

ANALISIS SIFAT MEKANIK HASIL PENGELASAN ALUMINIUM AA 1100 DENGAN METODE FRICTION STIR WELDING (FSW)

Angger Sudrajat F.P.¹, Sumarji², Mahros Darsin³

ABSTRACT

Aluminum and aluminum alloys have properties that are less well when compared to steel, such as specific heat and has a high conductivity. They are also easily oxidized and form an aluminum oxide Al_2O_3 which have a high melting point. Consequently, when they are welded the fusion between base and weld metal will be blocked. Moreover, if the cooling process is too fast it will form a smooth cavity ex-pouch of hydrogen. Friction stir welding (FSW) is a challenging alternative for joining aluminum alloy. In FSW, process occur in the solid state (solid state joining). In this research, some attempts were carried out to find the best quality of welding, in term of mechanical properties and microstructure. Tool rotation speed was varied at 780, 980, 1120 rpm. Whereas, feed rate used was keep constantly at 15 mm/min. The material to be welded is a- 4.0 mm thick aluminum AA 1100 strips. Result showed that the highest strength obtained is 56.528 MPa at 1120 rpm and the lowest strength obtained is 38.472 MPa at 980 rpm. Wormholes and the lack of penetration defects are the main things that reduce the tensile strength. From micro observations known on the grains shape of the stir zone, $FeAl_3$ particles is spread more evenly in matrix of Al due to the stir process during the welding process. Hardness tests showed that the weld metal is softer than the base metal.

Keywords: Aluminum, welding, FSW

PENDAHULUAN

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. Penggunaan aluminium khususnya tipe AA 1100 pada dunia industri banyak digunakan untuk heat exchangers, *pressure vessels*, pipa, dan lain-lain (Purwaningrum dan Setyanto, 2011). 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 (Okamura dan Wiryosumarto, 1996). 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* (Yazdipour, Shafiei, and Deghani, 2009).

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 (Nandan et al., 2009). 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* dan larutnya endapan koheren.

¹ Alumni Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember

² Staf Pengajar Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember

³ Staf Pengajar Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember

Karena temperature pengelasan tidak terlalu tinggi, maka tegangan sisa yang terbentuk dan distorsi akibat panas juga rendah (ASM, 2007). Karakteristik mekanis sambungan pada FSW ditentukan oleh parameter: kecepatan pengelasan, putaran *tool*, dan tekanan *tool* (Jayaraman dkk., 2009).

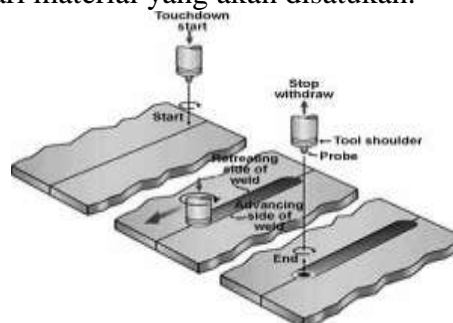
Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh parameter putaran *tool* dan laju pengelasan pada metode *friction stir welding* sehingga dapat mengetahui sifat mekanik dan strukturmikro pada aluminium AA 1100 hasil pengelasan.

TINJAUAN PUSTAKA

Friction Stir Welding

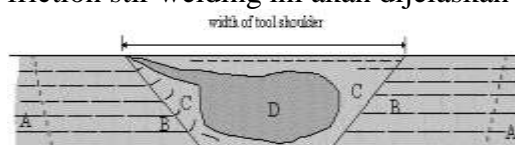
FSW (*friction stir welding*) adalah sebuah metode pengelasan yang termasuk pengelasan gesek, yang pada prosesnya tidak memerlukan bahan penambah atau pengisi. Panas yang digunakan untuk mencairkan logam kerja dihasilkan dari gesekan antara benda yang berputar (*pin*) dengan benda yang diam (benda kerja). *Pin* berputar dengan kecepatan konstan disentuh 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.

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 disatukan. 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 disatukan.



