

PENGARUH VARIASI PUTARAN TOOL TERHADAP SAMBUNGAN LAS ALUMINIUM 1xxx KETEBALAN 5 MM DENGAN METODE PENGELOMAN DUA SISI *FRICTION STIR WELDING*

Bembi Aji Setiawan¹, 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 : bembi.ajisetiawan@gmail.com

INTISARI

Pengelasan *Friction Stir Welding* (FSW) merupakan salah satu metode pengelasan *Solid State Welding* (SSW). Putaran *tool* dan *desain tool* merupakan parameter yang sangat penting dalam pengelasan FSW. Karakteristik sifat fisik dan mekanik pada sisi *advancing* dan sisi *retreating* pada hasil pengelasan FSW menunjukkan adanya perbedaan. Penelitian ini dilakukan untuk menyeimbangkan sifat antara sisi *advancing* dan *retreating* dengan melakukan pengelasan dua sisi.

Material plat aluminium 1xxx dengan ketebalan 5 mm dipotong dengan ukuran 100 mm x 60 mm. Proses pengelasan dua sisi FSW dilakukan pada sisi beda menggunakan variasi kecepatan putar *tool* 950, 1500, dan 2300 rpm dengan *feed rate* 20 mm/menit dibuat konstan. Selanjutnya hasil pengelasan dilakukan pengujian tarik menggunakan *Ultimate Tensile Machine*, pengujian kekerasan dengan mikro *vickers*, pengamatan struktur makro dan mikro dengan mikroskop optik.

Dari hasil penelitian diketahui bahwa hasil foto makro menunjukkan cacat *wormholes* pada hasil pengelasan di semua variasi kecepatan putar *tool*. Sedangkan pada pengamatan mikro bentuk butir pada daerah *stir zone* memiliki butiran kristal paling kecil dan rapat dibandingkan dengan daerah yang lain. Hasil uji kekerasan menunjukkan kecepatan putar *tool* 950 rpm memiliki kekerasan yang paling mendekati *raw materialnya* sebesar 34 VHN, sedangkan nilai kekerasan yang paling rendah terdapat pada spesimen dengan kecepatan putar *tool* 1500 rpm sebesar 28.5 VHN. Hasil pengujian tarik didapatkan rata-rata *ultimate strength* untuk pengelasan FSW dua sisi dengan menggunakan kecepatan putar *tool* 950 rpm adalah 85.24 MPa atau 76.21 % dari *raw materialnya* yang memiliki nilai kuat tarik sebesar 111.86 MPa, kecepatan putar *tool* 1500 rpm adalah 37.55 MPa dan 2300 rpm adalah 52 MPa. Kecepatan putar rendah pada pengelasan FSW menghasilkan heat input yang tidak terlalu tinggi sehingga bentuk dan jumlah *grain* perluasan tidak berbeda jauh dengan *raw materialnya*. Sehingga hal tersebut menghasilkan kekuatan tarik yang tinggi mendekati *raw materialnya*, berbanding lurus dengan nilai kekerasan yang tinggi juga.

Kata Kunci: *Friction Stir Welding, Dua Sisi, Uji Tarik, Kekerasan.*

ABSTRACT

The welding of Friction Stir Welding (FSW) is one of the welding method of Solid State Welding (SSW). The rotation and design tool is parameter that very important in welding of FSW. The characteristics of physical and mechanical properties in advancing and retreating side in the welding result of FSW shows differences. This research conducted for balancing the properties between advancing and retreating side with two side of welding.

The material of aluminum plate 1xxx thickness 5mm cuts by the size of 100mm x 60mm. The welding process of FSW of two side conducted in different side using variation rotate speed tools 950, 1500, and 2300 rpm by feed rate 20mm/minute constantly. Then, the welding result tested by tensile testing using Ultimate Tensile Machine, hardness test with a micro Vickers, observation of the macro and micro structure by optical microscope.

The result of this study showed that wormholes defects in the welding result in all varian of rotate speed tool were observed. Whereas, on the observation of micro grain shape on the stir zone has a smallest and densest granular crystal compared with other areas. The hardness testing result showing spesimens being welded with rotate speed tool of 950 rpm has hardness that closest to raw material about 34 VHN and the lowest hardness testing is in the specimen of rotate speed tool of 1500 rpm about 28.5 VHN. The result of tensile testing has average of ultimate strength for two side of FSW by using rotate speed tool 950 rpm is 85.24 MPa or 76.21 % from raw material that has value of tensile strength 111.86 MPa, rotate speed tool of 1500 rpm is 37.55 MPa and 2300 rpm about 52 MPa. The low rotate speed in the welding of FSW produces heat input that not too high, so the form and amount of grain the expansion is not much different with the raw material. Then, it results high tensile strength approach the raw material directly proportional to the high hardness value also.

Key words: *Friction Stir Welding, two side, tensile testing, hardness.*

1. Pendahuluan

Aluminium alloy 1100 merupakan paduan aluminium yang memiliki kekuatan tinggi, tahan terhadap karat, konduktor listrik yang cukup baik dan lebih ringan daripada besi atau baja. Aluminium jenis ini mempunyai panas jenis dan daya hantar yang tinggi, mudah teroksidasi dan membentuk oksida aluminium Al_2O_3 dengan titik cair yang tinggi sehingga mengakibatkan peleburan antara logam dasar dan logam las menjadi terhalang. Aluminium alloy 1100 mengalami proses pembekuan yang cepat sehingga akan terbentuk rongga halus bekas kantong hydrogen (Pamungkas, dkk, 2012). Maka dari itu, aluminium tipe AA 1100 sering digunakan untuk *heat exchangers*, *pressure vessels*, pipa, dan lain-lain pada dunia industri.

