

**PENGARUH VARIASI PANJANG PIN TERHADAP KEKUATAN TARIK DAN KEKERASAN
PROSES FRICTION STIR WELDING PADA ALUMINIUM SERI 1XXX**

Wildan Wilantara¹, Aris Widyo Nugroho², Sunardi²

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta

²Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta

Jl. Ring Road Selatan, Tamantirto, Kasihan Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta 55184

Telp: +62 247 387656, Faks: +62 274 387656

Email: wildanwilantara@gmail.com

ABSTRAK

Friction stir welding (FSW) adalah salah satu teknologi pengelasan yang merupakan proses *solid-state joining* yang dapat digunakan untuk menyambungkan material khususnya aluminium. FSW adalah teknologi pengelasan yang memanfaatkan panas dari gesekan benda kerja yang berputar dengan benda kerja yang diam dan tersambung menjadi satu. Tetapi, pada penelitian FSW masih banyak penelitian yang dapat dilakukan seperti variasi panjang pin, guna memperbaiki dan mendapatkan hasil yang diinginkan pada proses pengelasan FSW. Tujuan penelitian tentang FSW yaitu untuk mengetahui pengaruh variasi panjang pin terhadap kekuatan tarik, kekerasan (VHN), struktur mikro, dan struktur makro hasil pengelasan FSW.

Bahan pin adalah baja pejal berbentuk silinder, pembuatan *tool* dimulai dari pengurangan diameter baja 25 mm ke 20 mm, pembuatan pin dengan memperkecil diameter baja dari 20 mm menjadi 4,2 mm, 4,5 mm, dan 4,8 mm, kemudian membuat *shoulder* diameter 16 mm dan panjang 7 mm, dengan panjang keseluruhan 76,2 mm. Spesimen yang digunakan untuk pengelasan FSW adalah aluminium seri 1xxx tebal 5mm, lebar 60 mm, dan panjang 100 mm. Proses pengelasan FSW dan pembentukan spesimen uji tarik menggunakan standar ASTM E8. Pada proses pengelasan menggunakan kecepatan putaran *tool* 950 rpm dengan *feed rate* 20 mm/menit.

Dari hasil uji kekerasan pin yang memiliki nilai kekerasan tertinggi adalah pin 4,8 mm sebesar 29 VHN, Sedangkan hasil kekuatan tarik tertinggi didapat pada pin 4,5 mm sebesar 76.75 MPa. Tetapi, pada hasil uji kekerasan dan uji kekuatan tarik dibawah *raw material*, hal ini disebabkan karena masih terdapat cacat *incomplete fusion*.

Kata Kunci: *Friction stir welding* (FSW), Variasi Panjang Pin, aluminium.

ABSTRACT

Friction Stir Welding (FSW) is one of the welding technologies which are a solid-state joining process that can be used to connect material, especially aluminum. FSW is a welding technology that utilizes heat from the friction of a rotating workpiece with a stationary workpiece and connected into one. However, in FSW research there is still a lot of research that can be done such as pin length variation, in order to improve and get the desired result on FSW welding process. The purpose of the research on FSW is to know the effect of pin length variation on tensile strength, hardness (VHN), microstructure, and macrostructure of FSW welding.

The pin material is a cylindrical solid steel, the making of the tool starts from the reduction of steel diameter 25 mm to 20 mm, the pin make by reducing the diameter of steel from 20 mm to 4,2 mm, 4,5 mm, and 4,8 mm, then making shoulder diameter 16 mm and a length of 7 mm with an overall length is about 76,2 mm. The specimens which used for FSW welding are 1xxx aluminum series with 5mm thickness, 60 mm wide, and the length is 100 mm. The FSW welding process and the formation of tensile test specimens used the ASTM E8 standard. In the welding process that used the speed of rotation tool 950 rpm with feed rate 20 mm/minute.

From the hardness pin test results that has the highest hardness score was 4,8 mm pin of 29 VHN, while the highest tensile strength results obtained at pin 4,5 mm of 76.75 MPa. However, on hardness test

results and tensile strength test was under *raw material*, this is because it still has an *incomplete fusion* defect.

Key words: *Friction Stir Welding (FSW), Pin Length Variation, Aluminum.*

1. Pendahuluan

Aluminium merupakan salah satu logam yang sangat penting di bidang teknik terutama untuk bahan struktur atau mesin, sebagai contoh struktur pesawat, kapal, dan otomotif. Saat ini penyambungan dengan cara pengelasan telah banyak di gunakan pada berbagai konstruksi mesin, karena dapat meningkatkan kekuatan strukturnya dan menurunkan biaya produksi. Salah satu metode pengelasan yang digunakan sebagai penyambung aluminium adalah *Friction Stir Welding (FSW)*.

