

PENGARUH FEED RATE TERHADAP SIFAT MEKANIK DAN STRUKTUR MIKRO PADA FRICTION STIR WELDING ALUMINIUM SERI 6110

Jarot Wijayanto ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Staf Pengajar Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Banjarmasin

Ringkasan

Pengelasan merupakan bagian yang tidak dapat dipisahkan dari peningkatan pengembangan industri, sebab pengelasan memiliki peran utama pada bidang teknik dan perbaikan produksi. Friction stir welding (FSW) adalah proses pengelasan baru dimana biaya produksi rendah dan sambungan yang dihasilkan berkualitas baik. Proses FSW menggunakan sebuah tool yang berputar ditekan pada material yang akan disatukan. Gesekan tool yang berbentuk silindris yang dilengkapi pin/probe mengakibatkan pemanasan setempat yang mampu melunakkan bagian tersebut. Parameter proses menggunakan putaran pada mesin 3600rpm dengan variasi laju kecepatan proses (feed rate); 40, 64, 93, 200 dan 320 mm/menit. Hasil proses FSW menunjukkan terjadi penurunan nilai kekerasan yang signifikan pada daerah logam las, HAZ dan logam induk terhadap material induknya, tetapi untuk variabel 320 mm/mnt terjadi penyempitan daerah lasan. Nilai kekerasan raw material adalah ± 55 VHN dan pada pusat las ± 37.5 VHN. Diantara variabel yang telah diteliti, nilai tegangan dan regangan yang paling baik adalah pada variabel 320(8.86 kg/mm² ; 2.17%). Sedangkan nilai tegangan terendah terjadi pada variabel 64 mm/mnt (5.75 kg/mm²) dan nilai regangan terendah terjadi pada variabel 200 mm/mnt (1.02%). Mikro struktur pada area pengelasan dan material induk pada dasarnya tidak mengalami perubahan, tetapi pada bagian TMAZ butir mengalami distorsi sehingga nampak seperti onion ring.

Kata Kunci : *friction, feed rate, shoulder, fsw*

1. PENDAHULUAN

Perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi yang begitu pesat menuntut kembangnya sumber daya manusia. Banyak orang yang berusaha mengembangkan dalam mencari efisiensi-efisiensi yang lebih baik di bidang teknik pengelasan. Pengelasan merupakan bagian tak terpisahkan dari pertumbuhan peningkatan industri karena memegang peranan utama dalam rekayasa dan reparasi produksi logam. Lingkup penggunaan teknik pengelasan dalam bidang konstruksi sangat luas, meliputi perkapalan, jembatan, rangka batang berupa Baja atau Aluminium, pipa saluran dan lain sebagainya. Dalam memilih proses pengelasan harus dititik beratkan pada proses yang paling sesuai untuk tiap-tiap sambungan las yang ada pada konstruksi. Dalam hal ini dasarnya adalah efisiensi yang tinggi, biaya yang murah, penghematan tenaga dan penghematan energi sejauh mungkin. Mutu dari hasil pengelasan disamping tergantung dari pengerjaan lasnya sendiri, juga tergantung dari persiapan sebelum pelaksanaan pengelasan, karena pengelasan adalah proses penyambungan antara dua bagian logam atau lebih dengan memanfaatkan energi panas.

Friction Stir Welding (FSW) adalah suatu proses pengelasan baru yang ditemukan di TWI (*The Welding Institute*) oleh Wayne Thomas pada tahun 1991. Aplikasi harian *Friction Stir Welding* masih dikembangkan, seperti variasi desain *tool*, perbaikan teknik pengelasan dan perbaikan material *tool* baru untuk dapat memperpanjang umur pakai *tool*. *Friction Stir Welding* adalah proses pengelasan yang *input* panasnya didapatkan dari hasil gesekan antara *tool* yang digunakan dengan benda kerja (*work piece*). Temperatur cair material *tool* harus lebih tinggi dari benda kerja yang akan disambung agar pada saat pengelasan berlangsung *tool* tidak menyatu pada benda kerja. Metode ini menghasilkan daerah TMAZ (*Thermomechanically Affected Zone*) yang lebih kecil dibandingkan dengan pengelasan busur nyala. Selama ini pengelasan dengan metode FSW diterapkan pada Aluminium.