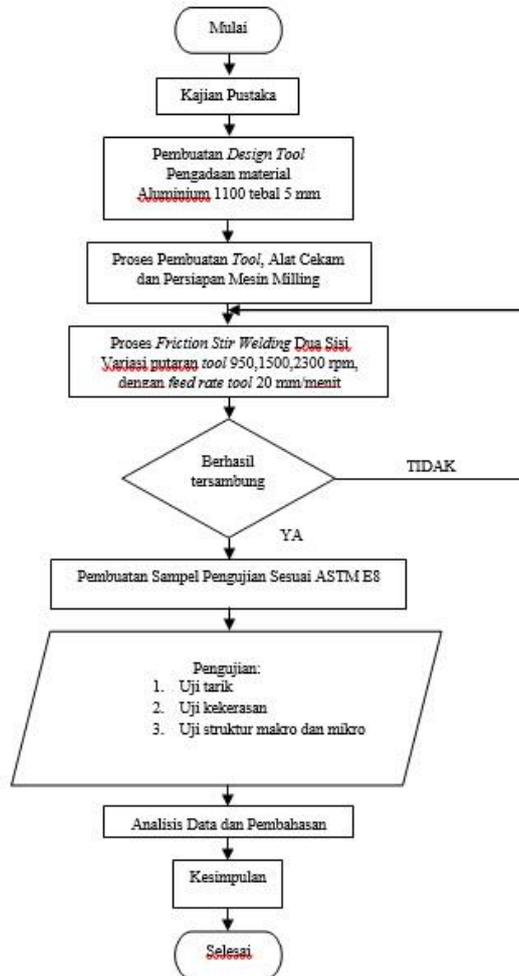
Saat ini teknik penyambungan aluminium masih banyak menggunakan metode *rivet*, las TIG dan *Brazing*, metode penyambungan ini sangat terbatas jika dilihat dari beberapa aspek, misal hasil sambungan menggunakan las TIG yang masih menggunakan *filler* atau bahan tambah dalam proses pengelasannya, selain itu asap dan cahaya dari las TIG juga dapat mengganggu kesehatan. Salah satu alternative untuk pengelasan aluminium adalah dengan menggunakan metode *friction stir welding* (FSW). FSW sendiri ditemukan oleh Wayne Thomas di *The Welding Institute* (TWI) pada tahun 1991 dan mendapat aplikasi paten pertama di United Kingdom pada bulan Desember 1991. Sebagai jenis proses sambungan las yang relatif baru, pengembangan FSW saat ini masih sangat luas cakupannya. FSW adalah proses pengelasan *solid-state* di mana sebuah *tool* yang berputar ditekan sepanjang garis sambungan antara dua benda kerja. *Tool* yang berputar ditekan pada garis sambungan tersebut sebagai sumber panas yang digunakan untuk proses pengelasan. Dalam pengelasan FSW tidak ada logam pengisi. Penelitian teknologi tentang pengelasan FSW masih terus dikembangkan baik secara sifat-sifat material, kedalaman pembenaman (*depth plunge*), bentuk dari *tool pin*, kecepatan putar *tool*, dan *feed rate* yang digunakan (Prasetyana, 2016). Metode pengelasan FSW juga ramah terhadap lingkungan, karena tidak ada asap, percikan dan tidak ada cahaya seperti pada alas TIG.

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 sifat mekanik dari hasil lasan FSW. Kualitas hasil lasan FSW sangat tergantung pada parameter tersebut. Akan tetapi hasil pengelasan tersebut menunjukkan adanya perbedaan karakteristik sifat fisik dan mekanik pada sisi *advancing* dan sisi *retreating*. Hal ini dapat dilihat dari adanya perbedaan ukuran butir pada sisi *advancing* yang lebih besar dibandingkan dengan ukuran butir pada sisi *retreating*, posisi patah uji tarik berada di sisi *advancing*, karakter kekerasan selalu lebih rendah bagian *advancing*. Hal ini menunjukkan adanya ketidaksimetrian sifat fisik dan mekanik sambungan las FSW. Mishra dan Ma (2005) dalam penelitiannya membuktikan bahwa adanya perbedaan ukuran butir pada sisi *advancing*, *retreating*, bagian permukaan serta akar las ini disebabkan adanya perbedaan suhu pengelasan serta adanya perbedaan dissipasi panas. Biasanya penurunan kekuatan mekanik sambungan terjadi pada daerah HAZ pada sisi *advancing* yang disebabkan tingginya suhu pengelasan. Usaha untuk menyeimbangkan kekuatan mekanik antara sisi *advancing* dan *retreating* dapat dilakukan dengan berbagai cara, salah satunya adalah dengan melakukan pengelasan dua sisi. Selain itu metode pengelasan dua sisi dapat digunakan untuk mengurangi perbedaan suhu pada kedua bagian. Sehingga suhu diantara keduanya dapat disetarakan dan menjadikan kekuatan pada sisi *advancing* yang awalnya lebih rendah pun menjadi relatif sama.

Berdasarkan uraian tersebut, penulis melakukan penelitian tentang pengaruh variasi putaran *tool* terhadap sambungan las aluminium alloy 1100 ketebalan 5 mm dengan metode pengelasan dua sisi FSW. Hal ini bertujuan untuk memberikan informasi baru tentang karakteristik FSW aluminium menggunakan metode pengelasan dua sisi, baik itu kekuatan tarik, tingkat kekerasan, struktur mikro dan makro, dan bentuk patahan pengelasan.

