

SIFAT MEKANIK DAN STRUKTUR MIKRO ALUMINIUM AA1100 HASIL PENGELASAN FRICTION STIR WELDING DENGAN VARIASI *FEED RATE*

Moh. Indra P, Mahros Darsin, Sumarji

Abstrak: 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. FSW (Friction Stir Welding) is one solution that can be used as an alternative to aluminum welding process. FSW is the working principle of utilizing the friction of the rotating workpiece with a stationary workpiece another so that the resulting heat and the heat can melt the workpiece is stationary and connected to one end. FSW welding process to occur at the solvus temperature, so there is no reduction in strength due to aging and dissolution of the precipitate over coherent. Thereseearch aim is to find the best mechanical properties, i.e strength and toughness by varying feed rate. Observations onto microstructures of welding area were also carried out in this research. Feed rate was varied at 7,3, 13, 24mm/mnt. Whereas, tool rotation used was keep constantly at 1200rpm. The material to be welded is a 4.0 mm thick aluminum AA1100 strips. Result showed that the highest strength obtained is 61,53 MPa at 24mm/mnt and the lowest strength obtained is 49,44 MPa at 7,3 mm/mnt. 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: aluminium, feed rate, FSW

Aluminium saat ini mulai banyak diaplikasikan di dunia industri. Ini dikarenakan aluminium termasuk logam ringan yang memiliki kekuatan tinggi, ketahanan korosi dan daya hantar listrik yang baik. Selain itu aluminium juga mempunyai sifat mampu bentuk (*formability*) yang baik dan aluminium lebih ringan daripada besi atau baja. Penggunaan aluminium khususnya tipe AA1100 pada dunia industri banyak digunakan untuk *heat exchangers*, kemasan bahan kimia dan berbagai jenis makanan, berbagai peralatan penyimpanan dll. 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 mempu-

nyai 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. 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*.

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 [2]. Prinsip kerja FSW

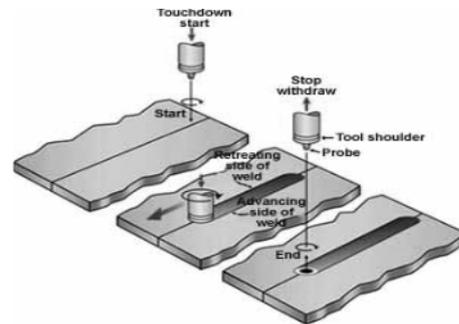
adalah memanfaatkan gesekan dari benda kerja yang berputar dengan benda kerja lain yang diam, sumber panas diasumsikan murni akibat gesekan antara *tool* dan permukaan benda kerja. sehingga mampu melelehkan benda kerja yang diam tersebut dan akhirnya tersambung menjadi satu [3]. Proses pengelasan dengan FSW terjadi pada kondisi padat (*solid state joining*). Proses pengelasan dengan FSW terjadi pada temperatur *solvus*, sehingga tidak terjadi penurunan kekuatan akibat *over aging* dan larutnya endapan koheren. Karena temperatur pengelasan tidak terlalu tinggi, maka 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*.

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.

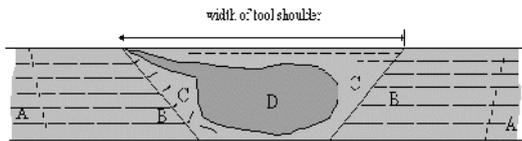
Prinsip *friction stir welding* yang ditunjukkan pada gambar 1, dengan gesekan dua benda yang terus-menerus akan menghasilkan panas, ini menjadi suatu prinsip dasar terciptanya suatu proses pengelasan gesek. Pada proses *friction stir welding*, sebuah *tool* yang berputar ditekan pada material yang akan 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 disatukan.



Gambar 1. Prinsip Friction Stir Welding

Struktur mikro 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. Struktur mikro bagian adukan ini sangat tergantung pada bentuk perkakas las, kecepatan rotasi dan translasi, tekanan dan karakteristik bahan yang akan disambung. Di samping itu, bagian ini juga merupakan bagian yang terdeformasi. Pada bagian pengaruh panas secara termomekanik (*thermomechanical affected zone*) terjadi pengerasan 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. Struktur Mikro Hasil Pengelasan dengan Metode *Friction Stir Welding*, A. logam induk, B. HAZ, C. TMAZ, D. stir zone (weld nugget)

Aluminium

Aluminium berwarna putih kebiru-biruan, lebih keras dari timah putih, tetapi lebih lunak daripada seng. Aluminium mempunyai kekuatan tarik sebesar 10 kg/mm, dan untuk memperbaiki sifat mekanis dari bahan logam aluminium, bahan aluminium ditambah unsur paduan.