Pengelasan ini telah berhasil menekan biaya proses pengelasan menjadi lebih murah karena pengelasan ini hanya membutuhkan *input* energi yang rendah dan tidak menggunakan *filler metal*.

Kualitas hasil pengelasan *Friction Stir Welding* memiliki permukaan yang lebih halus dan

rata dari hasil pengelasan tradisional lain, kuat dan tidak ada pori-pori yang timbul seperti pada proses pengelasan yang menggunakan busur nyala dan *filler materials*. Proses ini ramah terhadap lingkungan karena tidak ada uap atau percikan yang dihasilkan dan tidak ada silauan busur nyala atau pantulan sinar seperti pada *fusion welding* yang dapat merusak mata ketika proses pengelasan sedang berlangsung.

Metode pengelasan *Friction Stir Welding* dapat digunakan untuk pengelasan *similar metal* atau *disimilar metal*. Kekurangan pengelasan dengan metode *friction stir welding* adalah dibutuhkan kekuatan yang sangat tinggi untuk proses *clamping* material las agar tidak bergerak ketika pengelasan sedang berlangsung, Tidak fleksibel dibandingkan pengelasan busur nyala, Untuk aplikasi pengelasan pada material berbeda dan ketebalan material yang berbeda maka *tool* yang digunakan juga dengan ukuran yang berbeda dan Membutuhkan mesin yang tangguh.

Tujuan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mempelajari sambungan sejenis (*similar Metal*) alumunium dengan metode *friction stir welding*.
2. Mengetahui sifat-sifat mekanis (uji kekerasan dan uji tarik) serta pengamatan struktur mikro pada bahan alumunium.

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah :

1. Metode pengelasan *friction stir welding*.
2. Pengelasan yang dilakukan adalah satu jenis (*similar metal*) yaitu alumunium 6110 dengan jenis sambungan *butt joints*.
3. Benda kerja yang digunakan untuk penelitian adalah alumunium 6110 yang berupa plat dengan ketebalan 3,8 mm.
4. Kecepatan putaran mesin 3600 rpm dengan variabel *feed rate* 40 mm/mnt, 64 mm/mnt, 93 mm/mnt, 200 mm/mnt dan 320 mm/mnt.
5. Pengujian yang dilakukan meliputi uji tarik dan uji kekerasan dan pengamatan struktur mikro.
6. Dimensi pin yaitu: panjang 3 mm, diameter bawah 3 mm dengan tirus 5° dan diameter *shoulder* 20 mm.

2. KAJIAN PUSTAKA

Penelitian tentang *friction stir welding* khususnya untuk bahan alumunium sudah dilakukan oleh beberapa peneliti diantara lain adalah sebagai berikut.

Z. Barlas dan H. Uzun., 2008, meneliti mengenai sifat mekanik dan struktur mikro dari pengelasan antara Cu dengan CuZn30 yang

berupa lembaran dengan metode FSW. Dalam penelitiannya diperoleh bahwa pengelasan dengan metode *friction stir welding* pada material yang berbeda jenis antara Cu dan CuZn30 dapat dilakukan dengan baik. Hasil rata-rata pengujian tarik, kekuatan luluh serta *elongation* antara Cu dan CuZn30 yang dilas dengan metode *friction stir welding* adalah 235 MPa, 167 MPa dan 22%. Hasil uji kekerasan menunjukkan bahwa daerah yang berada diatas *stir zone* mempunyai kekerasan yang lebih tinggi dari pada daerah yang berada dibawah *stir zone*, dengan nilai kekerasan rata-rata pada daerah *stir zone* 72-107 Hv.