FSW 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 dan tersambung menjadi satu. Proses pengelasan FSW terjadi pada kondisi padat (*solid state joining*). Pada pengelasan FSW terjadi temperature *solvus*, sehingga tidak terjadi penurunan kekuatan akibat *over aging* dan larutnya endapan koheren. Karena temperature pengelasan tidak terlalu tinggi, maka tegangan sisa yang terbentuk dan distorsi akibat panas juga rendah. Karakteristik mekanis sambungan pada FSW ditentukan oleh parameter sebagai berikut: kecepatan pengelasan, putaran tool, dan tekanan tool. Pada umumnya penyambungan aluminium menggunakan metode rivet dan las TIG, kedua penyambungan ini sangat terbatas jika dilihat dari beberapa aspek, misal hasil penyambungan las TIG masih menggunakan filler atau bahan tambah dalam proses pengelasannya, selain itu asap dan cahaya dari las TIG juga dapat mengganggu kesehatan. Salah satu alternative lain pada pengelasan aluminium adalah *Friction Stir Welding (FSW)*. FSW adalah proses pengelasan *solid-state* dimana sebuah tol yang berputar ditekan sepanjang garis sambungan antara dua benda kerja. Tol yang berputar ditekan pada garis sambungan tersebut

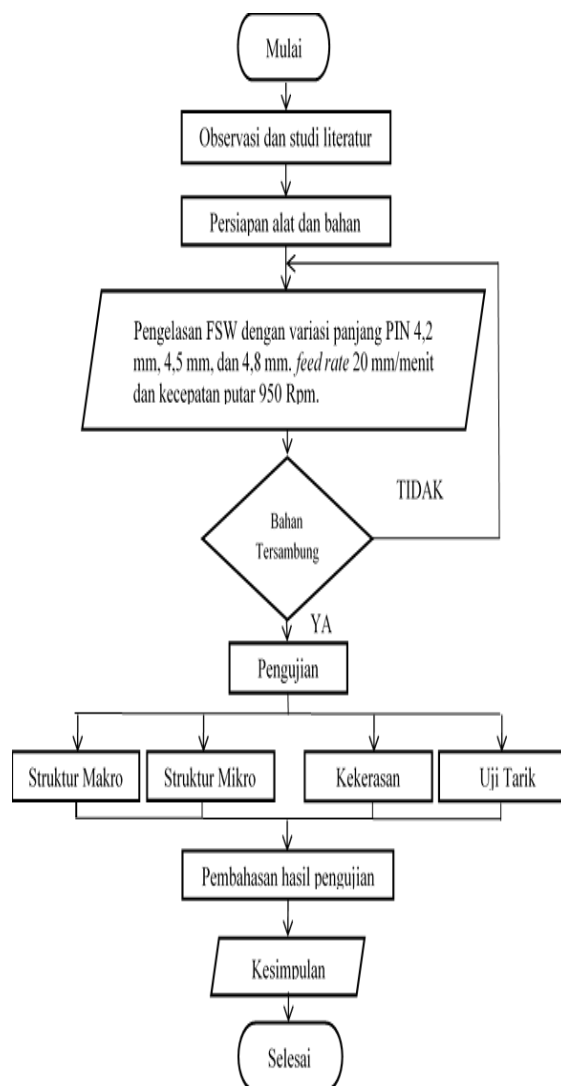
sebagai sumber panas yang digunakan untuk proses pengelasan. Pada pengelasan FSW tidak ada logam pengisi. Metode pengelasan FSW juga ramah terhadap lingkungan, karena tidak ada asap, percikan, maupun cahaya seperti pada las TIG. Romadhoni (2016) meneliti tentang kekuatan mekanik hasil pengelasan aluminium 1XXX ketebalan 2 mm dengan metode FSW variasi kecepatan putar tool 980rpm, 2300rpm, dan 2700rpm dengan feed rate 20 mm/menit menyatakan bahwa kecepatan putaran tool 980 rpm memiliki kekerasan paling tinggi dipusat las sebesar 59,1 VHN sedangkan kekerasan yang rendah pada putaran 2300 rpm dipusat las sebesar 33,4 VHN. Hal ini terjadi karena heat input yang besar dapat menghasilkan bentuk grain yang kecil. Untuk ketiga variasi putaran tool diketahui bahwa semakin besar putaran tool maka tingkat kekerasan semakin menurun. Karena semakin tinggi putaran tool maka heat input yang di hasilkan akan semakin besar. Semakin besar heat input akan menyebabkan butir semakin berkembang sehingga menyebabkan ukuran butir semakin besar, semakin besar ukuran butir maka jumlah perluasan butir akan semakin berkurang sehingga menyebabkan tingkat kekerasan menurun. Penelitian yang dilakukan oleh Sudrajat (2012), tentang sifat mekanik hasil pengelasan aluminium 1100 menggunakan metode *friction stir welding* dengan ketebalan 4 mm menyatakan bahwa cacat wormholes inilah hal utama yang menyebabkan kekuatan tarik menjadi berkurang dan adanya celah karena kurangnya penetrasi yang menimbulkan konsentrasi tegangan pada hasil pengelasan. Pada pengujian kekerasan menyatakan bahwa logam las lebih lunak daripada logam induk, sedangkan daerah TMAZ mempunyai kekerasan yang paling rendah.