Logam aluminium mempunyai karakteristik tersendiri dibandingkan dengan logam lain diantaranya adalah:

1. Aluminium semakin tangguh pada suhu rendah
2. Kecepatan rambat panas tinggi
3. Melting point rendah
4. Mempunyai kekuatan yang tinggi
5. Mudah dibentuk
6. Penghantar panas dan arus yang baik
7. Permukaan mengkilap (3 kali lebih mengkilap dari pada besi)
8. Tahan korosi (terdapat lapisan oksida)
9. Tidak beracun

Dalam hal pengelasan paduan aluminium mempunyai sifat yang kurang baik diantaranya adalah sebagai berikut:

- Karena panas jenis dan daya hantar panasnya tinggi maka sulit untuk memanaskan dan mencairkan sebagian kecil.
- Aluminium mempunyai titik cair dan viskositas yang rendah, maka daerah yang terkena pemanasan mudah mencair dan menetes.
- Paduan aluminium mudah sekali teroksidasi dan membentuk oksida aluminium yang mempunyai titik cair tinggi. Karena sifat ini maka pelebur-

an antara logam dasar dengan logam las menjadi terhalang.

- Karena perbedaan yang tinggi antara kelarutan hidrogen dalam logam cair dan logam padat, maka dalam proses pembekuan yang terlalu cepat akan terbentuk rongga halus bekas kantong-kantong hidrogen.
- Paduan aluminium mempunyai berat jenis yang rendah karena itu banyak zat-zat lain yang terbentuk selama pengelasan akan tenggelam. Keadaan ini memudahkan terkandungnya zat-zat yang tidak dikehendaki kedalamnya.

Unsur – Unsur Paduan Logam Aluminium

- a. Besi (Fe); Penambahan unsur besi pada aluminium dapat mengurangi terjadinya keretakan panas.
- b. Manganase (Mn); Aluminium yang ditambahi unsur mangan dapat memperbaiki ductility pada logam aluminium.
- c. Silicon; Penambahan unsur silicon akan memengaruhi aluminium tahan terhadap korosi tetapi sulit dimachining.
- d. Copper; Unsur copper dapat mempengaruhi logam aluminium mudah dimmesin.
- e. Magnesium; Penambahan unsur magnesium pada logam aluminium akan memperbaiki sifat kekuatan, tetapi sulit pada pekerjaan proses penuangan.
- f. Zinc; Penambahan unsur seng akan memperbaiki sifat logam aluminium tahan terhadap korosi dan mengurangi terjadinya keretakan panas dan pengerutan.

METODE

Penelitian ini meliputi dua kegiatan utama yaitu pembuatan dan pengujian. Peralatan dan bahan yang digunakan dalam pengujian adalah sebagai berikut:

- Benda kerja yang digunakan adalah Aluminium tipe AA1100 berbentuk plat dengan dimensi panjang 100 mm, lebar 120 mm dan tebal 4 mm
- Tool dari bahan stainless steel diameter shoulder 18 mm, diameter pin 6 mm, dan panjang pin 3,5 mm
- Mesin milling vertikal, dengan putaran *tool* 1200 rpm dan *feed rate* 7,3, 13, dan 24 mm/menit
- Pasta pembersih (autosol), resin dan hardener, mesin poles, cairan etsa 100 ml HCl, 100 ml HNO₃, dan 25 ml HF selama 2 menit, lalu bersihkan dengan alkohol 70 %
- Mesin uji kekerasan Mikro Vikers
- Mesin uji tarik
- Mikroskop Metalografi *Olympus BX41M*

Prosedur Pengujian

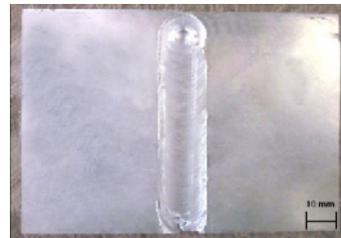
Pengelasan sampai dengan pengambilan kesimpulan dilakukan dengan tahapan sebagai berikut:

- bahan dan alat yang digunakan untuk penelitian dipersiapkan;
- benda kerja yang sesuai diletakkan di atas meja mesin milling. Posisi benda kerja saling bersinggungan satu sama lain;
- putaran tool pada mesin milling vertikal diatur 120 rpm, *feed rate* secara bergantian 7,3, 13, dan 24 mm/menit;
- proses pengelasan *friction stir welding*;
- lasan dibersihkan kemudian pembuatan spesimen untuk pengujian sesuai standar ASTM;
- Setelah pembuatan spesimen kemudian dilakukan pengujian tarik, uji kekerasan sesuai prosedur uji merusak dan uji struktur mikro sesuai standar ASM;
- data pengujian diambil dan dianalisis;
- kesimpulan diambil dari hasil penelitian.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengelasan FSW

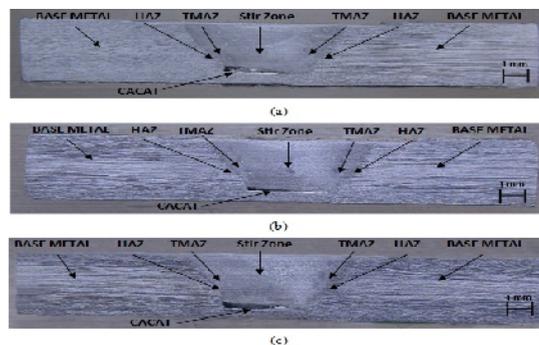
Hasil pengelasan menggunakan metode *friction stir welding* ditunjukkan pada Gambar 3 di bawah ini.



Gambar 3. Hasil Pengelasan FSW

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 4 dapat dilihat hasil dari pengamatan foto makro untuk pengelasan dengan variasi *feed rate* 7,3mm/menit, 13mm/menit, dan 24mm/menit.



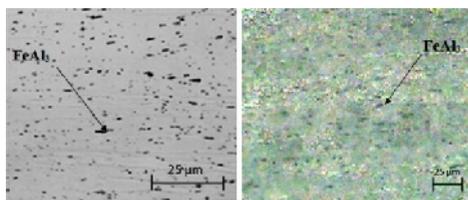
Gambar 4. Foto Makro Hasil Pengelasan dengan Variasi *Feed Rate*:
(a) 7,3mm/menit, (b) 13mm/menit, dan (c) 24mm/menit.

Berdasarkan hasil foto makro, terdapat cacat berupa cacat *wormhole*. Cacat ini terjadi karena pada ujung *pin* mengalami pendinginan pada saat proses pengelasan berlangsung sehingga material yang berada tepat pada ujung *pin* tidak lumer sem-

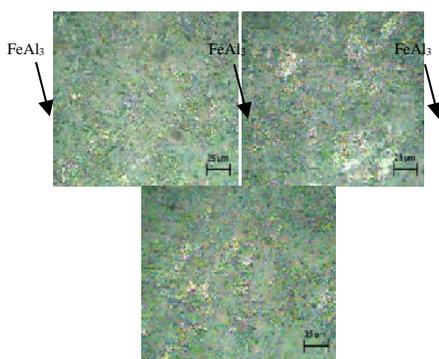
purna, akibatnya terdapat lubang memanjang yang disebut cacat *wormhole*. Dimana panjang dari cacat *wormhole* ini cenderung hampir sama dengan diameter *pin*. Cacat ini juga bisa diakibatkan oleh kurangnya penetrasi pada saat proses pengelasan.

Hasil Uji Foto Mikro

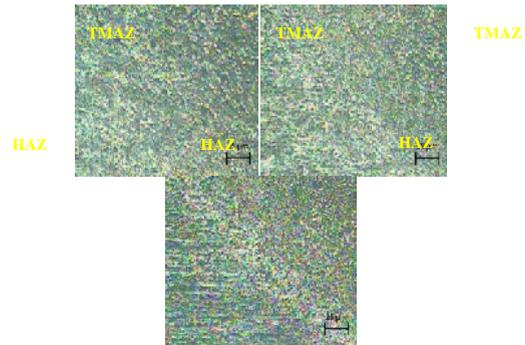
Pengamatan struktur mikro dilakukan untuk mengetahui perubahan struktur mikro yang terjadi akibat adanya proses pengelasan dengan metode *friction stir welding*, yaitu di daerah *stir zone*, TMAZ, HAZ, dan *base metal*. Pada pengelasan *friction stir welding* paduan AA1100 hanya terjadi penghalusan partikel-partikel 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 5 di bawah ini.