Adamowski, J. dkk., 2007, meneliti pengelasan alumunium AW6082-T6 dengan metode FSW. Dalam penelitiannya diperoleh bahwa perubahan sifat mekanik alumunium alloy AW 6082-T6 yang telah dilas dengan metode *friction stir welding* terjadi ketika ada perubahan parameter, yaitu kecepatan putaran mesin dan *travel speed*. Hasil kekuatan tarik benda kerja lasan berbanding lurus dengan *travel speed* dan penurunan kekerasan terjadi disekitar daerah HAZ.

Yasui, T. dkk., 2006, meneliti mengenai mampu las kecepatan tinggi dengan metode FSW antara paduan alumunium 6063 dengan baja S45C. Dalam penelitiannya diperoleh bahwa pembesaran diameter pada *shoulder* menghasilkan kekuatan tarik sebesar 160 MPa pada 4000 rpm dan *feed rate* 1000 mm/mnt. Hasil dari uji kekerasan menunjukkan bahwa terjadi penurunan kekerasan didaerah *stir zone* dan HAZ.

3. DASAR TEORI

Alumunium

Aluminium memiliki massa jenis dan titik lebur masing-masing 2,70 kg/mm³ dan 660 °C. Aluminium merupakan logam ringan yang mempunyai ketahanan korosi dan hantaran listrik yang baik. Kebanyakan aluminium digunakan untuk peralatan rumah tangga, tetapi aluminium juga digunakan sebagai material untuk pembuatan pesawat terbang, mobil, kapal laut dan konstruksi. Penambahan unsur Cu, Mg, Si, Mn, Zn, atau Si dalam paduan aluminium ditujukan untuk menambah sifat mekanik atau fisik sehingga didapat sifat-sifat yang lain, seperti koefisien pemuaian rendah, ketahanan aus dan lain sebagainya. Al didapat dalam keadaan cair dengan cara elektrolisa, umumnya mencapai kemurnian 99,85 % berat.

Paduan Aluminium

Paduan aluminium diklasifikasikan dalam berbagai standar oleh berbagai negara di dunia. Saat ini klasifikasi yang sangat terkenal adalah

standar *Aluminium Association (AA)* di Amerika yang didasarkan atas standar terdahulu dari *ALCOA (Aluminium Company of Amerika)*. Standar AA dinyatakan dengan penandaan dengan 4 angka dimana angka pertama menyatakan sistem paduan dengan unsur-unsur yang ditambahkan yaitu:

Tabel 1. Seri-seri paduan aluminium (*Budinski. K. G., 1989*)

No	Seri	Keterangan
1	1 x x x	Al murni
2	2 x x x	paduan Al-Cu
3	3 x x x	paduan Al-Mn
4	4 x x x	paduan Al-Zn
5	5 x x x	paduan Al-Mg
6	6 x x x	paduan Al-Mg-Si
7	7 x x x	paduan Al-Si

FSW (friction stir welding)

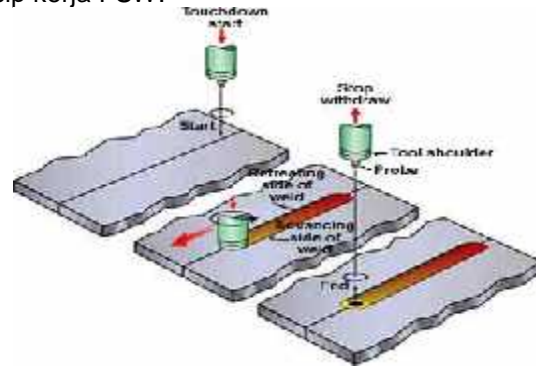
FSW (*friction stir welding*) adalah sebuah metode pengelasan yang termasuk pengelasan gesek, yang pada prosesnya tidak memerlukan bahan penambah atau pengisi. Panas yang digunakan untuk mencairkan logam kerja dihasilkan dari gesekan antara benda yang berputar (*pin*) dengan benda yang diam (benda kerja). *Pin* berputar dengan kecepatan konstan disentuhkan ke material kerja yang telah dicekam. Gesekan antara kedua benda tersebut menimbulkan panas sampai ±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 lasan bisa baik. 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 di las dengan menggunakan metode-metode pengelasan yang lain.