2. Metode Penelitian

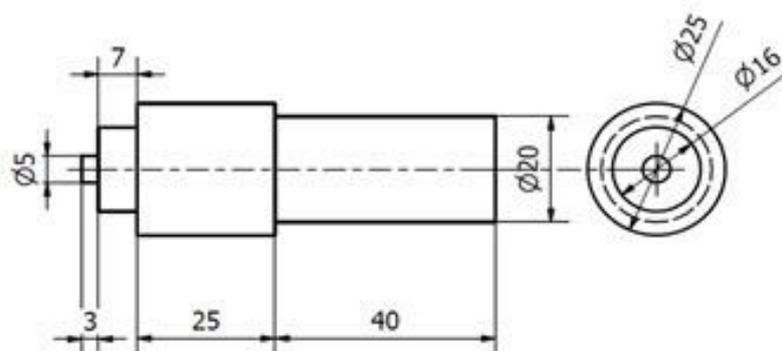
2.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 2.1 Diagram Alir Penelitian FSW Pada Plat Aluminium

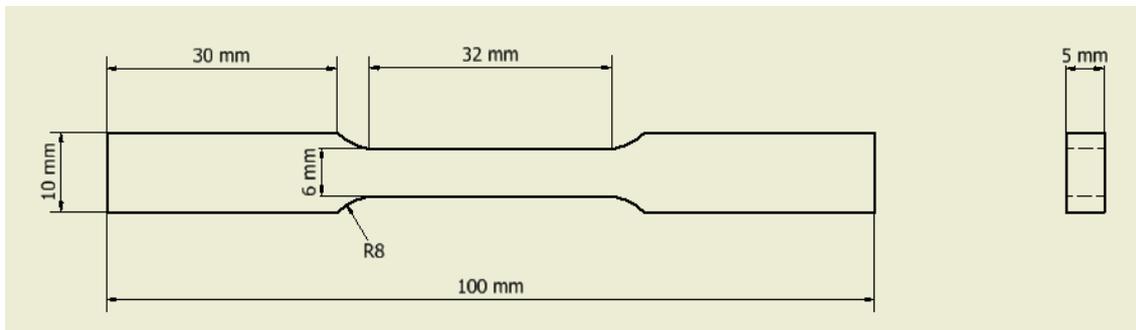
2.2 Prosedur Penelitian

Pada penelitian FSW dua sisi ini digunakan mesin milling yang ada di Laboratorium Proses Produksi Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Yogyakarta. Variasi yang digunakan adalah kecepatan putar *tool* 950, 1500, dan 2300 rpm. *Tool* yang digunakan adalah baja pejal dengan bentuk seperti terlihat pada gambar 2.2



Gambar 2.2 Design Tool Pengelasan

Pengamatan struktur makro dan mikro dilakukan untuk melihat zona-zona yang terbentuk dan batasan zona akibat pengelasan FSW dan karakteristik metalurgi dengan menggunakan mikroskop optik. Zona tersebut ialah logam induk, HAZ, TMAZ, dan *Weld Nugget*. Pengamatan juga dilakukan terhadap sifat mekanik hasil lasan seperti kekerasan dan kekuatan tarik. Pengujian kekerasan dilakukan dengan metode *Micro Vicker* di zona lasan dengan 13 titik dan bentuk spesimen uji tarik yang digunakan mengikuti standart ASTM E8, seperti pada gambar 2.3



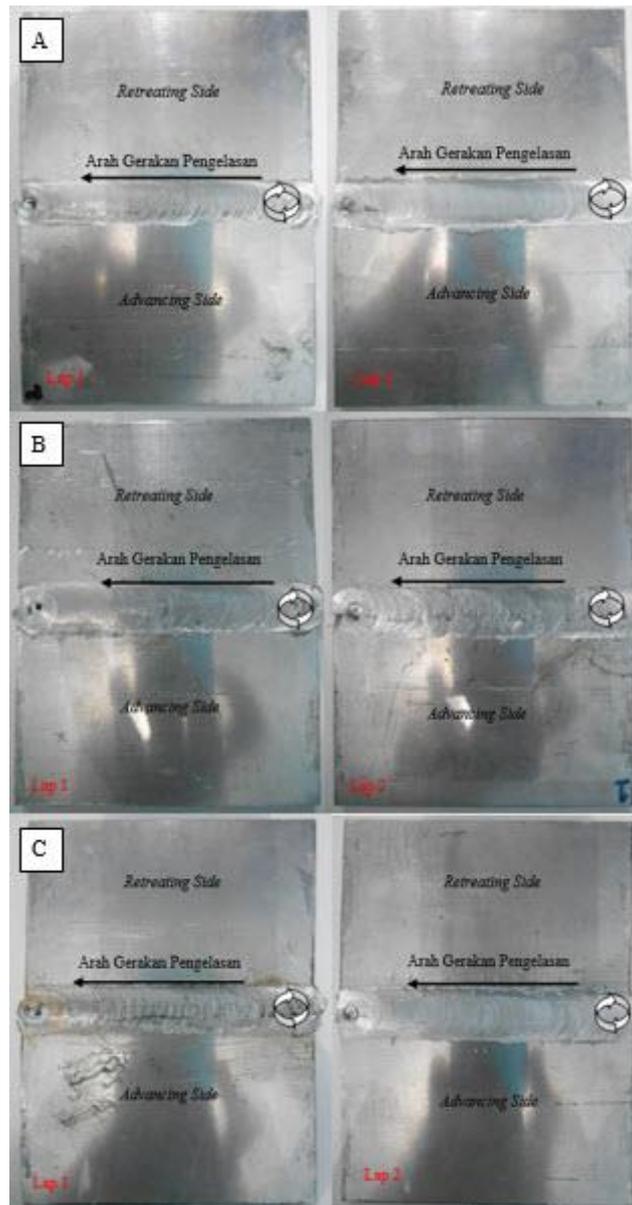
Gambar 2.3 Skema uji tarik menurut ASTM E8

Proses pengelasan pada penelitian ini dilakukan dengan metode FSW menggunakan parameter-parameter yang telah ditentukan. Pengelasan FSW dilakukan pada sisi beda, yaitu bila pada sisi permukaan las mengalami perlakuan sebagai *advancing* maka pada sisi akar las mengalami perlakuan sebagai *retreating*. Bahan yang digunakan adalah aluminium dengan ketebalan 5 mm. Menggunakan mesin *milling* sebagai mesin pengelasan, aluminium sebagai benda kerja dan alat pencekam. Dalam prosesnya ketika mesin dioperasikan pin akan berputar dan masuk kedalam material untuk mengaduk material yang panas karena gesekan. Kemudian bagian *shoulder* menekan material yang teraduk pin. Kecepatan putar *tool* yang digunakan adalah 950 rpm, 1500 rpm dan 2300 rpm dengan *feed rate* 20 mm/menit. Sehingga *tool* bergerak ke samping dan terjadi proses penyatuan material aluminium (*joining process*). Setelah pengelasan sepanjang plat selesai, *tool* dapat diangkat setelah itu mesin dapat dimatikan kemudian spesimen dipindahkan dari mesin *milling*. Proses tersebut diulang pada sisi sebaliknya.