Gambar 1. Prinsip *friction stir welding*

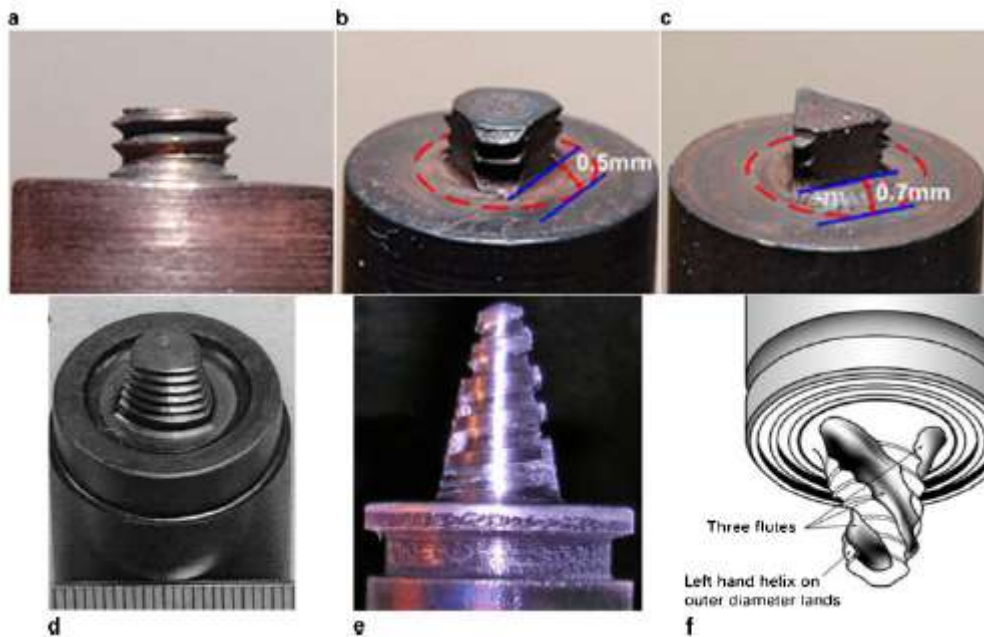
Strukturmikro hasil pengelasan *friction stir welding* yang terdiri dari daerah bagian adukan (*stir zone*), bagian pengaruh panas secara termomekanik (*thermomechanical affected zone*) dan bagian pengaruh panas (*heat affected zone*) (ASM, 2007). Bagian adukan (*stir zone*) mengalami laju tegangan dan regangan tertinggi serta temperatur yang tinggi. Kombinasi ini menyebabkan bagian ini terjadi rekristalisasi dinamik. Strukturmikro bagian adukan ini sangat tergantung pada bentuk perkakas las, kecepatan rotasi dan translasi, tekanan dan karakteristik bahan yang akan disambung. Disamping itu, bagian ini juga merupakan bagian yang terdeformasi. Pada bagian pengaruh panas secara termomekanik (*thermomechanical affected zone*) terjadi pengkasaran penguat presipitat tetapi tidak ada rekristalisasi dinamik. Sedangkan panas pada bagian pengaruh panas (*heat affected zone*) selama pengelasan panasnya hanya menumbuhkan butir-butir saja. Bagian – bagian pengelasan dengan metode *friction stir welding* ini akan dijelaskan pada gambar 2.



Gambar 2. Strukturmikro hasil pengelasan dengan metode *friction stir welding*, A. logam induk, B. HAZ, C. TMAZ, D. *stir zone* (weld nugget)

Model Tool yang Biasa Dipakai pada FSW

Bentuk pin (probe) pada tool yang selama ini dikembangkan untuk aplikasi FSW ada beberapa tipeseperti pada gambar 3. Bentuk pin memengaruhi aliran bahan plastis dan memengaruhi sifat lasan. Sementara tool shoulder memfasilitasi aliran bahan bongkahan, pin membantu aliran bahan lapis demi lapis. Pin berbentuk ‘triflute’ meningkatkan aliran bahan disbanding pin silindris. Gaya aksial pada bahan benda kerja dan aliran bahan dekat tool dipengaruhi oleh orientasi ulir pada permukaan pin. Pnelitian lain menunjukkan bahwa lasan bebas cacat dapat diperoleh pada bahan lebih lunak seperti AA1050 dengan pin berbentuk columnar tanpa ulir. Sementara pin berbentuk prisma triangular lebih sesuai untuk bahan lebih keras seperti AA5083. (Rai, et al, 2011).



Gambar 3. Berbagai tipe tool yang biasa diaplikasikan pada FSW (Sumber Ra1, et al, 2011)

Parameter yang Berpengaruh terhadap Hasil FSW

Hal yang utama untuk dikendalikan adalah gaya tekan (sumbu Z). Fungsi utama penekanan adalah untuk membangkitkan gesekan untuk melunakkan material yang akan disambung. Dijamin jika gaya tekan ini cukup tinggi hasil akan bagus walaupun ada kelonggaran jarak di antara dua material yang akan disambung. Menurut rangkingnya yang harus dikendalikan adalah: gaya tekan turun, laju pengelasan, kecepatan putar pin, dan sudut punter. Jika keempat parameter tersebut dikendalikan dengan bagus, hasilnya akan memuaskan. Secara ringkas pengaruh keempat parameter tersebut disajikan pada tabel 1.