Prinsip Friction Stir Welding

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 di tekankan pada material yang akan di satukan. Gesekan *tool* yang berbentuk silindris (*cylindrical-shoulder*) yang dilengkapi dengan sebuah *pin/probe* dengan material mengakibatkan pemanasan se-

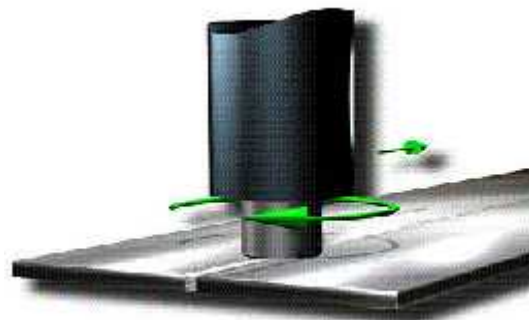
tempat yang mampu melunakan bagian tersebut. *Tool* bergerak pada kecepatan tetap (parameter1) dan bergerak melintang (parameter 2) pada jalur pengelasan (*joint line*) dari material yang akan di satukan. Dua parameter itu digerakan bersama-sama untuk menjaga suhu pada titik pengelasan. Gambar 1. Menunjukkan prinsip kerja FSW.



Gambar 1. Prinsip *Friction Stir Welding* (www.twi.co.uk/content/spjgpmar07.html)

Rotasi Tool dan Kecepatan Melintang

Ada dua kecepatan alat yang harus diperhitungkan dalam pengelasan ini yaitu seberapa cepat *tool* itu berputar dan seberapa cepat *tool* itu melintasi jalur pengelasan (*joint line*). Gambar 2. menunjukkan gerakan tool.



Gambar 2. Gerakan *tool* (www.azom.com/details-asp%3farticle)

Kedua parameter ini harus ditentukan secara cermat untuk memastikan proses pengelasan yang efisien dan hasil yang memuaskan. Hubungan antara kecepatan pengelasan dan *input* panas selama proses pengelasan sangat kompleks, tetapi umumnya dapat dikatakan bahwa meningkatnya kecepatan rotasi dan berkurangnya kecepatan melintas akan mengakibatkan titik las lebih panas.

Jika material tidak cukup panas maka arus pelunakan tidak akan optimal sehingga dimungkinkan akan terjadi cacat rongga atau cacat lain pada *stir zone*, dan kemungkinan *tool* akan rusak. Tetapi input panas yang terlalu tinggi akan merugikan sifat akhir lasan karena perubahan karakteristik logam dasar material. Oleh sebab

itu dalam menentukan parameter harus benar-benar cermat, input panas harus cukup tinggi untuk menjamin plastisitas material yang memadai.

Kedalaman Ceburan dan Tekanan Tool

Kedalaman ceburan (*plunge depth*) didefinisikan sebagai kedalaman titik terendah *probe* di bawah permukaan material yang dilas dan telah diketahui sebagai parameter kritis yang menjamin kualitas lasan. *Plunge depth* perlu diatur dengan baik untuk menjamin tekanan ke bawah tercapai, dan memastikan *tool* penuh menembus lasan. *Plunge depth* yang dangkal dapat mengakibatkan cacat dalam lasan, sebaliknya *plunge depth* yang berlebihan bisa mengakibatkan kerusakan pin karena berinteraksi dengan alasnya.