3. Hasil Dan Pembahasan

3.1 Hasil Pengelasan

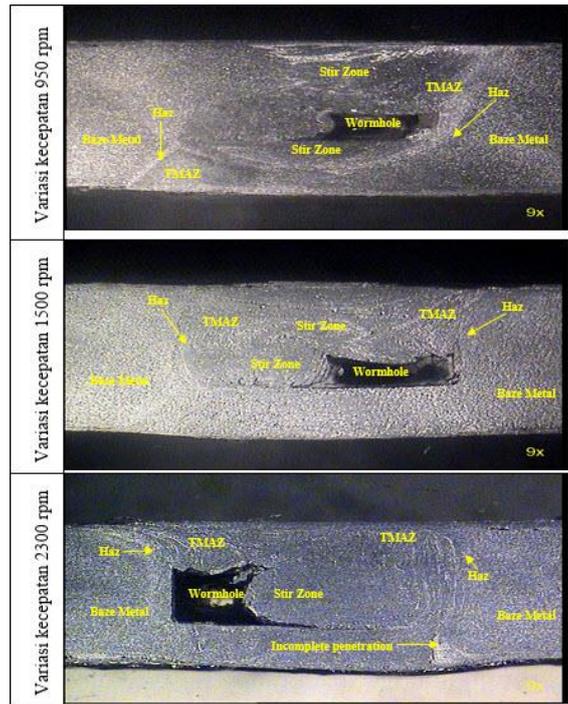
Hasil pengelasan pada masing-masing variasi kecepatan putar *tool* dapat dilihat perbedaan kehalusan permukaannya pada Gambar 3.1. Secara berurutan pada variasi kecepatan terendah hingga paling tinggi mendapatkan permukaan yang rata, namun masih terdapat cacat permukaan yakni pada sisi kedua variasi kecepatan 1500 rpm dan sisi pertama variasi kecepatan putar 2300 rpm, sedangkan pada variasi kecepatan 950 rpm mendapatkan permukaan yang paling halus. Pada pengelasan ini gerak translasi *tool* dimulai ketika temperature benda kerja telah mencapai suhu rekristalisasi yaitu diatas 80°C sehingga temperature yang terjadi ketika proses pengelasan berada pada kisaran suhu 88° - 210°C. Keseluruhan hasil pengelasan dapat menyatu dengan baik walaupun masih terdapat sedikit cacat jika dilihat dari luar. Pada saat proses pengelasan variasi kecepatan 1500 rpm benda kerja yang baru selesai mengalami proses pengelasan langsung dibalik dan dilakukan proses pengelasan kembali pada sisi sebaliknya, itulah yang menyebabkan permukaan pada sisi kedua mengalami cacat pada permukaan. Sedangkan cacat permukaan yang terdapat pada sisi pertama variasi kecepatan 2300 rpm diakibatkan karena putaran mesin yang tiba-tiba melambat dan *feed rate* yang susah dikendalikan.



Gambar 3.1 Hasil pengelasan FSW dua sisi variasi putaran *tool* (a) 950 rpm, (b) 1500 rpm dan (c) 2300 rpm

3.2 Hasil Foto Makro

Sebelum dilakukan proses foto makro dan mikro, specimen dilakukan proses etsa terlebih dahulu. Larutan etsa yang digunakan adalah sesuai dengan standar ASTM E407 yaitu *Standard Practice for Microetching Metals and Alloys*. Larutan etsa yang diaplikasikan untuk aluminium seri 1 memakai standar etsa no.6 yang terdiri dari 25 ml HNO₃ dan 75 ml Aquades. Waktu yang digunakan adalah 3-60 detik dan dipilih waktu yang tepat untuk menghindari specimen menjadi gosong dan berwarna hitam. Specimen yang terlalu lama dicelup dalam larutan etsa akan menjadi gosong, menjadikan batas butir dan daerah lasan tidak dapat dilihat.

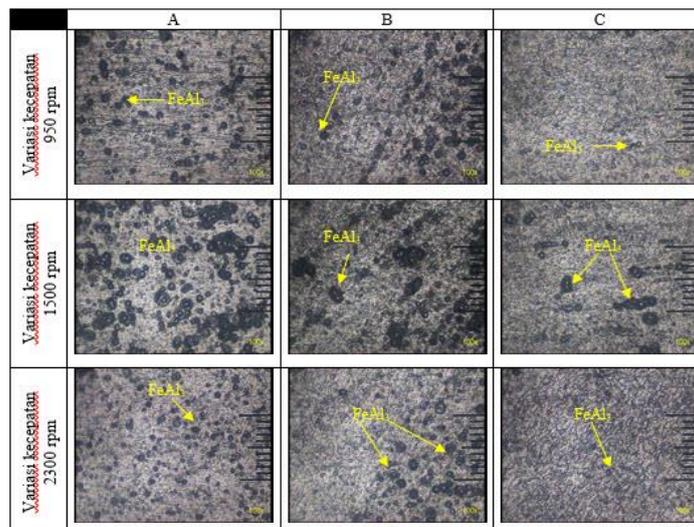


Gambar 3.2 Struktur makro sambungan las FSW dua sisi dengan variasi putaran *tool* (a) 950 rpm, (b) 1500 rpm dan (c) 2300 rpm

Gambar 3.2 adalah gambar hasil foto mikro daerah pengelasan masing-masing spesimen. Spesimen dipotong dengan dimensi panjang 25 mm dan tebal 5 mm. spesimen di foto dengan pembesaran 9x sehingga tampak perbedaan antara *stir zone*, HAZ, TMAZ, dan *base metal*. Cacat *wormhole* terjadi pada semua spesimen sepanjang *joint line*. Hal ini disebabkan karena benda kerja mengalami 2 kali proses pengelasan yang membuat bagian tengah spesimen mengalami 2 kali pengadukan juga, sehingga mempengaruhi hasil lasan.

