhkan ke material kerja yang telah dicekam. Gesekan antara kedua benda tersebut menimbulkan panas sampai $\pm 80\%$ dari titik cair material kerja dan selanjutnya *pin* ditekan dan ditarik searah daerah yang akan dilas. Putaran dari *pin* bisa searah jarum jam atau berlawanan dengan arah jarum jam. *Pin* yang digunakan pada pengelasan *friction stir welding* harus mempunyai titik cair dan kekerasan yang lebih dibandingkan dengan material kerja, sehingga hasil pengelasan baik. [3] Pengelasan dengan menggunakan metode FSW bisa digunakan untuk menyambungkan material yang sama (*similar metal*) ataupun material yang tidak sama (*dissimilar metal*) seperti baja dengan baja tahan karat, aluminium dengan kuningan dan memungkinkan untuk mengelas kombinasi material lain yang tidak dapat dilas dengan menggunakan metode pengelasan yang lain. [4] Parameter pengelasan yang dilakukan harus disesuaikan sedemikian rupa, sehingga pengurangan volume dari *pin* ketika terjadi gesekan dengan material kerja bisa diperkecil. Hal ini bertujuan untuk menjaga masukan panas yang konstan sepanjang pengelasan. [5] Prinsip *friction stir welding* yang ditunjukkan pada Gambar 1 dengan gesekan dua benda yang terus-menerus akan menghasilkan panas, ini menjadi suatu prinsip dasar terciptanya suatu proses pengelasan gesek. Pada proses *friction stir welding*, sebuah *tool* yang berputar ditekan pada material yang akan di satukan. Gesekan *tool* yang berbentuk silindris (*cylindrical shoulder*) yang dilengkapi *pin/probe* dengan material, mengakibatkan pemanasan setempat yang mampu melunakkan bagian tersebut. *Tool* bergerak pada kecepatan tetap dan bergerak melintang pada jalur pengelasan (*joint line*) dari material yang akan di satukan. Parameter pengelasan yang dilakukan harus disesuaikan sedemikian rupa, sehingga pengurangan volume dari *pin* ketika terjadi gesekan dengan material kerja bisa diperkecil. Hal ini bertujuan untuk menjaga masukan panas yang konstan sepanjang pengelasan. [6]



Gambar 1. Prinsip *friction stir welding* [6]

Las GTAW berasal dari Amerika Serikat, di mana pada saat itu tahun 1936 dikenal sebagai *argon arc welding*. Tidak sampai awal tahun 1950-an, mulai dikembangkan di Eropa. Di negara-negara berbahasa Inggris, berarti proses las TIG atau GTAW. Dalam kedua singkatan tersebut ditemukan kata "Tungsten", itu adalah istilah dalam bahasa Inggris untuk Wolfram, didaratan Eropa terutama Jerman atau negara-negara yang berbahasa Jerman, disebut las WIG (*Wolfram Inert Gas*). Sebutan tersebut didasarkan pada karakter komponen yang digunakan, yakni elektrodanya terbuat dari logam wolfram (tungsten) dan gas pelindung yang digunakan berupa gas inert. Metode ini dibandingkan dengan proses pengelasan fusi lainnya, lebih memiliki sejumlah keunggulan.[7]



Gambar 2. Proses las GTAW[8]

Gambaran tentang *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) adalah cara pengelasan dimana busur las menyala diantara elektroda tungsten dan benda kerja dan aliran gas pelindung menyelubungi busur las dan daerah lasan (kawah las) serta melindunginya dari pengaruh udara atmosfer. Pada umumnya perangkat atau mesin las GTAW merupakan perangkat “kombi” artinya dapat digunakan untuk mengelas dengan arus bolak-balik (AC) dan dapat juga digunakan untuk mengelas dengan arus searah (DC). Tentu saja ada konstruksi komponen sebagai pembangkit arus las AC maupun arus las DC.[8]

METODE PENELITIAN

Alat dan Material Pengujian

Secara keseluruhan alat dan material dalam penelitian ini adalah : aluminium seri 5083 dengan ketebalan 6 mm.[9] Kemudian untuk pengelasan GTAW dibuat *single bevel* dengan sudut 30⁰, tool steel H13, mesin frais, mesin las GTAW, kawat las dan elektroda tungsten.