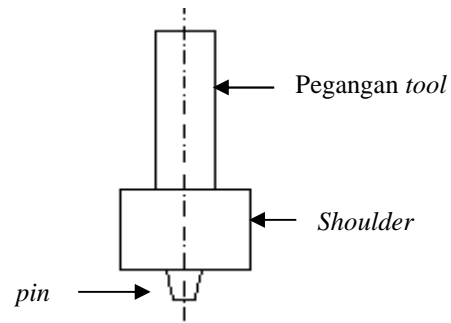
Tekanan *shoulder* diharapkan untuk menjaga material lunak tidak keluar jalur dan memberi efek tempa (*forging*). Material panas di tekan dari atas oleh *shoulder* dan di tahan oleh alas dari bawah. Proses ini bertujuan untuk mampatkan material sehingga penguatan sambungan terjadi akibat efek tempa tersebut. Selain itu tekanan *shoulder* juga menghasilkan *input* panas tambahan karena permukaannya yang lebih besar bergesekan dengan material.

Rancangan Tool

Rancangan *tool* adalah faktor yang sangat mempengaruhi kualitas hasil lasan, karena rancangan *tool* yang tepat dapat meningkatkan kualitas las dan kecepatan las semaksimal mungkin. Panas yang dihasilkan dari gesekan *tool* dan material yang akan dilas sekitar 70 – 80% dari temperatur titik lebur material yang akan dilas tersebut. Material *tool* harus memiliki titik cair yang lebih tinggi dari material las, agar ketika proses pengelasan berlangsung material *tool* ikut tercampur dengan lasan. Material *tool* harus mempunyai kekuatan yang cukup pada temperatur ini karena jika tidak maka *tool* dapat terpuntir dan retak. Oleh sebab itu diharapkan material *tool* cukup kuat, keras dan liat, pada suhu pengelasan. Desain *tool* terdiri dari *shoulder* dan *pin*. *Pin* berfungsi untuk menghasilkan panas dan menggerakkan material yang sedang dilas. *Shoulder* memiliki beberapa fungsi antara lain:

1. Sebagai pelindung dari kemungkinan masuknya suatu material berbeda.
2. *Shoulder* yang berdiameter lebih besar, berperan untuk mempertahankan dan menjaga agar material *plasticised* tidak keluar dari daerah las.
3. *Shoulder* memberi tekanan kebawah yang memberi efek tempa pada lasan.
4. *Shoulder* juga menyediakan *input* panas tambahan, karena luas permukaan yang

bergesekan dengan material las lebih besar maka panas yang dihasilkan juga lebih besar. Desain *tool* ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Design of tool

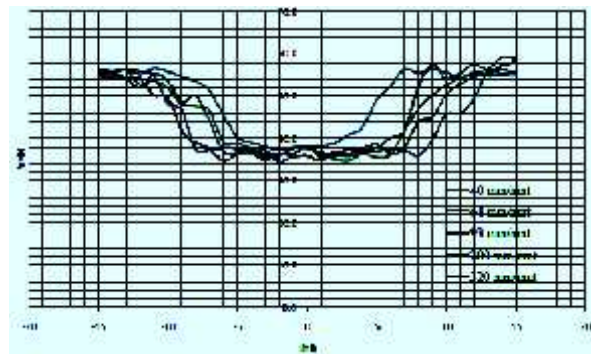
4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Uji Kekerasan Vickers

Pengujian kekerasan pada penelitian ini dilakukan di sepanjang garis pengelasan dengan jarak antar titik ±1 mm sebanyak 31 titik pengujian dengan daerah pengelasan ditunjukkan pada Gambar 4. Standar yang digunakan dalam pengujian kekerasan ini adalah ASTM E384-69. Tujuan dari pengujian kekerasan ini adalah untuk mengetahui seberapa besar pengaruh pengelasan terhadap nilai kekerasan di daerah sepanjang las, HAZ dan logam induk.