3.3 Hasil Foto Mikro

Pengamatan struktur mikro dilakukan untuk mengetahui perubahan struktur mikro yang terjadi akibat adanya proses pengelasan dengan metode FSW dua sisi pada spesimen Aluminium 1100. Pengujian ini dilakukan dengan cara pengambilan foto dengan 100x pembesaran. Pemotretan diambil pada daerah *stir zone*, HAZ & TMAZ, kemudian *base metal*.



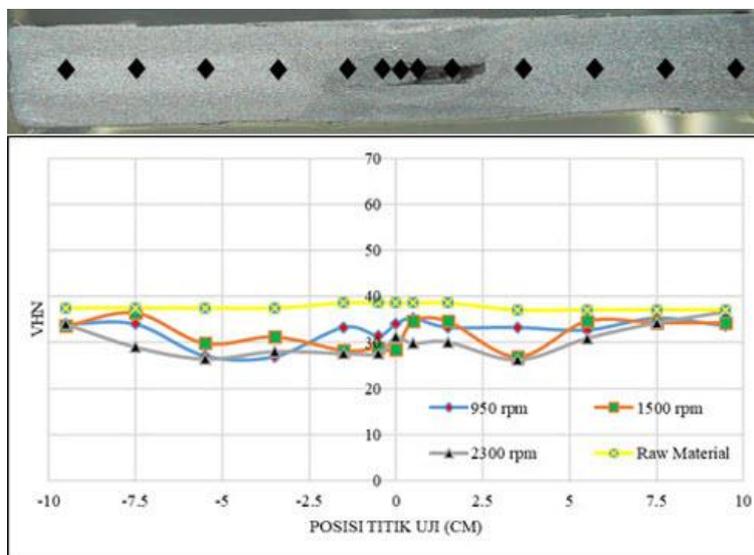
Gambar 3.3 Hasil Pengujian Struktur Mikro Aluminium 1100 (a) *base metal*, (b) HAZ dan TMAZ, (c) *stir zone*.

Gambar 3.3 adalah foto hasil pengujian mikro spesimen setelah dilakukan proses etsa. Pada gambar tersebut dapat dilihat bahwa daerah *stir zone* pada tiap-tiap spesimen terlihat bentuk partikel yang halus. Pada daerah ini partikel $FeAl_3$ tersebar merata yang disebabkan adanya proses puntiran pada saat proses pengelasan berlangsung. Bentuk butiran cenderung lebih mengecil dan rapat, akan tetapi terdapat garis-garis kecil yang tidak beraturan. Kotoran yang berada pada *joint line* adalah penyebab adanya garis-garis tersebut, yang tidak dapat hilang setelah melakukan proses *etching*.

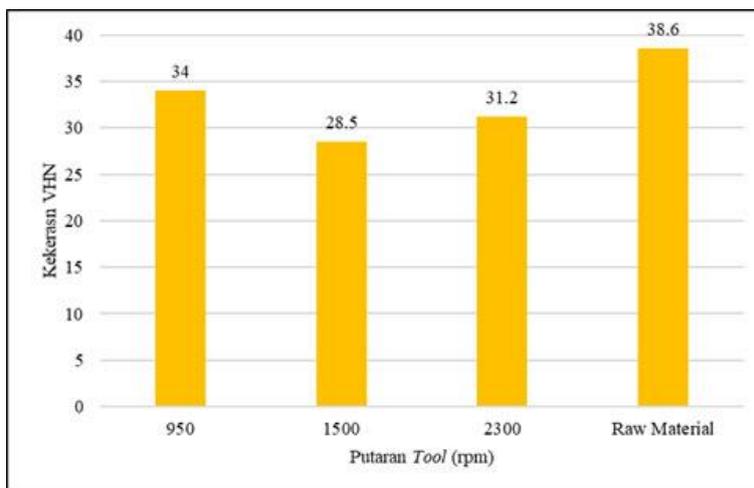
Pada spesimen dengan variasi kecepatan 950 dan 2300 rpm memiliki bentuk butiran yang hampir sama pada daerah HAZ dan TMAZ. Akan tetapi pada spesimen dengan variasi kecepatan 1500 rpm daerah HAZ dan TMAZ terdapat partikel $FeAl_3$ yang cukup besar, tidak sehalus pada spesimen dengan variasi kecepatan 950 dan 2300 rpm. Hal ini sebanding dengan hasil uji tarik pada ketiga spesimen tersebut, dimana pada variasi kecepatan 1500 rpm mendapatkan kekuatan tarik terendah

3.4 Uji Kekerasan

Pengujian kekerasan ini dilakukan pada tiap spesimen hasil pengelasan dengan metode 2 sisi FSW dengan variasi putaran *tool*. Pengujian kekerasan dengan menggunakan uji kekerasan *Micro Vickers* dengan baban yang digunakan sebesar 200 gf selama 5 detik, kemudian pada Gambar 3.4 menunjukkan grafik perbandingan kekerasan rata-rata pada setiap variasi pengelasan.