Proses Pengelasan

Proses pengelasan pada penelitian ini dilakukan dengan metode FSW dan GTAW dengan menggunakan parameter-parameter yang telah ditentukan seperti pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Parameter pengelasan FSW dan GTAW

Proses	GTAW	FSW
Diameter Kawat Las (mm)	2.4	
Voltase (Volt)	22	
Arus (Ampere)	131	
Welding Speed (mm/menit)	200	22, 29 dan 38
Shielding Gas	Argon HP	
Tool Rotation Speed (rpm)		1555
Bentuk Pin Tool		Silinder
Diameter Shoulder Tool		22
Diameter Pin		5
Panjang Pin		5

HASIL PENGELASAN

Pengelasan dengan metode *Friction Stir Welding* (FSW) merupakan pengelasan yang terjadi pada kondisi padat (*solid state joining*) dengan memanfaatkan gesekan dari benda kerja yang berputar dengan benda kerja lain yang diam sehingga mampu melelehkan benda kerja yang diam tersebut dan akhirnya tersambung menjadi satu. Pada proses pengelasan GTAW menggunakan Mesin las GTAW, elektroda tungsten dan filler aluminium A5356BY dengan gas pelindung argon. Hasil pengelasan *Friction Stir Welding* (FSW) dan *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) ditunjukkan pada Gambar 3 berikut.



Gambar 3. Hasil Pengelasan : a) FSW, b) GTAW

PEMBAHASAN

Tabel 2 menunjukkan bahwa adanya perbedaan persentasi antara nilai standar dan spesimen, namun demikian material aluminium yang digunakan merupakan aluminium paduan dengan unsur utama magnesium dan Si dengan persentasi sebesar 6,2% dan 0.54%. Kelebihan unsur magnesium dan silikon pada spesimen mengakibatkan sifat mekanik pada daerah lasan meningkat dikarenakan meningkatnya presipitat Mg_2Si pada daerah lasan.

Tabel 2. Hasil Pengujian Komposisi kimia Aluminium 5083

Al5083	Al (%)	Mg (%)	Si (%)	S (%)	Ca (%)	Ti (%)	V (%)	Mn (%)	Fe (%)	Zn (%)
Terukur - Point 1	90.4	6.1	0.65	0.08	0.26	0.12	0.05	1.49	0.68	0.19
Terukur - Point 2	91.4	6.3	0.62	0.11	0.07	0.07	0.01	0.62	0.26	0.07
Terukur - Point 3	91.8	6.3	0.36	0.10	0.06	0.06	0.01	0.61	0.24	0.07
Rata-rata	91.2	6.2	0.54	0.10	0.13	0.08	0.02	0.91	0.39	0.11
Al5083 Standar	92.4-95.6	4-4.9	0-0.4	0-0.15	0-0.15	0-0.15	0-0.15	0.4-1	0-0.4	0-0.25

Komparasi Pengamatan Visual Hasil Pengelasan FSW dan GTAW

Berdasarkan pengamatan visual diperoleh hasil pengelasan FSW dan GTAW sebagai berikut:

1. Bagian atas pada spesimen hasil FSW dengan *welding speed* 22 mm/menit tidak menunjukkan adanya bagian yang rusak sedangkan pada *welding speed* 29 mm/menit dan 38 mm/menit menunjukkan adanya bagian yang rusak di daerah pinggir hasil lasan yaitu pada daerah *advancing*. Hal ini disebabkan adanya gesekan antara *pin tool* yang tidak sempurna dengan spesimen. Gesekan ini menyebabkan permukaan bagian lasan terkikis oleh *pin tool* sehingga pemukaannya menjadi kasar dan adanya sedikit lubang.
2. Bagian bawah pada semua spesimen FSW menunjukkan adanya *incomplete join penetration* artinya bagian bawah dari material tidak mengalami efek gesekan atau pengadukan dari *pin tool*.
3. Bagian atas dan bawah pada spesimen hasil GTAW menunjukkan hasil pengelasan yang baik secara keseluruhan dikarenakan dikerjakan oleh juru las yang bersertifikasi.
4. Dari hasil pengamatan visual pada poin 1, 2 dan 3 diperoleh bahwa hasil pengelasan GTAW lebih baik dari FSW.