Gambar 4. Daerah-daerah Pengelasan

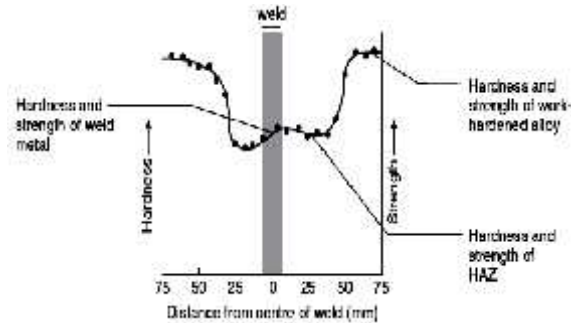


Gambar 5. Grafik kekerasan proses FSW

Gambar 5. menunjukkan bahwa di daerah las dan HAZ pada pengelasan *Simillar* aluminium 6101 dengan metode FSW terjadi penurunan yang signifikan dibandingkan material induk logam las. Penurunan nilai kekerasan terjadi pada jarak 6 mm dari pusat las, tetapi rata-rata pada pusat titik las terjadi kenaikan nilai kekerasan mekipun tidak signifikan. Selanjutnya pada

jarak 6-12 mm dari pusat las kenaikan nilai kekerasan mulai terjadi hingga nilainya kurang lebih sama dengan material induk. Penurunan nilai kekerasan terlihat pada daerah pengelasan. Proses pelunakan tersebut lebih jelas terlihat pada daerah pengaruh panas (*heat affected zone*) yaitu daerah pinggir pengelasan (Adamowski, J., 2007).

Pada dasarnya paduan Al-Mg-Si termasuk dalam jenis paduan aluminium yang dapat diperlakukan panaskan dan mempunyai sifat mampu potong, mampu las dan daya tahan korosi yang cukup (Wiryosumarto, 1996). Sifat yang kurang baik dari paduan ini adalah terjadinya pelunakan pada daerah las sebagai akibat panas yang timbul (Wiryosumarto, 1996). Gambar 6. Menunjukkan karakteristik hasil kekerasan pengelasan paduan Al-Mg-Si. Penurunan nilai kekerasan pada daerah lasan, selain karena karakteristik dari paduan itu sendiri juga disebabkan karena proses pengelasan tidak bisa terjadi ketika proses pengelasan berlangsung. Wiryosumarto, 1996., menyatakan bahwa pengerasan akan tercapai bila terjadi pengendapan fasa kedua pada suhu 160-185°C dalam waktu 6 sampai 20 jam.

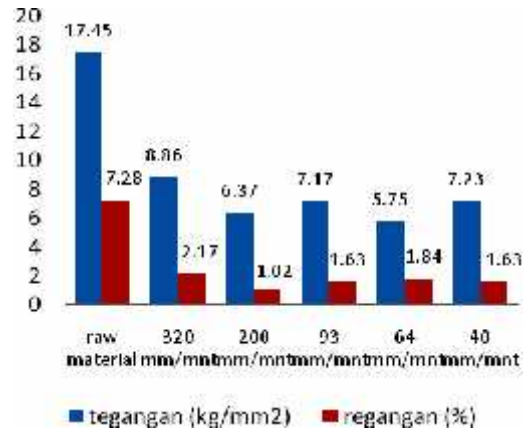


Gambar 6. Karakteristik kekerasan hasil pengelasan pada Al-Mg-Si (Mathers.G.,2002)

Uji Tarik

Pengujian uji tarik dilakukan pada material Aluminium 6110 pada logam hasil pengelasan. Dimensi spesimen uji tarik untuk material pengelasan menggunakan standar ASTM E6-69.