Gambar 3.4 Grafik distribusi kekerasan pengelasan FSW dua sisi dari semua variasi pengelasan



Gambar 3.5 Grafik pengaruh putaran *tool* terhadap kekerasan pada daerah sambungan las (titik 0)

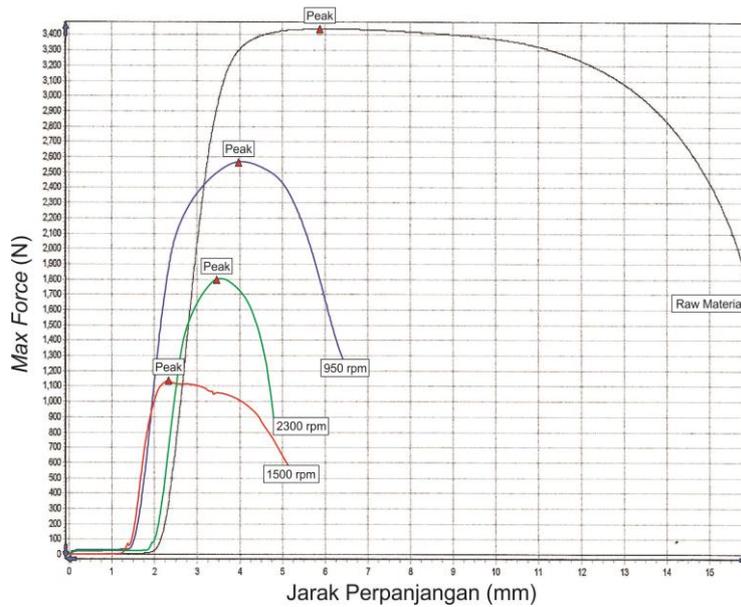
Pada gambar 3.5 menunjukkan nilai kekerasan pada daerah sambungan las FSW dua sisi. Variasi putaran 950 rpm mendapatkan nilai kekerasan tertinggi, yaitu 34 VHN, namun masih lebih rendah 88 % dari *raw materialnya* yang mencapai 38.6 VHN. Dari hasil pengujian kekerasan yang didapatkan dari penelitian ini terdapat perbedaan jika dibandingkan dengan penelitian terdahulu, yaitu Romadhoni (2016) yang meneliti tentang pengaruh kecepatan putar *tool* terhadap kekuatan mekanik sambungan las aluminium 1xxx dengan metode FSW dengan variasi putaran 980, 2300, dan 2700 rpm. Dimana kekuatan tarik menyatakan hasil lasan lebih tinggi daripada *raw materialnya*, yaitu pada putaran 980 rpm sebesar 59.1 VHN atau 147.5 %. Adapun hasil perbandingan penelitian yang spesifik ditunjukkan pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Perbandingan Nilai Uji Kekerasan dan Uji Tarik Penelitian Sekarang dengan Penelitian Terdahulu

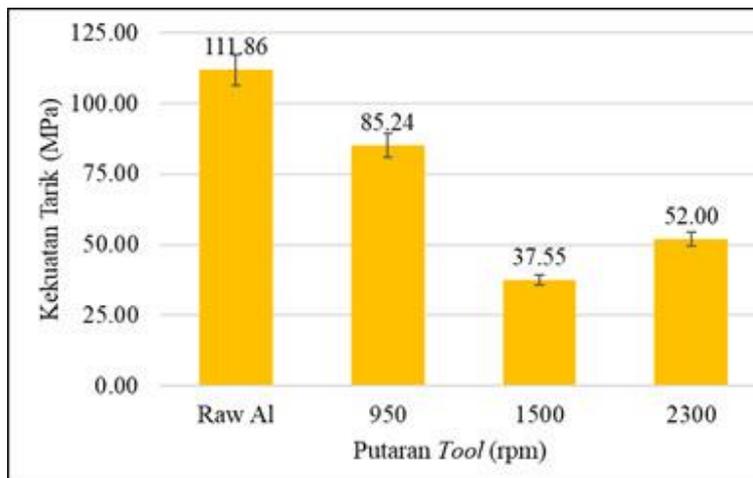
Putaran <i>Tool</i> (rpm)	Kekerasan pada daerah sambungan las (VHN)	Kekerasan pada daerah sambungan las (BHN)	Nilai Tegangan	Nilai Regangan	Penelitian
			MPa	%	
<i>Raw Material</i>	40.1	-	106.3	5.2	Romadhoni (2016)
<i>Raw Material</i>	-	59	119.5	10	Pamungkas (2012)
<i>Raw Material</i>	38.6	-	111.86	20.39	Sekarang
780	-	50	52.222	21.875	Pamungkas (2012)
950	34	-	85.24	7.81	Sekarang
980	59.1	-	80.7	2.9	Romadhoni (2016)
980	-	49	38.472	15.525	Pamungkas (2012)
1120	-	50	56.528	21.875	Pamungkas (2012)
1500	28.5	-	37.55	6.25	Sekarang
2300	33.4	-	78.33	14.1	Romadhoni (2016)
2300	31.2	-	52	5.78	Sekarang
2700	44.9	-	68.73	6	Romadhoni (2016)

3.5 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*.

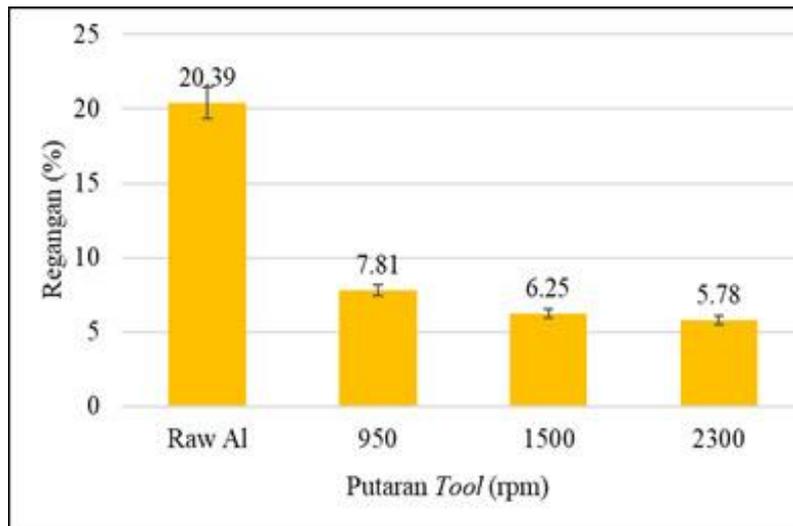


Gambar 3.6 Grafik Uji Tarik hasil FSW dua sisi Aluminium 1xxx



Gambar 3.7 Grafik pengaruh variasi putaran *tool* terhadap kekuatan tarik hasil las FSW dua sisi