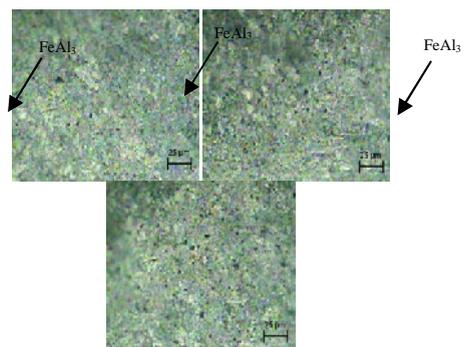
Gambar 5. Struktur Mikro Base Metal Aluminium AA1100, Menurut ASM Hand Book Metallography And Microstructures (Kiri) Pembesaran 500x, Setelah Pengujian Mikrostruktur Dengan Pembesaran 200x (Kanan).



Gambar 6. Struktur Mikro Daerah Stir Zone Dengan Variasi Feed Rate: (a) 7,3mm/menit, (b) 13mm/menit, dan (c) 24mm/menit, pembesaran 200x.



Gambar 7. Struktur Mikro Daerah Transisi Antara TMAZ Dan HAZ Dengan Variasi Feed Rate: (a) 7,3mm/menit, (b) 13mm/menit, dan (c) 24mm/menit, pembesaran 200x.



Gambar 8. Struktur Mikro Daerah HAZ Dengan Variasi Feed Rate: (a) 7,3mm/menit, (b) 13mm/menit, dan (c) 24mm/menit, pembesaran 200x.

$FeAl_3$ adalah suatu senyawa yang terbentuk dari reaksi antara aluminium dengan Fe, dimana aluminium bereaksi mengikat Fe di atas 0,4% Fe. Semakin banyak butiran $FeAl_3$ yang terbentuk semakin sulit pergerakan dislokasi yang terjadi yang nantinya akan mengakibatkan peningkatan kekuatan dan kekerasan logam. Struktur butir juga memiliki batas-batas butir dan batas butir merupakan rintangan bagi pergerakan dislokasi. Butir semakin halus cenderung akan semakin memperbanyak batas butir. Batas butir yang banyak akan mengakibatkan gerakan dislokasi semakin sulit yang nantinya juga

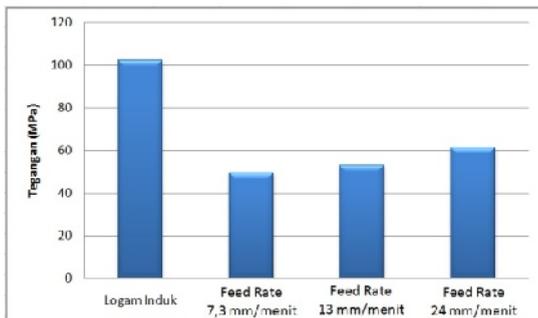
akan meningkatkan sifat mekanik dari logam.

Hasil Uji Tarik

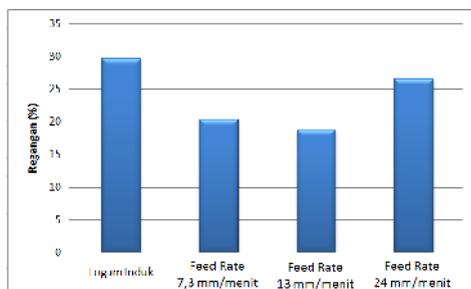
Dalam pengujian tarik dikenal sifat tarik yaitu sifat-sifat yang berhubungan dengan pengujian tarik. Dalam sambungan las sifat tarik dipengaruhi oleh sifat sifat logam induk. Sifat-sifat logam induk adalah sifat-sifat logam secara umum yang meliputi sifat fisik, sifat mekanik maupun sifat kimianya. Tabel 1 menunjukkan nilai *ultimate tensile strength* hasil pengujian tarik dari hasil pengelasan aluminium AA1100 dengan metode *friction stir welding*.