Tabel 1 Parameter proses yang utama pada FSW

Parameter	Pengaruh
Kecepatan putar	Panas gesekan, “pengadukan”, pemecahan dan pencampuran lapisan oksida
Sudut punter	Tampilan lasan, pengurusan
Laju pengelasan	Tampilan, kendali panas
Gaya tekan turun	Panas gesekan

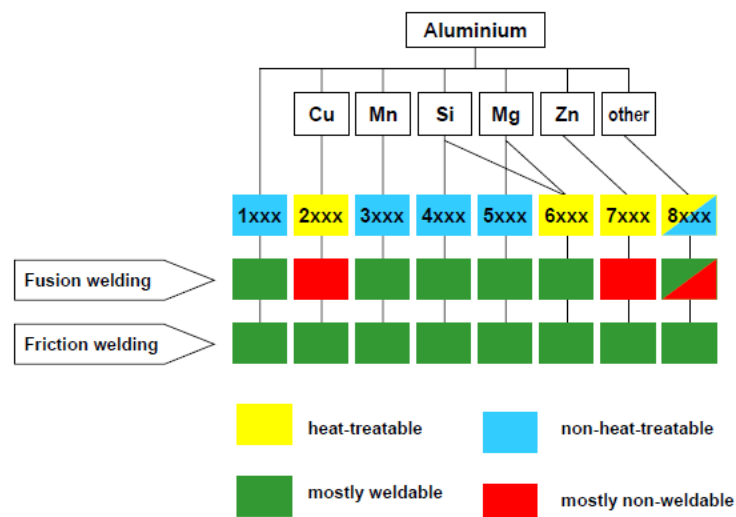
Sumber: Friction Stir Welding, the ESAB Way

Aluminium

Aluminium adalah bahan lakuran teknik dan telah bersaing dengan baja cukup lama. Aluminum diperkirakan tiga kali lebih ringan dan tiga kali lebih lemah (modulus elastisitas 70 GPa) dan memiliki koefisien hantar panas tiga kali lebih tinggi dari baja. Penghematan bobot pada aluminum bisanya harus dikompensasi dengan peningkatan desain untuk menghindari

pengurangan kekuatan yang tidak perlu. Tingginya harga koefisien hantar panas ditambah dengan lapisan oksida yang terbentuk selama pengelasan, membuat bahan aluminium cukup sulit untuk dilas dengan las busur (arc-welding). Lapisan oksida harus dipecahkan dan dihilangkan, dan panas harus disisipkan secara cepat untuk menghindari pengembangan panas pada produk. Tentu saja dengan friction stir welding, masalah yang umum yang terjadi pada pengelasan pada aluminium dapat dihindari.

Sifat mampu las dari bahan aluminium dapat disarikan pada gambar 3 di bawah ini. Pada penelitian ini menggunakan bahan AA1100 yang dapat dilas dengan FSW dengan sangat baik.



Gambar 3. Sifat mampu las berbagai lakuran aluminium (©TWI)

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini meliputi dua kegiatan utama yaitu pembuatan dan pengujian. Untuk pembuatan dan pengujian keduanya dilakukan di Laboratorium Permesinan, Laboratorium Desain dan Uji Bahan, Fakultas Teknik, Universitas Jember, Laboratorium Uji Bahan Universitas Brawijaya pada bulan Desember 2011 - Januari 2012. Peralatan dan bahan yang digunakan dalam pengujian adalah sebagai berikut:

- Aluminium tipe AA 1100
- Tool Stainless Steel diameter shoulder 18 mm, diameter pin 6 mm, dan panjang pin 3,2 mm
- Mesin milling vertikal, dengan putaran *tool* 780, 980, dan 1120 rpm dan *feed rate* 15 mm/menit
- Pasta pembersih (autosol), resin dan hardener, mesin poles, cairan etsa dengan perbandingan 1: 2 antara HF dengan alcohol
- Mesin Uji Electric *Brinell Hardness Tester* Hauser Henry S A dengan indentor bola baja 1,2 mm dan beban 12,480 kg
- Mesin uji tarik
- Mikroskop Metalografi *Olympus BX41M*