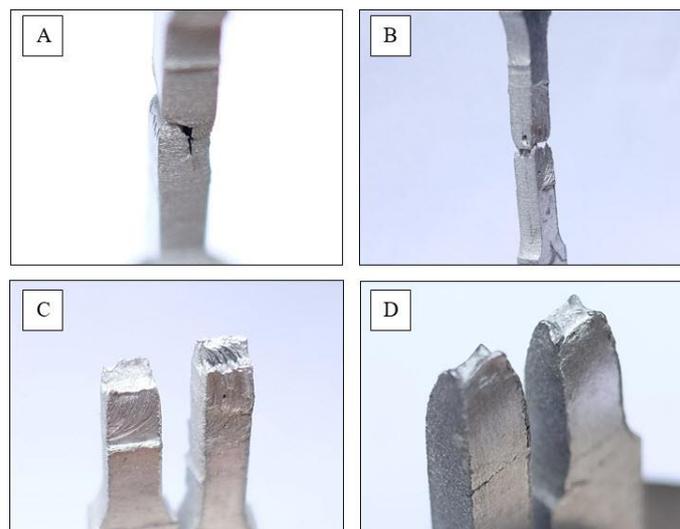
Dari gambar 3.7 Terlihat nilai yang memiliki nilai tegangan tertinggi terdapat pada pengelasan dengan putaran 950 rpm yaitu sebesar 85.24 MPa atau 76.21 % dari *raw material*. Hal ini disebabkan hasil las yang menyatu dengan baik walaupun masih terdapat cacat *wormholes*, namun masih lebih kecil dari *raw material* yang memiliki nilai kuat tarik sebesar 111.86 MPa. Sedangkan untuk nilai kuat tarik terkecil terjadi pada variasi putaran 1500 rpm sebesar 37.55 MPa, 31.78 % dari *raw material*. Hal ini disebabkan terdapat cacat *wormholes* yang cukup besar pada variasi tersebut dikarenakan panas yang terlalu tinggi dan juga getaran yang cukup tinggi. Untuk variasi putaran 2300 rpm sebesar 52 MPa, 46.5 % dari *raw material*.



Gambar 3.8 Grafik pengaruh variasi putaran *tool* terhadap regangan hasil las FSW dua sisi

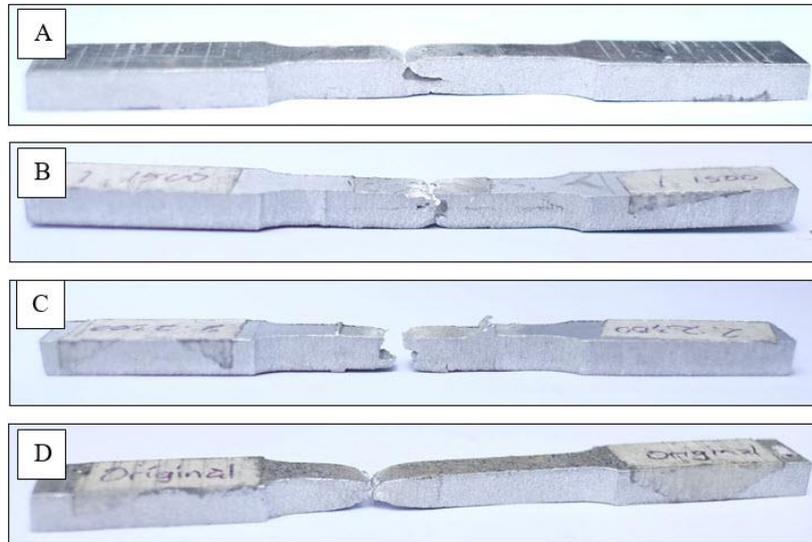
Dari hasil pengujian tarik dan regangan yang didapatkan dari penelitian las FSW dua sisi ini terdapat perbedaan jika dibandingkan dengan hasil penelitian terdahulu yaitu, Sudrajat (2012) yang menganalisis sifat mekanik hasil pengelasan Aluminium AA 1100 dengan metode *Friction Stir Welding* (FSW) dengan variasi putaran *tool* 780, 980, dan 1120 rpm, dengan *feed rate* 15 mm/menit. Kekuatan tarik menyatakan hasil yang berbeda dengan penelitian penulis, dimana penelitian yang dilakukan oleh Sudrajat kekuatan uji tarik tertinggi terjadi pada variasi kecepatan 1120 rpm, dengan nilai kuat tarik sebesar 56.528 MPa atau 47.3 % dari nilai kuat tarik *raw material*nya yang sebesar 119.5 MPa. Sedangkan untuk penelitian ini kuat tarik tertinggi terjadi pada variasi kecepatan 950 rpm yang mana ini adalah kecepatan putar terendah, adapun nilai kuat tariknya adalah 85.24 MPa atau 76.21 % dari *raw material*nya yang sebesar 111.86 MPa. Kemudian dari nilai regangannya, pada penelitian ini nilai regangan tertinggi terjadi pada variasi putaran 950 rpm yaitu sebesar 7.81 %, lebih rendah dari *raw material*nya yang mencapai 20.39 %. Sedangkan untuk penelitian terdahulu nilai regangan lebih tinggi dari *raw material*nya yaitu terjadi pada semua variasi putaran. Nilai regangan tertinggi terdapat pada variasi putaran 780 dan 1120 rpm yang mempunyai nilai regangan 21.875 %. Adapun hasil perbandingan penelitian yang spesifik ditunjukkan pada tabel 3.1.