Berdasarkan uraian diatas putaran tool dan desain tool merupakan parameter yang sangat penting dalam pengelasan FSW. Hal ini dikarenakan putaran dan desain tool sangat berpengaruh terhadap panas yang dapat mempengaruhi kekuatan tarik dan kekerasan pada

aluminium. Penelitian FSW dengan menggunakan variasi putaran tool dan desain tool sudah banyak dilakukan, tetapi pada pengelasan FSW banyak ilmu yang bisa digali untuk menjelaskan pengelasan FSW baik dari sisi metode pengelasan, panjang pin, bahan yang digunakan, kecepatan putar, kecepatan pemakanan, dan sebagainya. Untuk itulah penelitian variasi panjang pin terhadap kekuatan tarik dan kekerasan pada aluminium seri 1XXX dengan ketebalan 5 mm menggunakan metode pengelasan *Friction Stir Welding* ini dilakukan. Hal ini bertujuan guna memberikan informasi baru tentang proses FSW dengan variasi panjang pin, baik itu dari kekerasan, kekuatan Tarik, struktur mikro, dan struktur makro.

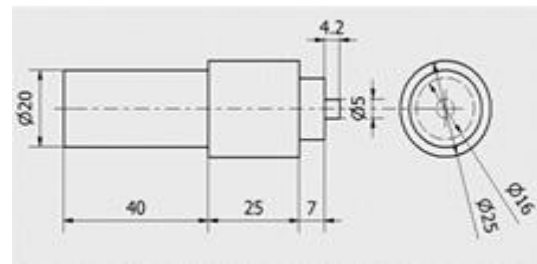
2. Metode Penelitian

2.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 2.1 Diagram Alir Penelitian FSW Pada Plat Aluminium

2.2 Prosedur Penelitian



Gambar 2.2 Design Tool Pengelasan



Gambar 2.3 Tool Yang Digunakan

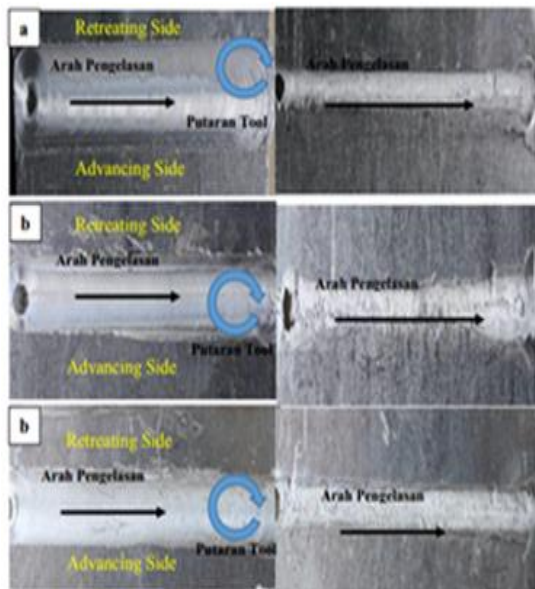
Tool ini dibuat menggunakan baja pejal proses pembuatan *tool* dimulai dari pengurangan diameter baja dari 25 mm ke 20 mm, pembuatan pin dengan cara memperkecil diameter baja dari 20 mm menjadi 4.2 mm, 4.5 mm, dan 4.8 mm, kemudian membuat shoulder diameter 16 mm dan panjang 7 mm, dengan panjang keseluruhan *tool* 76,2 mm.

Proses pengelasan menggunakan metode FSW menggunakan parameter-parameter yang telah ditentukan. Menggunakan aluminium seri 1xxx ketebalan 5 mm, kemudian mempersiapkan mesin milling untuk proses pengelasan dan mempersiapkan benda kerja serta mengatur kecepatan putar *tool* 950 rpm dengan feed rate 20 mm/menit. *Tool* berputar dan digerakkan menyamping maka terjadi proses penyatuan material aluminium seri 1xxx. Ketika *tool* berhenti berputar dan diangkat spesimen dipindahkan dari mesin milling proses selanjutnya diulang dengan kecepatan putar *tool* 950 rpm konstan lalu mengganti *tool* dengan variasi panjang pin 4,2 mm, 4,5 mm, dan 4,8 mm dengan feed rate 20 mm/menit.