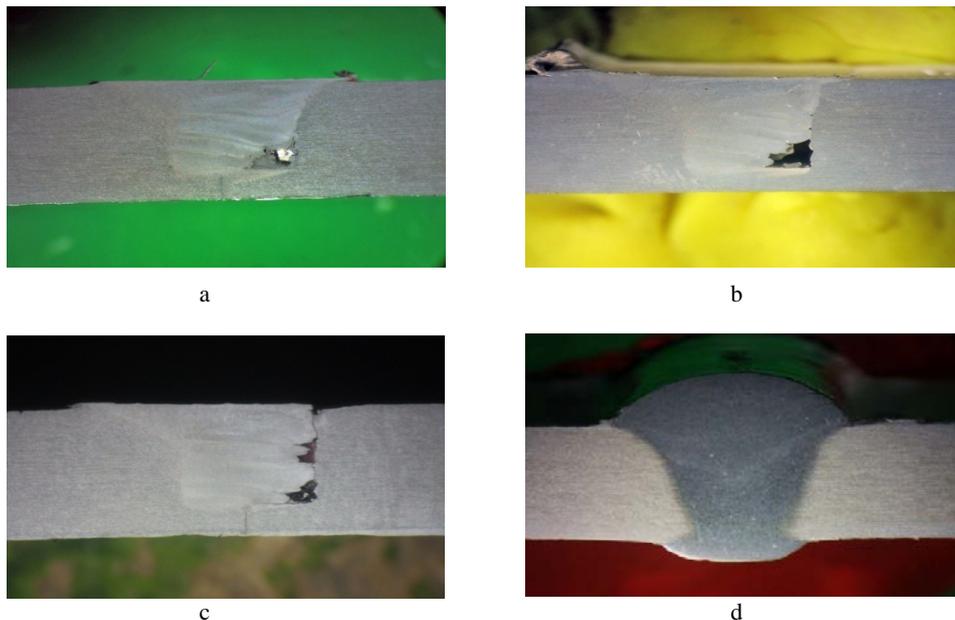
Komparasi Hasil Radiografi FSW dan GTAW

Proses pengelasan *Friction Stir Welding* (FSW) dimulai dengan diturunkannya *pin tool* oleh mesin frais sambil diputar menekan spesimen lalu terjadilah gesekan antara *pin tool* dengan spesimen dan terjadilah proses pengadukan spesimen tersebut. Kemudian ditahan beberapa saat untuk mendapatkan temperatur yang maksimal dan konstan yang diakibatkan dari gesekan dari *pin tool* dengan spesimen tersebut. Pada penelitian ini waktu tahannya sekitar 45 detik dan mencapai temperatur maksimal dan konstan berkisar antara 120°C – 130°C pada permukaan atas hasil pengelasan. Ketebalan benda uji adalah 6 mm sedangkan panjang *pin tool* adalah kurang dari 5 mm, maka ketika pin tool menekan benda uji terdapat gap sekitar 1 mm diantara keduanya yang tak bisa diminimalisir dengan meningkatkan tekanan dari *pin tool* tersebut.

Hal ini mengakibatkan adanya gap sekitar 1 mm antara benda uji dan *pin tool* serta masukan panas yang terjadi kurang maksimal, maka efek pengadukan dari *pin tool* tersebut tidak berpengaruh pada bagian bawah dari spesimen sehingga terjadi *incomplete joint penetration* pada bagian bawah dari spesimen. Terjadinya cacat *incomplete joint penetration* pada proses *Friction Stir Welding* (FSW) disebabkan karena temperatur pengelasan yang rendah berkisar antara 120°C - 132°C , sehingga menyebabkan terjadinya pembekuan yang cepat. Sedangkan pada spesimen dengan metode GTAW terjadi cacat porosity disebabkan karena adanya udara yang terperangkap di daerah pengelasan yang disebabkan karena elektroda yang lembab dan jarak antara elektroda dengan benda uji terlalu jauh, sehingga selubung gas yang terbentuk tidak efektif untuk menutupi daerah pengelasan.