3.6 Fraktografi



Gambar 3.9 Penampang patahan spesimen uji tarik dengan kecepatan putar *tool* (a) 950 rpm, (b) 1500 rpm, (c) 2300 rpm, dan (d) *raw material*

Pada gambar 3.9 (a) Menunjukkan hasil pengelasan FSW mengalami patahan ulet. Hal ini disebabkan hasil las yang menyatu dengan baik walaupun masih terdapat *wormholes* kecil sepanjang lasan. Sedangkan gambar 3.9 (b)&(c) mengalami patahan getas, hal ini dikarenakan terdapat *wormholes* yang cukup besar dan tidak begitu menyatunya spesimen yang dilas FSW dua sisi, dibuktikan juga dari hasil pengamatan mikro dan pengujian tariknya yang mempunyai nilai rendah. Gambar 3.9 (d) menunjukkan patahan *raw material*, bentuk patahan ulet dimana sebelum patah terjadi perpanjangan terlebih dahulu.



Gambar 3.10 Patahan uji tarik tampak samping dengan kecepatan putar tool (a) 950 rpm, (b) 1500 rpm, (c) 2300 rpm, dan (d) *raw material*

Pada patahan tampak samping sambungan las dua sisi FSW yang ditunjukkan gambar 3.10 (b)&(c) masih terdapat cacat *wormholes* dan itu menandakan tidak begitu menyatunya hasil las pada spesimen tersebut. Sedangkan pada gambar 3.10 (a) meskipun masih terdapat *wormholes* namun bagian yang menyatu lebih banyak dibandingkan dengan lubang. Pada gambar 3.10 (d) bentuk patahan *raw material* tidak berada ditengah spesimen, hal ini memperlihatkan bahwa material ulet, dimana sebelum terjadi patahan spesimen mengalami penyusutan.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan tentang pengaruh putaran *tool* terhadap struktur makro dan mikro, nilai kekerasan, kekuatan tarik dan bentuk patahan sambungan dari hasil pengelasan dua sisi FSW pada aluminium 1xxx, dapat disimpulkan bahwa:

1. Pengelasan menggunakan metode FSW dua sisi memiliki pengaruh terhadap struktur makro dan mikro. Pada hasil foto makro menunjukkan cacat *wormholes* pada hasil pengelasan di semua variasi kecepatan putar *tool*.
2. Hasil uji kekerasan menunjukkan terjadinya perubahan nilai kekerasan spesimen pada seluruh variasi kecepatan putar *tool*. Nilai kekerasan yang paling mendekati *raw materialnya* adalah variasi kecepatan putar *tool* 950 rpm, sebesar 34 VHN. Sedangkan nilai kekerasan yang paling jauh terdapat pada spesimen dengan variasi kecepatan putar *tool* 1500 rpm, sebesar 28.5 VHN.
3. Hasil pengujian tarik diperoleh rata-rata *ultimate strength* untuk pengelasan FSW dua sisi dengan menggunakan kecepatan putar *tool* 950 rpm adalah 85.24 MPa, untuk putaran *tool* 1500 rpm adalah 37.55 MPa dan putaran *tool* 2300 rpm adalah 52 MPa. Dengan hasil ini dapat diketahui bahwa *ultimate strength* yang paling mendekati dengan *raw materialnya* adalah dengan menggunakan variasi kecepatan putar *tool* 950 rpm, dengan *ultimate strength raw material* sebesar 111.86 MPa.

4. Hasil pengelasan pada spesimen kecepatan putar *tool* 950 rpm menunjukkan patahan ulet, namun sudah menurun tingkat keuletannya. Pada spesimen kecepatan 1500 dan 2300 rpm mengalami patahan getas. Pada patahan *raw material*, bentuk patahan ulet dimana sebelum patah terjadi perpanjangan terlebih dahulu. Kecepatan 950 rpm adalah kecepatan yang cocok untuk diaplikasikan pada FSW dua sisi karena hasil pengelasan yang didapatkan cukup baik.

5. Daftar Pustaka

- ASTM, 2010. *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic materials*, ASTM E8/E8M-09.
- ASTM, 2011. *Standard Practice for Microetching Metals and Alloy*, ASTM E407-07.
- Baihaqi, T. & Santoso, B., 2013. Analisis Pengaruh Sisi Pengelasan terhadap Sifat Mekanik Hasil Pengelasan Dua Sisi *Friction Stir Welding* Aluminium 5083 pada Kapal Katamaran. Surabaya, Skripsi Jurusan Teknik Perkapalan Fakultas Teknologi Kelautan Institut Teknologi Sepuluh November.
- Mishra, R. & Ma, Z., 2005. *Friction Stir Welding and Processing. Materials Science and Engineering R* 50, pp. 2-78.
- 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.
- Polmear, I. J., 1995. *Light Alloys - Metallurgy of the Light Metals*. 3rd ed. London: Arnold-Division of Hodder Headline PLC.
- Prasetyana, D., 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.
- Romadhoni, M. K., 2016. Pengaruh Kecepatan Putar Tool terhadap Kekuatan Mekanik Sambungan Las Aluminium 1xxx Ketebalan 2 mm dengan Metode *Friction Stir Welding*. Yogyakarta, Skripsi Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.
- Sugianto, E., 2013. Pengaruh Arah Pengelasan *Friction Stir Welding* (Fsw) Dua Sisi terhadap *Fatigue Crack Growth* pada Konstruksi Kapal Berbahan Aluminium 5083. Surabaya, Skripsi Jurusan Teknik Perkapalan Fakultas Teknologi Kelautan Institut Teknologi Sepuluh November.
- Thomas, W. et al., 1991. Friction-stir butt welding, GB Patent No. 9125978.8, International patent application No. PCT/GB92/02203..
- William, D. & Callister, J., 1985. *Materials Science And Engineering*, Callister. William D., 1940, Singapore.
- Xie, G., Maa, Z. & Geng, L., 2007. *Development of a fine-grained microstructure and the properties of a nugget zone in friction welded pure copper*. *Scripta Materialia*, pp. 73-76.