3. Hasil Dan Pembahasan

3.1 Hasil Pengelasan

Pada Gambar 2.4 (a) hasil pengelasan dengan metode FSW menggunakan panjang pin 4,2 mm menghasilkan permukaan yang kasar dan tidak halus hal itu dikarenakan *heat input* yang dihasilkan tidak maksimal dan pembenaman pin yang terlalu dangkal. Pada Gambar 2.4 (b) dan (c) menghasilkan permukaan lasan yang lebih halus dan merata.

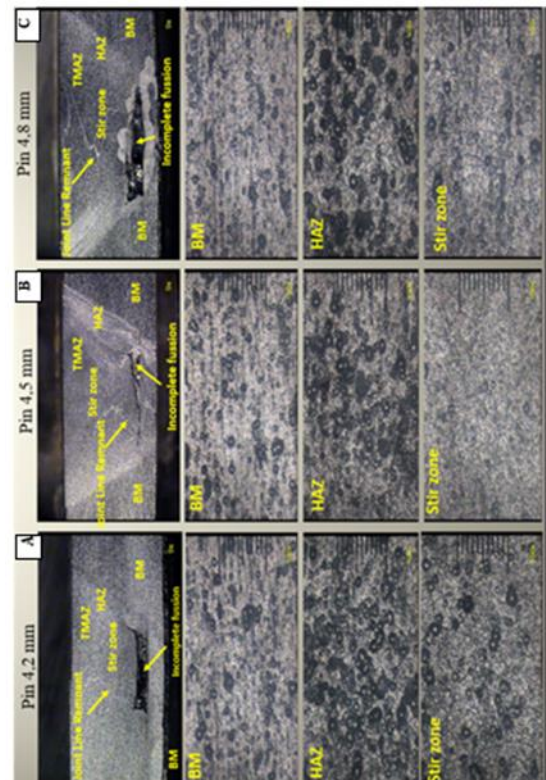


Gambar 3.1 hasil pengelasan FSW dengan variasi panjang pin a. 4.2 mm, b. 4.5 mm. dan c. 4.8 mm (kiri tampak atas dan kanan tampak bagian bawah)

3.2 Hasil Foto Makro dan Mikro

Pengamatan makro dilakukan guna mengetahui dan membedakan hasil lasan baik dari segi bentuk maupun dari sifat mekaniknya yang terdiri dari logam induk, HAZ, TMAZ, dan *stir zone* pada hasil pengelasan FSW. Hal ini dikarenakan *heat input* dari setiap pin tidak sama menyebabkan pelunakan pada material tidak terjadi sempurna. Pada pengelasan FSW pelunakan sangatlah penting karena jika material tidak lunak maka pin yang berfungsi sebagai pengaduk dan penyambung material tidak bekerja dengan sempurna. Setelah diamati pada hasil foto struktur makro dengan pembesaran 9x hasil pengelasan *friction stir welding* terdapat cacat *incomplete fusion* pada setiap variasi pengelasan. Terjadi cacat *incomplete*

fusion terbesar pada pin 4,2 mm dan pin 4,8 mm, menurut Prasetyo (2015), cacat *incomplete fusion* adalah cacat yang terjadi akibat material las tidak menyatu dengan sempurna sehingga terjadi celah pada pusat sambungan las. Cacat *incomplete fusion* disebabkan karena input yang dilakukan pada saat proses pengelasan kurang besar, sehingga material las tidak menyatu dengan sempurna, selain itu *feed rate* yang terlalu tinggi juga dapat mengakibatkan cacat karena jika *feed rate* terlalu tinggi maka waktu proses pengelasan semakin cepat, sehingga memungkinkan material las tidak menyatu dengan baik. Selain itu semua hasil las juga terdapat *joint line remnant* yang terlihat seperti garis lengkung *joint line remnant* terbentuk karena adanya oksida yang terjebak pada saat proses pengelasan (Threadgill, 2009).



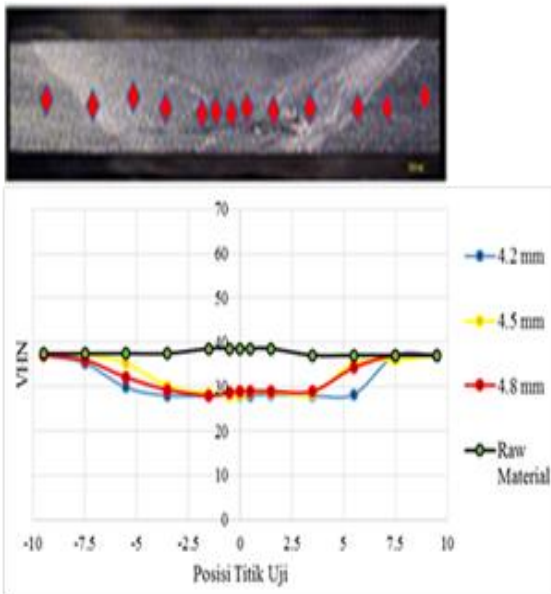
Gambar 3.2 Struktur makro sambungan las FSW dengan variasi panjang pin (A) 4,2 mm, (B) 4,5 mm, dan (C) 4,8 mm