Gambar 7. menunjukkan bahwa antara logam induk Aluminium 6110 dengan logam yang sudah dilas memiliki perbedaan tegangan tarik yang sangat signifikan, yang hampir mencapai 50% dari kekuatan *raw material*nya. Hal di karenakan pada daerah logam lasan masih mengalami adanya cacat retak akibat pengelasan. Nilai regangan mengalami perbedaan yang sangat signifikan dibanding regangan yang dimiliki oleh *raw material*nya. Hal ini dikarenakan patahan terjadi tepat pada daerah lasan, yang merupakan daerah yang paling banyak mengalami perlakuan teknik, sehingga pada daerah tersebut kekuatan materialnya berbeda.



Gambar 7.. Grafik tegangan-regangan hasil pengelasan

Selain hal itu, perbedaan nilai tegangan dan regangan terjadi karena pada material hasil pengelasan memiliki cacat, baik cacat luar maupun cacat dalam. H. Wiryosumarto, 1996., menyebutkan bahwa jika Al-Mg-Si dilas dengan menggunakan logam las yang sama akan menyebabkan retak manik membujur. Peningkatan *feed rate* akan menyebabkan penurunan masukan panas (*heat input*) dan relatif akan mengurangi batas HAZ dari material. Kekuatan tarik pengelasan FSW juga dipengaruhi oleh kecepatan pengelasan (*feed rate/travel speed*) (Adamowski, J., 2007).

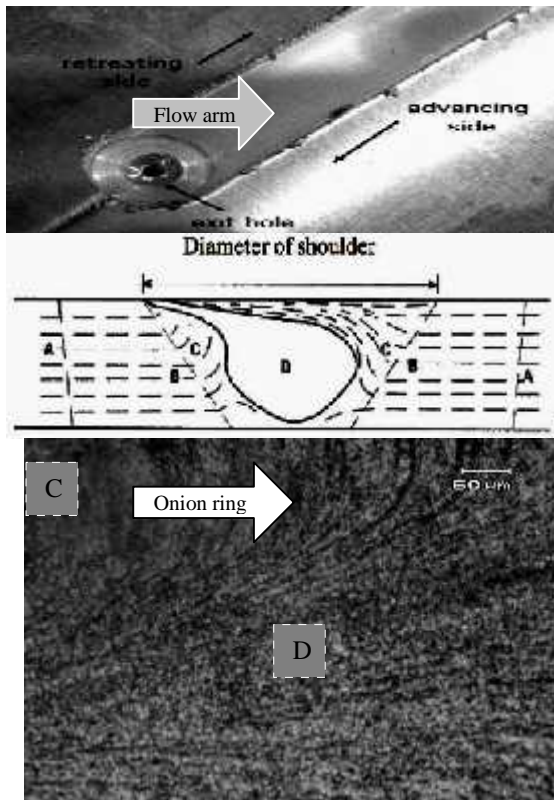
Pengamatan Struktur Mikro

Pegambilan gambar struktur mikro dilakukan dengan Mikroskop Logam Olympus dengan perbesaran 50X pada daerah jalur pengelasan. Gambar 8 menunjukkan daerah FSW dan struktur mikro hasil proses pengelasan untuk parameter *feed rate* 320mm/menit.

Perubahan mikrostruktur dalam *stir zone* (bagian yang bersentuhan langsung dengan *probe* dan *shoulder*) merupakan efek deformasi pada temperatur tinggi akibat gerakan rotasi dan longitudinal dari *probe* dan *shoulder*, yang mengakibatkan butiran-butiran dalam *stir zone* menjadi lebih kecil dari butiran-butiran pada material induk. Ciri-ciri dari *stir zone* adalah kejadian umum beberapa lingkaran konsentris yang telah disebut sebagai struktur "*onion ring*" (lingkaran seperti bawang). TMAZ (*thermomechanically affected zone*) terjadi pada sisi *stir zone* (Gambar 9, yang ditunjukkan dengan huruf C).