Prosedur Pengujian

- Mempersiapkan bahan dan alat yang digunakan untuk penelitian;
- Meletakkan benda kerja yang sesuai di atas meja mesin milling. Benda kerja yang digunakan adalah Aluminium tipe AA 1100 berbentuk plat dengan dimensi panjang 100 mm, lebar 120 mm dan tebal 4 mm. Posisi benda kerja saling bersinggungan satu sama lain;
- Mengatur putaran tool pada mesin milling vertical 780 rpm, 980 rpm dan 1120 rpm
- Proses pengelasan *friction stir welding*;

- e) Setelah proses pengelasan benda kerja dibersihkan kemudian pembuatan spesimen untuk pengujian sesuai standar ASTM (ASTM Volume 9, 2001);
- f) Setelah pembuatan spesimen kemudian dilakukan pengujian tarik, uji kekerasan sesuai prosedur uji merusak (Yuwono, 2009) dan uji struktur mikro sesuai standar ASM (ASM Volume 9, 2001);
- g) Setelah selesai pengujian kemudian dilakukan pengambilan data dan pembuatan pembahasan pada spesimen yang telah diuji;
- h) Kemudian dari pembahasan tersebut diambil kesimpulan dari hasil penelitian.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengelasan FSW

Hasil pengelasan menggunakan metode *friction stir welding* ditunjukkan pada gambar 1 di bawah ini.



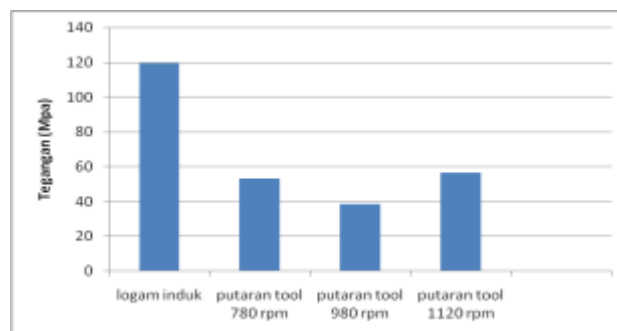
Gambar 1. Hasil pengelasan FSW

Hasil Uji Tarik

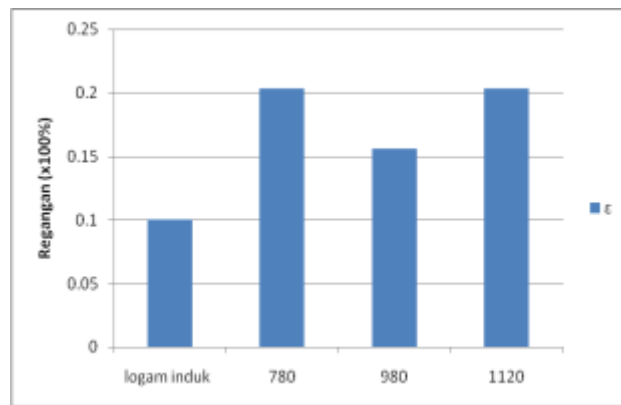
Dalam pengujian tarik dikenal sifat tarik yaitu sifat-sifat yang berhubungan dengan pengujian tarik. Dalam sambungan las sifat tarik dipengaruhi oleh sifat-sifat logam induk. Sifat-sifat logam induk adalah sifat-sifat logam secara umum yang meliputi sifat fisik, sifat mekanik maupun sifat kimianya. Table 1 menunjukkan nilai ultimate tensile strength hasil pengujian tarik dari hasil pengelasan aluminum AA 1100 dengan metode *friction stir welding*.

Tabel 1. Data hasil pengujian tarik

Rpm	A _o (mm)	L _o (mm)	ΔL (mm)	UTS			Rata rata (σ)	ε = ΔL/L _o (%)
				σ ₁	σ ₂	σ ₃		
780	24	32	7	52.083	52.917	51.667	52.222	0.21875
980	24	32	5	38.333	38.333	38.75	38.472	0.15625
1120	24	32	6.5	55.833	56.667	57.083	56.528	0.203125



Gambar 2. Grafik variasi putaran *tool* terhadap kekuatan tarik



Gambar 3. Grafik variasi putaran *tool* terhadap regangan

Dari grafik di atas (gambar 2) tampak terlihat jelas bahwa kekuatan tarik tertinggi (UTS) terbesar terdapat pada proses pengelasan menggunakan putaran *tool* 1120 rpm yaitu sebesar 56,528 MPa, kemudian berturut-turut yaitu putaran *tool* 780 sebesar 52,222 MPa, putaran *tool* 980 rpm sebesar 38,472 MPa. Cacat *wormholes* pada pengelasan dengan putaran *tool* 980 rpm adalah hal utama yang mengurangi kekuatan tarik dan juga ditambah dengan kurangnya penetrasi pada hasil pengelasan. Sedangkan untuk regangan pada gambar 3 yang terjadi pada pengujian tarik ini regangan terbesar terjadi pada proses pengelasan dengan putaran *tool* 780 rpm yaitu sebesar 21,875 %, dan untuk regangan terkecil terjadi pada proses pengelasan dengan putaran *tool* 980 rpm sebesar 15,625 %.