Pengujian foto mikro ini dilakukan untuk mengetahui perubahan struktur mikro yang terjadi akibat dari proses pengelasan FSW yang terdapat didaerah *stir zone*, HAZ, dan *base metal*. Ketiga daerah tersebut mendapat perlakuan yang berbeda pada saat proses pengelasan berlangsung, dengan

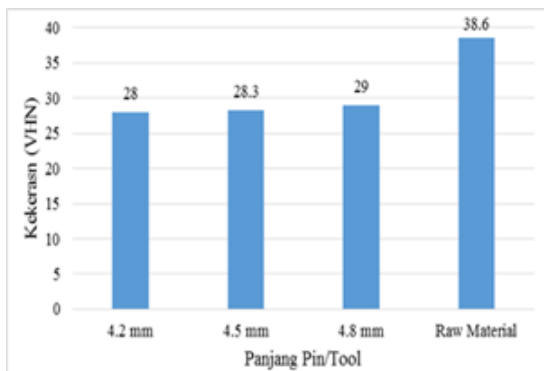
perlakuan yang berbeda maka hasilnya pun berbeda seperti pada Gambar 4.3. Pada Gambar 4.3 *heat input* akibat gesekan pin dengan spesimen pada proses pengelasan mudah menyebar, butiran hitam yang terdapat pada foto mikro memiliki perbedaan yang sangat signifikan dan adanya rekristalisasi yang disebabkan oleh proses pengelasan. Adanya rekristalisasi ini menjadi salah satu penyebab menurunnya nilai kekerasan.

3.1 Uji Kekerasan

Pada pengujian kekerasan kali ini dilakukan pada setiap spesimen hasil pengelasan menggunakan metode *friction stir welding* dengan variasi panjang pin dengan pengujian kekerasan *mikrovickers*. Pada Gambar 2.6 dan 2.7 menunjukkan grafik perbandingan kekerasan pada masing-masing variasi pengelasan



Gambar 3.3 Grafik Distribusi Kekerasan Dari Pusat



Gambar 3.4 Grafik Pengaruh Panjang Pin Terhadap Kekerasan Pada Daerah Sambungan Las (Titik 0)

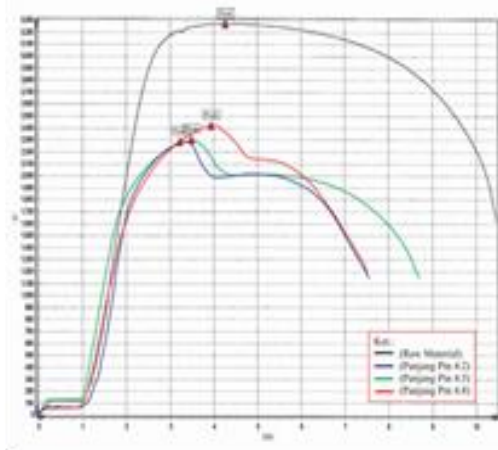
Dari Gambar 3.3 dan Gambar 3.4 diketahui bahwa nilai kekerasan tertinggi pada pin 4,8 mm. Hal ini dikarenakan heat input yang dihasilkan pada pin 4,8 mm cukup maksimal, pada hasil kekerasan setiap variasi pin terjadi kekerasan yang homogen, meskipun nilai kekerasan dibawah nilai raw materialnya. Jika dilihat dari foto stuktur mikro hal ini disebabkan karena terdapat butiran hitam yang membesar dan melebar pada masing-masing variasi pin dan pada pengelasan FSW tidak dimasukkannya logam baru (*electrode*) pada saat pengelasan. Kekurangan pada pengelasan FSW ini yaitu terjadinya pelunakan pada daerah las akibat panas yang timbul dan penurunan nilai kekerasan pada daerah las, selain karena karakteristik dari paduan itu sendiri juga disebabkan karena proses pengerasan yang tidak bisa terjadi ketika proses pengelasan berlangsung. Pada pengelasan FSW penyambungan logam dilakukan dengan gesekan dan adukan tanpa adanya logam pengisi diantara material.