Komparasi Hasil Pengujian Struktur Makro FSW dan GTAW

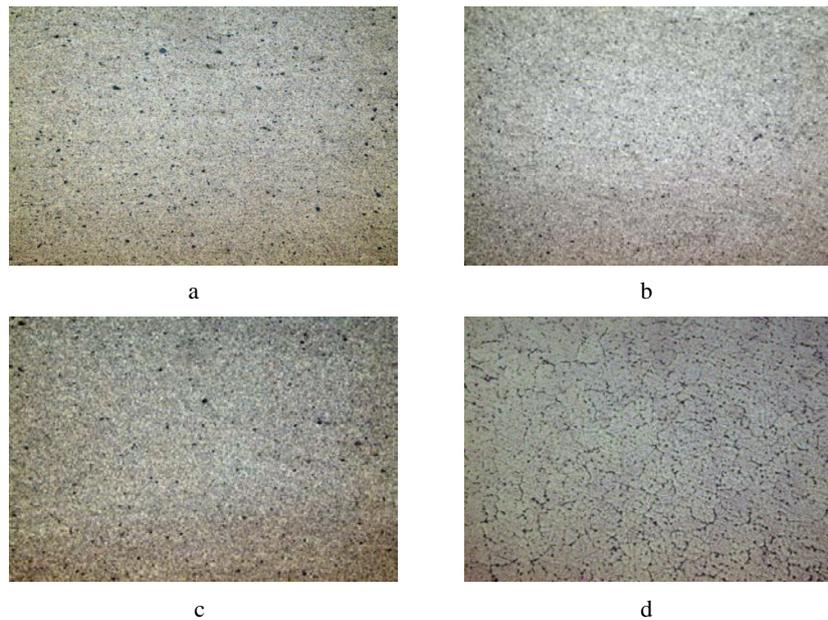
Secara keseluruhan dari hasil uji makro pada penelitian ini menunjukkan bahwa metode *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) lebih baik dari *Friction Stir Welding* (FSW). Lubang (*incomplete fusion*) yang terjadi pada semua sample disebabkan karena masukan panasnya rendah, lalu terjadi proses pendinginan yang lebih cepat, sehingga benda uji tidak lumer secara sempurna. Sedangkan terjadinya *incomplete joint penetration* pada bagian bawah, disebabkan adanya gap terjadinya antara pin tool dengan bagian bawah base metal dan ditambah dengan adanya temperatur yang rendah, sehingga pengaruh panas dari putaran *pin tool* tidak sampai ke bagian bawah seperti ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Hasil Pengujian Makro dengan Perbesaran 6 kali : a) FSW dengan *welding speed* 22mm/menit, b) FSW dengan *welding speed* 29mm/menit GTAW, c) FSW dengan *welding speed* 38mm/menit, d) GTAW

Komparasi Hasil Pengujian Struktur Mikro FSW dan GTAW

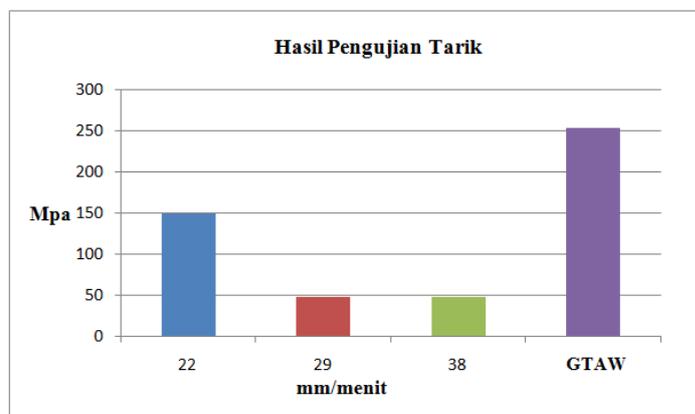
Hasil pengujian struktur mikro terlihat butiran warna hitam, merupakan Mg_2Si . Daerah HAZ dan TMAZ adalah daerah diantara base metal dan daerah pengelasan. Butiran di daerah HAZ dan TMAZ merupakan perpaduan antara daerah base metal dan daerah pengelasan, butirannya agak besar karena pengaruh temperatur yang diterimanya saat pengelasan. Pada daerah lasan butirannya lebih kecil, karena mengalami deformasi akibat adukan dari *pin tool*. Untuk spesimen hasil GTAW terjadi keretakan disebabkan karena pengaruh panas yang tinggi pada saat pengelasan dan butiran pada daerah HAZ nya besar karena pengaruh panas dari hasil pengelasan seperti ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Hasil Pengujian Mikro dengan Perbesaran 200 kali : a) FSW dengan *welding speed* 22mm/menit, b) FSW dengan *welding speed* 29mm/menit GTAW, c) FSW dengan *welding speed* 38mm/menit, d) GTAW

Komparasi Hasil Pengujian Tarik FSW dan GTAW

Pada Gambar 6 menunjukkan data hasil pengujian tarik spesimen FSW dan GTAW. Dari diagram dibawah (Gambar 6) tampak terlihat jelas bahwa kekuatan tarik (*Tensile Strength*) tertinggi terdapat pada proses pengelasan GTAW yaitu sebesar 254 MPa, kemudian berturut-turut yaitu *welding speed* 22mm/menit sebesar 149.9 Mpa, *welding speed* 29 mm/menit sebesar 48.6 Mpa dan *welding speed* 38mm/menit sebesar 47.9 Mpa.