Pada bagian ini tegangan dan temperatur lebih rendah dari *stir zone* sehingga efek pengelasan terhadap mikrostruktur lebih kecil. Mikrostrukturnya adalah susunan material induk, walaupun secara signifikan mengalami deformasi dan rotasi. Istilah TMAZ digunakan untuk mendeskripsikan bagian-bagian manapun yang

mengalami pemanasan tetapi belum tertutup oleh *stir zone* dan *flow arm*. Fasa yang mungkin terjadi pada paduan seri 6xxx adalah fasa - $Al_{12}Fe_3Si$; - $Al_9Fe_2Si_2$ (Mrocza, K.,2008). Daerah *Stirred (nugget)* yang merupakan daerah penempaan (*forging*) akibat gerakan rotasi dan longitudinal serta vertical dari *probe* dapat dilihat pada Gambar 8 yang ditunjukkan dengan huruf D.



Gambar 8. Daerah-daerah FSW dan struktur mikro hasil proses pengelasan untuk parameter feed rate 320mm/menit

5. PENUTUP

Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari proses penelitian, antara lain:

1. Terjadi penurunan nilai kekerasan yang signifikan pada daerah logam las, HAZ dan logam induk terhadap material induknya, tetapi untuk variabel 320 mm/mnt terjadi penyempitan daerah lasan. Nilai kekerasan raw material adalah ± 55 VHN dan pada pusat las ± 37.5 VHN.
2. Kekuatan tarik maksimal dan regangan maksimal dari hasil lasan mengalami penurunan yang signifikan jika dibandingkan dengan logam induknya. Diantara variabel yang telah diteliti, nilai tegangan dan regangan yang paling baik adalah pada variabel 320(8.86 kg/mm^2 ; 2.17%). Sedang-

kan nilai tegangan terendah terjadi pada variabel 64 mm/mnt (5.75 kg/mm^2) dan nilai regangan terendah terjadi pada variabel 200 mm/mnt (1.02%).

3. Mikro struktur pada area pengelasan dan material induk pada dasarnya tidak mengalami perubahan, tetapi pada bagian TMAZ butir mengalami distorsi sehingga nampak seperti *onion ring*.

6. DAFTAR PUSTAKA

1. Adamowski, J. & Szkodo, M., (2006), "Friction Stir Welds (FSW) of Aluminium Alloy AW6082-T6", Journals of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, Vol. 20, ISSUES.1-2 January - February, 2007.
2. Budinski, K. G., (1989), *Engineering Materials Properties and Selection*, Third Edition, Prentice-Hall Internasional, Inc., London.
3. David, S. A. & Feng, Z., (2004), *Friction Stir Welding of Advanced Materials: Challenges*, Metals and Ceramics Division Oak Ridge, TN., Austria.
4. Durdanovi, M. B., Mijajlovic, M.M., Milcic, D. S. dan Stamenkovic, D. S., (2009), "Heat generation During Friction Stir Welding Process", Tribology in Industry, Vol. 31, No.1&2.
5. Mathers, G., (2002), *The Welding of Aluminium and its Alloys*, Woodhead Publishing, Ltd., Cambridge Shinroku, S. & Surdia, T., 1984, *Pengetahuan Bahan teknik*, Pradnya Paramita, Jakarta.
6. Mrocza, K., Dutkiewicz, J., Ltynska-Dobryzyna dan Pietras, A., (2008), *Microstructure and Properties of FSW joint of 2017A/6013 Aluminium Alloy Sheets*, International Scientific Journal, Vol 33, page 93-96.
7. Okumura, T. & Wiryosumarto, H., (1996), *Teknologi Pengelasan Logam*, Pradnya Paramita, Jakarta.
8. Shinroku, S. & Surdia, T., (1984), *Pengetahuan Bahan teknik*, Pradnya Paramita, Jakarta.
9. Yasui, T., Shubaki, M., Fukomoto, M., Shimoda, Y dan Ishii, T, (2006), *Heat Speed Weldability between 6063 and S45C by Friction Stir Welding*, Welding International Proquest Science Journal, Pg 284.