Table 2.9 Tabel Perbandingan Nilai Kekerasan Sekarang Dengan Penelitian Terdahulu

Penelitian Terdahulu (Romadhoni,2016)		Penelitian Sekarang	
Bahan Aluminium 1xxx		Bahan Aluminium 1xxx	
Putaran Tool (rpm)	Kekerasan pada daerah sambungan las (VHN)	Panjang Pin (mm)	Kekerasan pada daerah sambungan las (VHN)
Raw Material	40.1	Raw Material	38.6
980	59.1	4,2	28
2300	33.4	4,5	28.3
2700	44.9	4,8	29

3.4 Uji Tarik

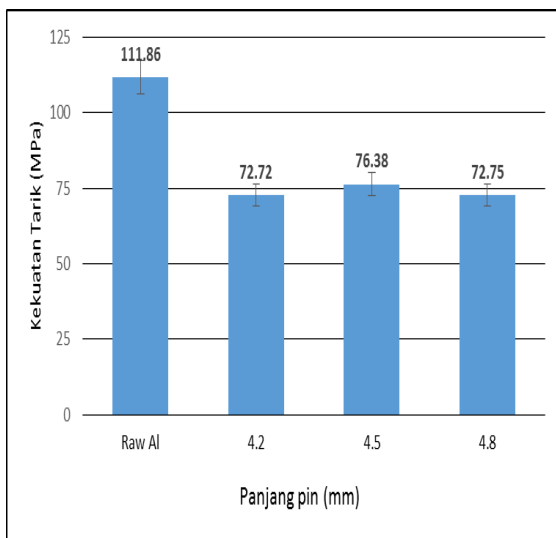
Pengujian tarik dilakukan pada hasil pengelasan dua sisi aluminium 1100. Dimensi spesimen uji tarik untuk material pengelasan menggunakan standar ASTM E8. Hasil yang diperoleh dari hasil pengujian tarik berupa nilai tegangan dan regangan dari hasil pengelasan yang akan dibandingkan dengan nilai tegangan dan regangan *raw material*.



Gambar 3.5 Grafik Uji Tarik hasil FSW dua sisi Aluminium 1xxx

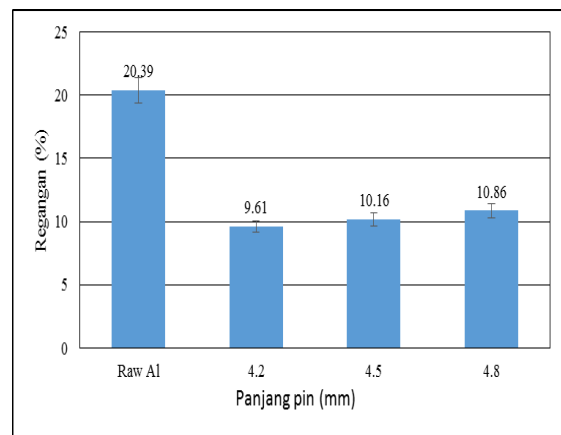
Gambar 3.5 menunjukkan bahwa antara logam induk aluminium seri 1xxx dengan logam yang sudah dilas memiliki perbedaan tegangan tarik yang sangat signifikan yaitu 68.29% dari kekuatan raw materialnya. Hal ini dapat terjadi pada daerah las karena mengalami perubahan struktur mikro akibat dari penempaan pada saat proses pengelasan.

Gambar 3.6 Grafik Variasi Panjang Pin Terhadap Kekuatan Tarik



Dari Gambar 3.6 menunjukkan bahwa kekuatan tarik dari sambungan FSW dengan variasi panjang pin 4,2 mm, 4,5 mm, dan 4,8 mm hasilnya yaitu 72,72 MPa, 76,38 MPa, dan 72,75 MPa. Kekuatan tarik tertinggi didapat pada pin 4,5 mm sebesar 76,38 MPa. Diduga hal ini terjadi karena proses pengadukan dan penempaan yang tepat pada pin 4,5 mm, di mana kedalaman pin tidak terlalu dangkal dan tidak terlalu dalam sehingga Heat Input

yang dihasilkan lebih stabil. Akan tetapi dari semua proses pengelasan mengalami penurunan kekuatan tarik dari raw materialnya, hal ini disebabkan karena terdapat cacat *incomplete fusion* pada pusat las. Cacat *incomplete fusion* bisa disebabkan karena pembenaman pin yang terlalu dangkal atau terlalu dalam dan *heat input* pada proses pengelasan yang dihasilkan tidak maksimal, selain itu *feed rate* yang terlalu tinggi juga dapat menyebabkan cacat *incomplete fusion*, karena semakin tinggi *feed rate* maka proses pengelasan semakin cepat memungkinkan material las tidak menyatu dengan baik.