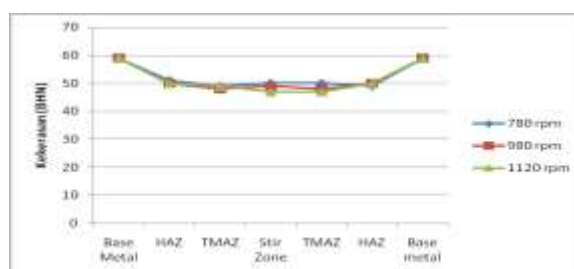
Hasil Uji Kekerasan

Pengujian kekerasan ini dilakukan pada tiap spesimen hasil pengelasan dengan variasi putaran *tool*. Table 2 menunjukkan data hasil pengujian kekerasan dengan menggunakan uji kekerasan brinell, kemudian pada gambar 4 menunjukkan grafik perbandingan kekerasan pada setiap variasi pengelasan.

Tabel 2. Data hasil pengujian kekerasan (BHN)

Putaran <i>Tool</i>	Base Metal	HAZ	TMAZ	Stir Zone	TMAZ	HAZ	Base metal
780 rpm	59	51	49	50	50	49	59
980 rpm	59	50	48	49	48	50	59
1120 rpm	59	50	49	50	49	50	59

Proses pengelasan aluminium dengan *friction stir welding* menggunakan putaran 780 rpm memiliki kekerasan yang paling besar. Kekerasan yang rendah terdapat pada penggunaan putaran 1120 rpm, ini dapat terjadi karena heat input yang besar dapat menghasilkan bentuk grain yang kecil. Seharusnya dalam penelitian ini kekerasan dapat disebabkan oleh besar kecilnya putaran *tool* yang dipakai, semakin besar putaran yang dipakai maka masukan panas juga akan semakin besar dan akan membentuk grain yang kecil sehingga menyebabkan nilai kekerasan yang tinggi.