Tabel 1. Data Hasil Pengujian Tarik

Feed rate (mm/mnt)	A _o (mm)	L _o (mm)	L (mm)	UTS ()	(%)
7,3	24	32	6,5	49,4	20,31
13	24	32	6	53,06	18,75
24	24	32	8,5	61,53	29,69



Gambar 9. Grafik Variasi Feed Rate Terhadap Kekuatan Tarik



Gambar 10. Grafik Variasi Feed Rate Terhadap Regangan

Terhadap Regangan

Dari grafik pada Gambar 9 dan Gambar 10 terlihat jelas bahwa antara logam induk Aluminium AA1100 dengan logam yang sudah dilas memiliki perbedaan kekuatan tarik yang sangat signifikan, yakni hampir mencapai 50% dari kekuatan raw materialnya. Hal ini dikarenakan pada daerah logam lasan mengalami perubahan struktur mikro akibat proses penempaan pada saat pengelasan. Kekuatan tarik tertinggi (UTS) terbesar terdapat pada proses pengelasan menggunakan feed rate 24 mm/mnt yaitu sebesar 61,53 MPa, kemudian berturut-turut yaitu feed rate 13 mm/mnt sebesar 53,06 MPa, feed rate 7,3 mm/mnt sebesar 49,4 MPa. Hal ini disebabkan pengelasan dengan variasi *feed rate* 24 mm/menit cenderung memiliki butiran-butiran FeAl₃ yang lebih banyak dan lebih halus dibandingkan dengan variasi *feed rate* yang lain. Sedangkan kekuatan tarik terendah terdapat pada variasi *feed rate* 7,3mm/menit, hal ini disebabkan input panas terlalu tinggi. Input panas yang tinggi ini akan mengakibatkan pendinginannya lebih lambat sehingga butiran-butirannya lebih besar yang pada akhirnya menyebabkan penurunan kekuatan pada hasil lasan.

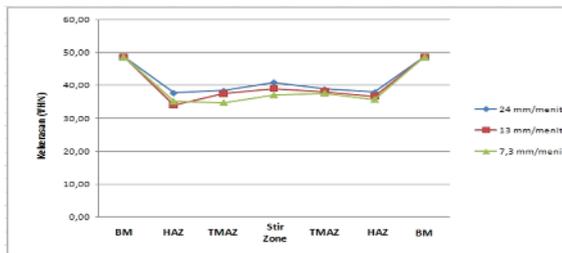
Hasil Uji Kekerasan

Pengujian kekerasan ini dilakukan pada tiap spesimen hasil pengelasan dengan variasi feed rate. Tabel 2 menunjukkan data hasil pengujian kekerasan dengan menggunakan uji kekerasan Mikro Vickers, kemudian pada Gambar 11 menunjukkan grafik perbandingan kekerasan pada setiap variasi pengelasan.

Tabel 2. Data Hasil Pengujian Kekerasan (BHN)

Feed rate (mm/mnt)	BM (VHN)	HAZ (VHN)	TMAZ (VHN)	Stir Zone (VHN)	TMAZ (VHN)	HAZ (VHN)	BM (VHN)
7,3	48.59	32.80	35.39	37.00	37.60	35.04	48.59

13	48.59	34.04	37.45	38.97	38.06	35.05	48.59
24	48.59	37.79	38.40	42.59	38.85	37.94	48.59



Gambar 11. Grafik Nilai Kekerasan Hasil Pengelasan Friction Stir Welding

Dari grafik nilai kekerasan pada gambar 11 dapat diketahui bahwa di daerah HAZ, TMAZ dan *stir zone* terjadi penurunan kekerasan yang signifikan dibandingkan material induk logam las, tetapi rata-rata pada daerah *stir zone* terjadi kenaikan nilai kekerasan meskipun tidak terlalu signifikan. Hal ini disebabkan pada pengelasan ini tidak dimasukkannya logam baru (*electrode*) pada saat pengelasan. Pada pengelasan busur adanya logam baru (*electrode*) dapat diatur tingkat mechanical propertiesnya sesuai dengan yang diinginkan. Pada pengelasan *friction stir welding*, penyambungan logam dilakukan dengan gesekan dan adukan tanpa memasukkan logam baru diantara material.

Rata-rata nilai kekerasan paling besar terjadi pada pengelasan dengan *feed rate* 24mm/menit sedangkan kekerasan paling rendah terjadi pada variasi *feed rate* 13mm/menit. Hal ini terjadi karena pada pengelasan dengan *feed rate* 24mm/menit menghasilkan butiran FeAl₃ yang halus. Butiran yang halus strukturnya lebih rapat sehingga ikatan antar atomnya lebih kuat. Rata-rata nilai kekerasan terendah terjadi pada daerah HAZ yaitu daerah terpengaruh panas karena pada daerah HAZ ini butiran yang terbentuk kasar dan besar. Hal inilah yang menyebabkan patahan pada hasil uji tarik terjadi di daerah HAZ, mengingat besar kekuatan tarik suatu bahan selalu berbanding lurus dengan harga kekerasannya.