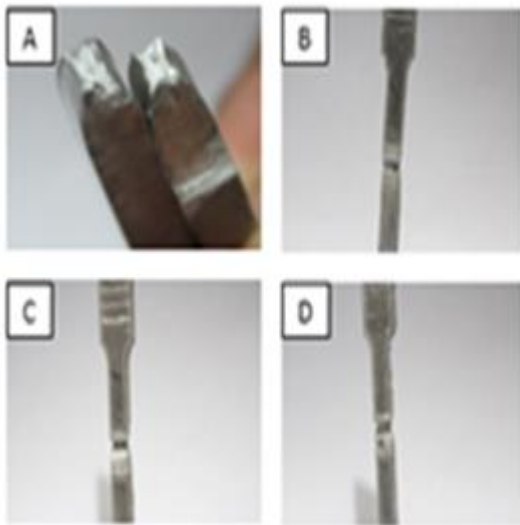


Gambar 3.7 Grafik variasi panjang pin terhadap regangan

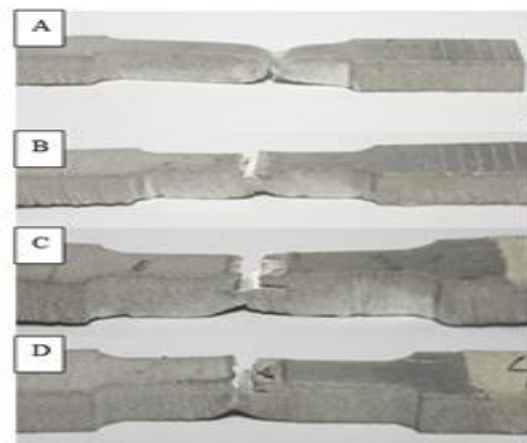
Pada Gambar 3.7 menunjukkan hasil hasil pengujian tarik untuk nilai regangan dengan variasi panjang pin 4,2 mm sebesar 9.61%, pin 4,5 mm sebesar 10.16%, pada pin 4,8 mm sebesar 10.86% dan pada raw material sebesar 20.39%. Menurut Sudrajat (2012) kekuatan tarik berbanding terbalik dengan regangannya. Semakin besar kekuatan tariknya maka regangannya semakin kecil, jika semakin kecil kekuatan tariknya regangannya akan semakin besar. Akan tetapi pada pengujian tarik di atas menunjukkan nilai kekuatan tarik dan regangan terendah pada pin 4,2 mm. Kemungkinan penyebabnya pembenaman pin yang terlalu dangkal menghasilkan *heat input* yang kurang maksimal sehingga menyebabkan cacat *incomplete fusion* yang menyebabkan kekuatan tarik dan regangan menurun. Perbedaan nilai kekuatan tarik dan regangan terjadi karena pada material hasil pengelasan memiliki cacat, baik itu cacat bagian luar maupun bagian dalam.

3.5 Fraktografi

Pada Gambar 3.8 Menunjukkan hasil pengelasan FSW dimana pada setiap variasi mengalami patahan ulet. Hal ini disebabkan karena hasil las yang menyatu dengan baik walaupun masih terdapat cacat *incomplete fusion* pada daerah lasan. Pada Gambar 3.4 (a) pada raw material menunjukkan patahan yang ulet dimana sebelum terjadi patahan terjadi perpanjangan terlebih dahulu.



Gambar 3.8 penampang patahan spesimen uji tarik dengan variasi panjang pin (a) raw material, (b) 4,2 mm, (c) 4,5 mm, (d) 4,8 m



Gambar 3.9 patahan uji tarik tampak samping dengan variasi panjang pin (a) raw material, (b) 4,2 mm, (c) 4,5 mm, dan (d) 4,8 mm.

Pada patahan tampak samping sambungan las dengan variasi panjang pin yang ditunjukkan pada Gambar 3.9 pada setiap variasi terdapat cacat

incomplete fusion yang menyebabkan tidak menyatunya hasil lasan dengan sempurna. Hal ini juga yang menyebabkan kekuatan tarik menurun dan pada Gambar 3.9 (a) bentuk patahan pada raw material tidak berada tepat pada tengah spesimen hal ini menandakan bahwa spesimen yang ulet dimana sebelum terjadi patahan mengalami penyusutan.

4. Kesimpulan

Dari hasil penelitian tentang variasi panjang pin terhadap sambungan las aluminium seri 1xxx ketebalan 5 mm menggunakan metode *friction stir welding* dapat disimpulkan bahwa :

1. Dari hasil pengamatan makro diketahui terdapat cacat *incomplete fusion* terbesar pada panjang pin 4,2 mm dan pin 4,8 mm. dan pengamatan mikro diketahui bahwa bentuk butiran hitam terlihat mengelompok dan membesar, sehingga menyebabkan spesimen lebih lunak.
2. Hasil uji kekerasan menunjukkan bahwa nilai kekerasan lebih rendah dari raw material. Dan hasil uji kekuatan tarik juga menunjukkan bahwa nilai kekuatan tarik lebih rendah dari raw material, karena masih terdapat cacat *insomplete fusion*. tetapi dari nilai kekuatan tarik terdapat kekuatan tarik tertinggi pada panjang pin 4,5 mm sebesar 76.38 MPa.