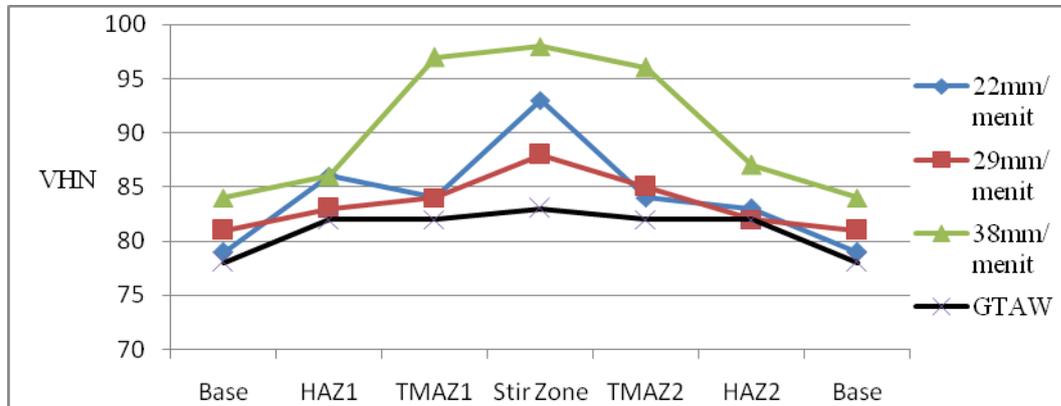
Gambar 6. Hasil Pengujian Tarik FSW dan GTAW

Berdasarkan gambar hasil pengujian tarik di atas menunjukkan bahwa secara keseluruhan kekuatan tarik hasil pengelasan GTAW lebih baik dari FSW. Dari pengamatan hasil struktur makro dapat dilihat bahwa patahan yang terjadi pada semua spesimen pengujian tarik hasil FSW adalah pada bagian pinggir lasan dan nilai kuat tariknya sangat rendah serta tidak terjadi *necking*, ini terjadi karena adanya ketidaksempurnaan dari hasil pengelasan FSW, yaitu terjadinya *incomplete fusion* dan *incomplete join penetration*. Pada spesimen GTAW, patahan yang terjadi adalah pada bagian lasan, hal ini menunjukkan bahwa kekuatan pada pengelasan GTAW lebih baik dari FSW.

Komparasi Hasil Pengujian Kekerasan FSW dan GTAW

Pada Gambar 7 terlihat pula bahwa nilai kekerasan meningkat dari daerah *base metal* ke daerah HAZ, TMAZ dan *Stir Zone* dikarenakan dari hasil uji komposisi yang menunjukkan kelebihan unsur magnesium dan silicon sehingga pada proses pengelasan aluminium menyebabkan terjadinya presipitasi Mg₂Si berlebih

pada daerah HAZ, TMAZ dan *Stir Zone*. Kemudian pada Gambar 7 juga dapat dilihat bahwa trend dari *base metal*, HAZ, TMAZ dan *stir zone* hasil FSW pada setiap variasi *welding speed* cenderung meningkat. Pada *welding speed* 38 mm/menit mempunyai nilai kekerasan yang optimum dan *welding speed* 29 mm/menit mempunyai nilai kekerasan yang paling rendah. Hal ini disebabkan pada *welding speed* 38 mm/menit menghasilkan proses pendinginan yang lebih cepat dan terbentuklah *grain size* yang lebih kecil dan lebih halus sehingga meningkatkan kekerasannya dibandingkan dengan *welding speed* lainnya.



Gambar 7. Hasil Pengujian Kekerasan FSW dan GTAW

Apabila dikomparasikan semua hasil FSW dengan hasil GTAW diperoleh bawah nilai kekerasan hasil FSW lebih tinggi dari GTAW dikarenakan proses pengelasan FSW ini tidak dimasukkannya logam baru (*electrode*) pada saat pengelasan. Pada pengelasan GTAW adanya logam baru (*electrode*) mempengaruhi *mechanical properties*nya. Pada pengelasan FSW, penyambungan logam dilakukan dengan gesekan dan adukan tanpa memasukkan logam baru diantara material. Kemudian hasil pengelasan pada daerah *stir zone* melebihi kekuatan dari base metal dan nilai kekerasan base metal pada tiap variasi *welding speed* pun berbeda, hal ini diakibatkan pada proses pengelasan FSW proses pengadukan yang mengakibatkan deformasi pada *base metal* di daerah sekitar lasan sehingga meningkatkan kekerasannya.