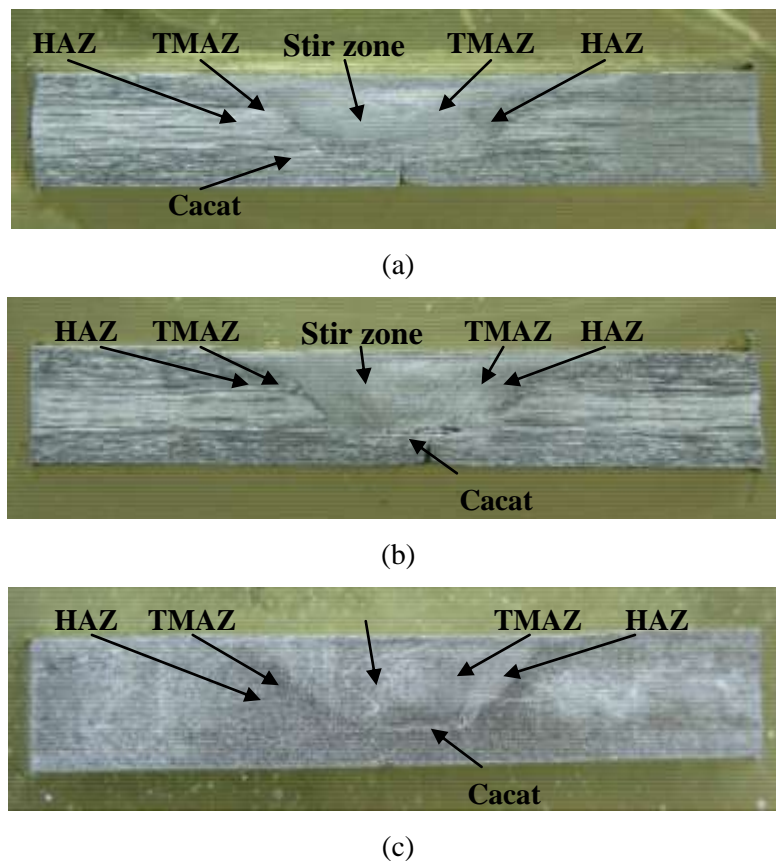


Gambar 4. Grafik nilai kekerasan hasil pengelasan *friction stir welding*

Pada pengelasan *friction stir welding*, penyambungan logam dilakukan dengan gesekan dan adukan tanpa memasukkan logam baru diantara material. Dan hasil pengelasan pada daerah *stir zone* tentu saja tidak bisa melebihi kekuatan dari base metal. Sifat yang kurang baik dari proses ini adalah terjadinya pelunakan pada daerah las sebagai akibat panas yang timbul. Penurunan nilai kekerasan pada daerah lasan, selain karena karakteristik dari paduan itu sendiri juga disebabkan karena proses pengerasan tidak bisa terjadi ketika proses pengelasan berlangsung. Okimura dan Wiryosumarto (1996) menyatakan bahwa pengerasan akan tercapai bila terjadi pengendapan fasa kedua pada temperatur 160- 185°C dalam waktu 6 sampai 20 jam.

Hasil Uji Foto Makro

Pengamatan makro dilakukan untuk mengetahui dan membedakan daerah hasil lasan yang terdiri dari logam induk, HAZ, TMAZ dan *stir zone* pada hasil pengelasan *friction stir welding*. Pada gambar 5 dapat dilihat hasil dari pengamatan foto makro untuk pengelasan dengan variasi putaran *tool* 780 rpm, 980 rpm dan 1120 rpm.



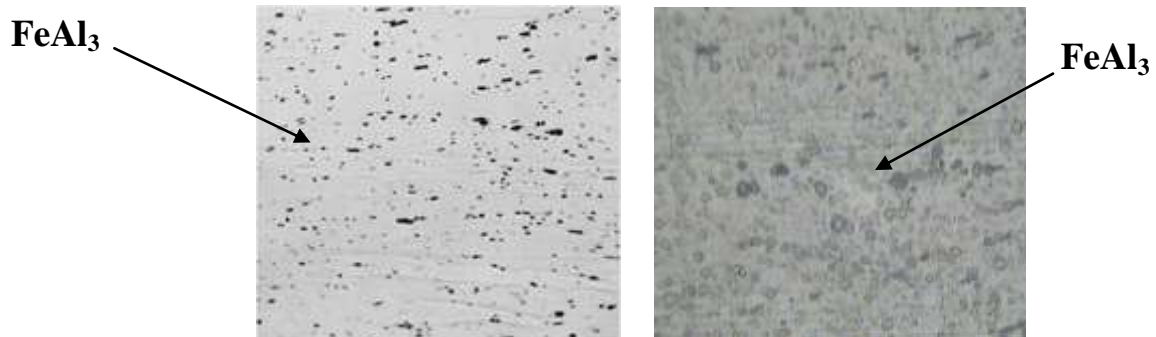
Gambar 5. Foto makro hasil pengelasan dengan variasi putaran tool:
(a) 780 rpm, (b) 980 rpm dan (c) 1120 rpm

Dari gambar di atas dapat diketahui daerah – daerah hasil pengelasan *friction stir welding* dan adanya cacat *wormholes* pada setiap variasi pengelasan. Cacat *wormholes* terbesar terdapat pada hasil pengelasan dengan putaran *tool* 980 rpm dan juga adanya celah karena kurangnya penetrasi dan menimbulkan konsentrasi tegangan pada hasil pengelasan, celah ini juga terjadi pada variasi putaran *tool* 780 rpm.

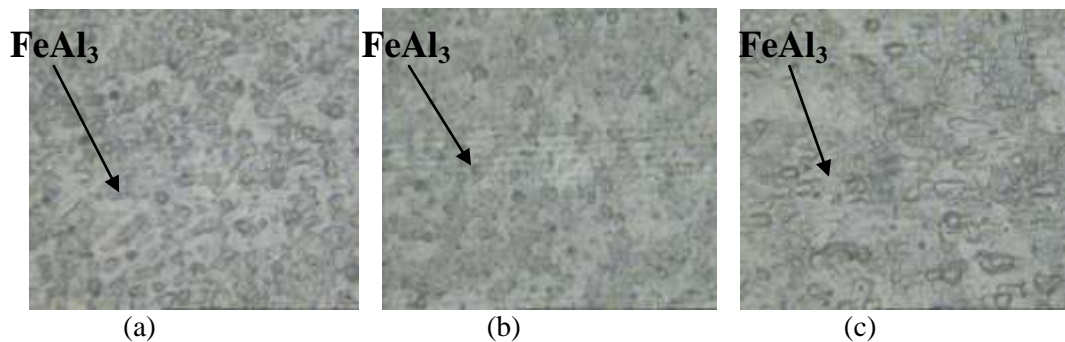
Hasil Uji Foto Mikro

Pengamatan struktur mikro dilakukan untuk mengetahui perubahan struktur mikro yang terjadi akibat adanya proses pengelasan dengan metode *friction stir welding*, yaitu di daerah *stir*