5. Daftar Pustaka

- ASTM. 2010. "Standart Test Methods For Tension Testing Of Metallic Material, ASTM E8/E8M-09".
- Biswas, P. dan Mandal, N. R. (2012). "Effect Of Tool Geometries On Thermal History of FSW of AA 1100". Supplement to the welding journal, july 2011.
- Iqbal, 2014. "Pengaruh Putaran Dan Kecepatan Tool Terhadap Sifat Mekanik Pada Pengelasan Friction Stir Welding Aluminium 5052". Jurnal FEMA, Vol 2, Nomor 1, Januari 2014.
- Merdiyanto. 2016. "Pengaruh Putaran Tool Terhadap Sifat-Sifat Mekanis Sambungan

- Las Pada Aluminium 5051 Dengan Metode *Friction Stir Welding*". Yogyakarta, Skripsi Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.
- Mishra, R. & Ma, Z., 2005. *Friction Stir Welding and Processing*. Materials Science and Engineering R 50, pp. 2-78.
- Nicholas, E., 2003, "*Friction Welding Of Aero Engine Components*" TWI, Abington hall, Abington, Cambridge, UK.
- Nurdyansyah. 2012. "Pengaruh Rpm Terhadap Kualitas Sambungan Dan Metalurgi Las Pada Join Line Untuk Aluminium Seri 5083 Dengan Metode *Friction Stir Welding*". Jurnal Teknik ITS Vol. 1 (September 2012) p. G55-G58.
- Pamungkas, A. S. F., 2012. Analisis Sifat Mekanik Hasil Pengelasan Aluminium AA 1100 Dengan Metode *Friction Stir Welding* (FSW).. Jurnal ROTOR, 05(1), pp. 50-61.
- Prasetyana. 2016. "Pengaruh Kedalaman Pin (*Depth Plunge*) Terhadap Kekuatan Sambungan Las Pada Pengelasan Adukan Gesek Sisi Ganda (*Double Sided Friction Stir Welding*) Aluminium Seri 5083". Surakarta, Skripsi Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Surakarta.
- Prasetyo. 2015. "Pengaruh Kecepatan Putar *Tool* Terhadap Sifat Mekanik Sambungan Aluminium 1xxx Dengan Metode *Friction Stir Welding*". Yogyakarta, Skripsi Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.
- Rajakumar. 2012. "Correlation Between Weld Nugget Grain Size , Weld Nugget Hardness And Tensile Strength Of *Friction Stir Welded* Commercial Grade Aluminium Alloy Joints". Materials and Design 34:242-251.
- Romadhoni. 2016. "Pengaruh Kecepatan Putar *Tool* Terhadap Kekuatan Mekanik Sambungan Las Aluminium Seri 1xxx Ketebalan 2mm Dengan Metode *Friction Stir Welding*". Yogyakarta, Skripsi Jurusan Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.
- Setyawan F.W. 2014. "Analisis Sifat Mekanik Dan Struktur Mikro Aluminium Paduan Al-Mg-Si Hasil Pengelasan *Friction Stir Welding* Dengan Variasi Kecepatan Putar". Jurnal ROTOR, Vol 7 No 2.
- Sudrajat. 2012 "Analisis Sifat Mekanik Hasil Pengelasan Aluminium AA 1100 Dengan Metode *Friction Stir Welding*". Jurnal ROTOR, Vol. 5 No. 1.
- Sukmana, I. & Sustiono, A., 2016. Pengaruh Kecepatan Putar Indentor Las Gesek Puntir (*Friction Stir Welding*) Terhadap Kualitas Hasil Pengelasan Alumunium 1100-H18. Jurnal Mechanical, 7(1), pp. 15-19.
- Thomas, W. et al., 1991. *Friction-stir butt welding*, GB Patent No. 9125978.8, International patent application No. PCT/GB92/02203.
- Threadgill, A., 2009. "*Friction Stir Welding Of Aluminium Alloys*".
- William, D., Callister, Jr, 1985. "Materials science and engineering, Callister", William D., 1940, Singapore.
- Wysocki, J., 2007, "*Countinous Drive Friction Welding Of Cast AlSi/SiC Metal Matrix Composites*" Institute Of Basic Technical Sciences, Maritime Academy Szezecin, Poland.
- Wijayanto dan Anelis. 2010. "Pengaruh *Feed Rate* Terhadap Sifat Mekanik Pada Pengelasan *Friction Stir Welding* Aluminium 6110". Jurnal Kompetensi Teknik Vol 2, No 1.