KESIMPULAN

Dari hasil penelitian proses pengelasan dengan metode *friction stir welding* yang telah dilakukan pada material Aluminium AA1100 dengan variasi *feed rate* maka dapat diambil kesimpulan bahwa kekuatan tarik maksimum dan regangan dari hasil lasan mengalami penurunan yang signifikan dibandingkan dengan logam induknya. Dari pengamatan makro diketahui pada semua variasi pengelasan terdapat cacat. Cacat ini terjadi karena pada ujung *pin* mengalami pendinginan pada saat proses pengelasan berlangsung sehingga material yang berada tepat pada ujung *pin* tidak lumer sempurna, akibatnya terdapat lubang memanjang yang disebut cacat *wormhole*. Cacat *wormholes* terbesar terdapat pada hasil pengelasan dengan *feed rate* 24mm/menit. Dari pengamatan mikro diketahui bahwa bentuk butir pada daerah *stir zone* partikel FeAl₃ tersebar lebih merata pada matriks Al yang disebabkan adanya proses adukan pada saat pengelasan berlangsung. Sedangkan pada daerah HAZ butiran FeAl₃ cenderung berukuran lebih besar dibandingkan dengan daerah pengelasan yang lain. Hasil pengujian tarik diperoleh bahwa rata-rata *Ultimate Tensile Strength* (UTS) untuk pengelasan dengan menggunakan *feed rate* 7,3 mm/menit adalah 49,44 MPa, untuk *feed rate* 13 mm/menit adalah 53,06 MPa, dan untuk *feed rate* 24 mm/menit sebesar 61,53 MPa. Dari hasil ini dapat diketahui bahwa kekuatan tarik tertinggi (UTS) terbesar terdapat pada proses pengelasan menggunakan *feed rate* 24mm/menit. Hasil pengujian kekerasan menunjukkan bahwa logam las kekerasannya lebih rendah daripada lo-

gam induk. Rata-rata nilai kekerasan paling besar terjadi pada pengelasan dengan *feed rate* 24mm/menit, yaitu 37,86 VHN pada daerah HAZ, 38,62 VHN pada daerah TMAZ dan 42,59 VHN di daerah Stir Zone, sedangkan kekerasan paling rendah terjadi pada variasi *feed rate* 7,3mm/menit, yaitu 33,92 VHN, 36,49 pada daerah TMAZ dan 37 VHN di daerah Stir Zone. Kekuatan tarik dan kekerasan logam las berbanding lurus dengan kecepatan pengelasan (*feed rate*). Secara umum sifat mekanis yang paling baik dari hasil penelitian pengelasan Aluminium AA1100 dengan metode *Friction Stir Welding* (FSW) terjadi pada *feed rate* 24mm/menit.

DAFTAR RUJUKAN

- Okamura, T. & Wiryosumarto, H., "Teknologi Pengelasan Logam", 1996, Pradya Paramita, Jakarta.
- Nandan, R., DebRoy, T., Bhadeshia, H.K.D.H. "Recent advances in friction-stir welding – Process, weldment structure and properties", *Progress in Materials Science* 53 (2008) 980–1023.
- Biswas, P. dan Mandal, N. R. "Effect of Tool Geometries on Thermal History of FSW of AA1100", Supplement to *The Welding Journal*, July 2011.
- Jayaraman, M., dkk. "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.
- ASTM Volume 9. 2001. *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*.
- Yuwono A, H. "Buku Panduan Praktikum Karakterisasi Material 1 Pengujian Merusak (Destructive Testing)". 2009. Departemen Metalurgi Dan Material Fakultas Teknik. Universitas Indonesia.
- ASM Volume 9. 2001. *Metallography And Microstructure Analysis*;
- AL Hasa, dkk., (2010), Pengembangan Material Paduan Aluminium Dan Sifat Mekanik Melalui Proses Sintesis Dan Deformasi. Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir, BATAN, Kawasan Puspiptek, Serpong 15314.
- Wijayanto, Jarot & Agdha Anelis (2010) *Pengaruh Feed Rate terhadap Sifat Mekanik pada Pengelasan Friction Stir Welding Alumunium 6110*.