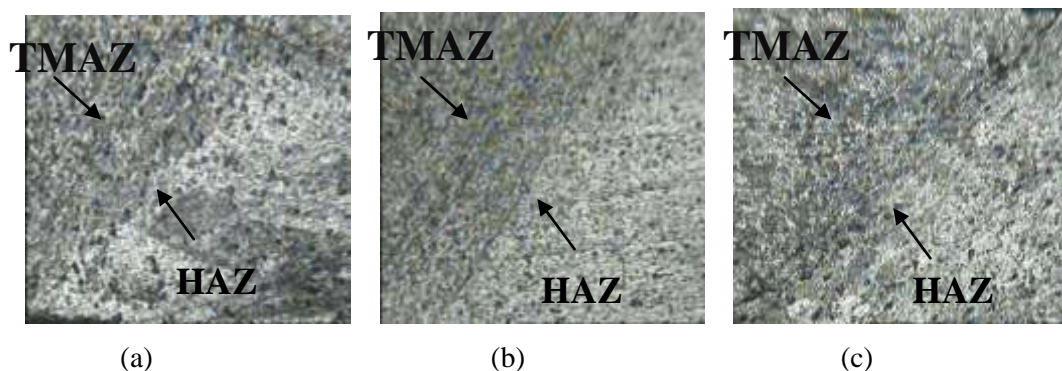
zone, TMAZ, HAZ, dan *base metal* seperti yang dijelaskan pada gambar 7 – 9. Pada pengelasan *friction stir welding* paduan AA 1100 hanya terjadi penghalusan partikel-partikel pada daerah *stir zone* dan tidak terjadi perubahan fase karena pada pengelasan ini tidak menggunakan logam pengisi. Menurut *ASM Hand Book Metallography and- Microstructures*, partikel hitam yang terdispersi merata pada matriks aluminium adalah $FeAl_3$, seperti yang diperlihatkan pada gambar 6 dibawah ini.



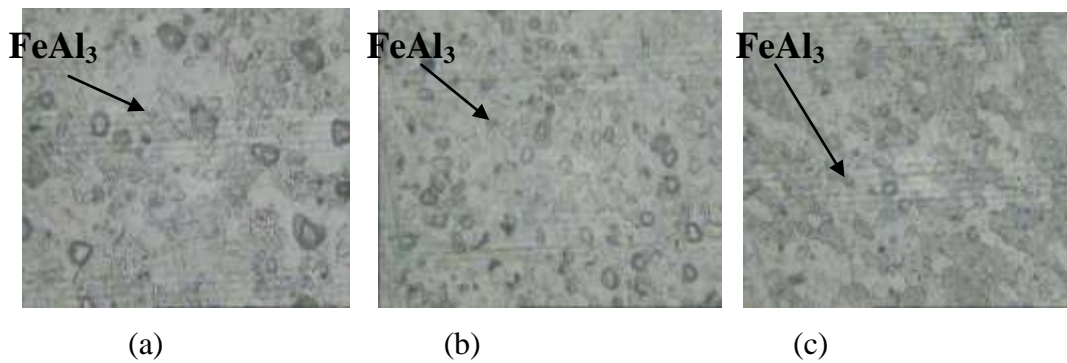
Gambar 6. Struktur mikro *base metal* Aluminium AA1100, menurut *ASM Hand Book Metallography and Microstructures* (kiri), dengan pembesaran 400x (kanan)



Gambar 7. Struktur mikro daerah *stir zone* dengan variasi putaran *tool*: (a) 780 rpm, (b) 980 rpm dan (c) 1120 rpm, pembesaran 400x



Gambar 8. Struktur mikro daerah transisi antara TMAZ dan HAZ dengan variasi putaran *tool*: (a) 780 rpm, (b) 980 rpm dan (c) 1120 rpm, pembesaran 100x