KESIMPULAN

Hasil pengujian tarik rata-rata FSW dengan *welding speed* 22 mm/menit sebesar 149.9 Mpa, *welding speed* 29 mm/menit sebesar 48.6 Mpa dan *welding speed* 38 mm/menit sebesar 47.9 Mpa, serta hasil pengujian tarik rata-rata GTAW sebesar 254 Mpa sehingga dikarenakan proses pengerjaan yang kurang sempurna, hasil pengujian tarik hasil GTAW lebih baik dari FSW. Hasil pengujian kekerasan FSW pada *stir zone* dengan *welding speed* 22 mm/menit sebesar 93 VHN, *welding speed* 29 mm/menit sebesar 88 VHN dan *welding speed* 38 mm/menit sebesar 98 VHN serta hasil pengujian kekerasan GTAW pada *weld zone* sebesar 83 VHN. Dari pengujian kekerasan menunjukkan pula bahwa hasil FSW lebih baik daripada GTAW dimana nilai kekerasan pada daerah lasannya lebih tinggi. Pengujian struktur makro menunjukkan bahwa hasil GTAW lebih baik daripada FSW dikarenakan hasil FSW banyak terjadi cacat yang diakibatkan oleh ketidaksempurnaan dalam proses pengelasannya. Dari pengamatan struktur mikro menunjukkan pula bahwa hasil FSW lebih baik daripada GTAW dimana *grain size* yang dihasilkan lebih halus.

(catatan : untuk data pengujian komposisi, tarik, kekerasan dan struktur mikro FSW dengan *welding speed* 29 mm/menit merujuk kepada paper Bapak Andi Surya dengan Judul “Studi Perbandingan Pengelasan Ulang (*Welding Repair*) antara FSW dan GTAW pada Sambungan Aluminium 5083”)

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada berbagai pihak yang telah membantu dalam penulisan makalah ini.

REFERENSI

1. Wijayanto, Jarot & Agdha Anelis (2010) Pengaruh *Feed Rate* terhadap Sifat Mekanik pada Pengelasan Friction Stir Welding Aluminium 6110, Jurnal Kompetensi Teknik Vol. 2, No.1, November 2010.
2. Lohwasser, Daniela and Zhan Chen (2010), *Friction Stir Welding from Basics to Applications*. First published 2010, Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC © 2010, Woodhead Publishing Limited
3. AWS 2007. Friction Stir Welding and Process
4. Vivekanandan. P , Arunachalam. V. P, Prakash. T , Savadamuthu. L (2012), *The Experimental Analysis of Friction Stir Welding on Aluminium Composites*, International Journal of Metallurgical Engineering 2012, 1(4): 60-65 DOI: 10.5923/j.ijmee.20120104.03
5. Thube, Rafindra S. (2014), Effect of Tool Pin Profile and Welding Parameters on Friction Stir Processing Zone, Tensile Properties and Micro-hardness of AA5083 Joints Produced by Friction Stir Welding, International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT) ISSN: 2249 – 8958, Volume-3, Issue-5, June 2014
6. Gabor, Romana and dos Santos, Jorge F. (2013), Friction Stir Welding Development of Aluminium Alloys for Structural Connection, Proceedings of The Romanian Academy, Series A, Volume 14, Number 1/2013, pp. 64–71
7. Ratnesh K. Shukla¹ and Pravin K. Shah (2010), *Comparative study of friction stir welding and tungsten inert gas welding process*, Indian Journal of Science and Technology, Vol. 3 No. 6 (June 2010), ISSN: 0974- 6846
8. Purwaningrum, Y. dan Setyanto, K. (2011), Komparasi Sifat Fisik Dan Mekanik Sambungan Las Tig (Tungsten Inert Gas) Dan Las FSW (*Friction Stir Welding*) pada Aluminium Tipe 1xxx.
9. AWS D17.3. Specification for Friction Stir Welding of Aluminium Alloys for Aerospace Application
10. Yuwono A, H. 2009.. Buku Panduan Praktikum Karakterisasi Material Pengujian Merusak (*Destructive Testing*). Departemen Metalurgi Dan Material, Fakultas Teknik. Universitas Indonesia