Gambar 9. Struktur mikro daerah HAZ dengan variasi putaran *tool*:
(a) 780 rpm, (b) 980 rpm dan (c) 1120 rpm, pembesaran 400x

KESIMPULAN

Dari hasil penelitian proses pengelasan dengan metode *friction stir welding* yang telah dilakukan pada material Aluminium 1100 dengan variasi putaran *tool* maka dapat diambil kesimpulan bahwa pengelasan aluminium AA 1100 dengan metode *friction stir welding* (FSW) dapat dilakukan dengan baik. Hasil pengujian tarik diperoleh bahwa rata-rata ultimate strength untuk pengelasan dengan menggunakan putaran *tool* 780 rpm adalah 52.222 MPa, untuk putaran *tool* 980 rpm adalah 38.472 MPa dan putaran *tool* 1120 adalah 56.528 MPa. Dengan hasil ini dapat diketahui bahwa ultimate strength yang tertinggi adalah dengan menggunakan putaran *tool* 1120 rpm dan ultimate strength pada putaran *tool* 980 rpm adalah yang terendah. Cacat *wormholes* pada pengelasan dengan putaran *tool* 980 rpm adalah hal utama yang mengurangi kekuatan tarik pada penelitian ini.

Dari pengamatan makro diketahui cacat *wormholes* terbesar terdapat pada hasil pengelasan dengan putaran *tool* 980 rpm dan juga adanya celah karena kurangnya penetrasi dan menimbulkan konsentrasi tegangan pada hasil pengelasan, celah ini juga terjadi pada variasi putaran *tool* 780 rpm. Dari pengamatan mikro diketahui bahwa bentuk butir pada daerah *stir zone* partikel $FeAl_3$ tersebar lebih merata pada matriks Al yang disebabkan adanya proses puntiran pada saat proses pengelasan berlangsung. Pengujian kekerasan menunjukkan bahwa logam las lebih lunak daripada logam induk. Sedangkan daerah TMAZ mempunyai kekerasan yang paling rendah.

Saran

Saran yang dapat diajukan agar percobaan berikutnya dapat lebih baik dan dapat menyempurnakan percobaan yang telah dilakukan dalam penelitian ini, yaitu: perlu adanya pengembangan penelitian khususnya untuk variasi feed rate seperti yang telah dilakukan oleh Wijayanto dan Anelis (2010) dan juga memvariasi geometri *tool* (Biswas, dan Mandal, 2011) agar didapatkan hasil pengelasan yang optimal. Panjang pin pada shoulder sebaiknya lebih panjang akan tetapi tidak melebihi dari tebal logam induk agar didapatkan penetrasi yang lebih dalam sehingga dapat dihasilkan hasil pengelasan yang lebih baik. Serta pengaturan holding time dianjurkan agar didapatkan perambatan panas yang merata.

DAFTAR PUSTAKA

- ASM. 2007. *Friction Stir Welding And Processing*;
ASTM Volume 9. 2001. *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*;
ASTM Volume 9. 2001. *Metallurgy And Microstructure Analysis*;
Yuwono A, H. 2009. *Buku Panduan Praktikum Karakterisasi Material 1 Pengujian Merusak (Destructive Testing)*. Departemen Metalurgi Dan Material Fakultas Teknik. Universitas Indonesia;
Biswas, P. dan Mandal, N. R. 2011. *Effect of Tool Geometries on Thermal History of FSW of AA1100*, Supplement to The *Welding Journal*, July 2011;

- 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 Lxxx*;
- Wijayanto, Jarot & Anelis, Agdha. 2010. *Pengaruh Feed Rate terhadap Sifat Mekanik pada Pengelasan Friction Stir Welding Aluminium 6110*, Jurnal Kompetensi Teknik Vol. 2, No.1, November 2010;
- Yazdipour, A., Shafiei, A. M, Dehghani, K. 2009. *Modeling the microstructural evolution and effect of cooling rate on the nanograins formed during the friction stir processing of Al5083*.
- Nandan, R., DebRoy, T., Bhadeshia. H.K.D.H. 2008. *Recent advances in friction-stir welding – Process, weldment structure and properties*, Progress in Materials Science 53 (2008) 980–1023;
- Jayaraman, M., dkk. 2009. *Optimization of process parameters for friction stir welding of cast aluminium alloy A319 by Taguchi method*, Journal of Scientific & Industrial Research, Vol. 68 January 2009, pp. 36 – 43;
- Okamura, T. & Wiryosumarto, H., 1996, Teknologi Pengelasan Logam, Pradya Paramita, Jakarta.