

# PENGARUH KECEPATAN PUTARAN PIN TOOL PADA PENGELASAN FRICTION STIR WELDING DOUBLE SIDED TERHADAP SIFAT FISIK DAN MEKANIK ALUMINIUM 1XXX DAN 5XXX DENGAN VARIASI FEED RATE 56,7 mm/mnt DAN SUDUT KEMIRINGAN (4<sup>0</sup>)

Fani Satya Pranowo<sup>a</sup>, Muh. Budi Nur Rahman<sup>b</sup> Rela Adi Himasora<sup>c</sup>,

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta  
Jalan Lingkar Selatan Tamantirto, Kasihan, Bantul, DI Yogyakarta, Indonesia, 55183

<sup>a</sup>[faniixa@gmail.com](mailto:faniixa@gmail.com), <sup>b</sup>[nurrahman\\_ummy@yahoo.co.id](mailto:nurrahman_ummy@yahoo.co.id), <sup>c</sup>[rela](mailto:rela)

## Intisari

Penelitian ini dilakukan untuk memberikan informasi hasil pengelasan *friction stir welding double sided* aluminium 1xxx dan aluminium 5xxx. FSW *double sided* digunakan karena penelitian menggunakan FSW *double sided* jarang dilakukan dan pada penelitian *single sided* dan *double sided* dengan material sejenis yang sudah pernah dilakukan terjadi cacat. Sedangkan aluminium 1xxx dan aluminium 5xxx dipilih karena bahan tersebut jarang digunakan dalam pengelasan *friction stir welding double sided*. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh kecepatan putar *tool* terhadap sifat fisik dan mekanik pada FSW *double sided* aluminium 1xxx dan aluminium 5xxx.

Material yang digunakan pada penelitian ini adalah aluminium 1xxx dan aluminium 5xxx yang memiliki dimensi 100 mm x 65 mm dan memiliki ketebalan 5 mm. *Feed rate* yang dipakai adalah 56,7 mm/menit, sedangkan kecepatan putar *pin tool* yang dipakai 910 rpm, 1500 rpm dan 2280 rpm. Hasil penyambungan diuji dengan melihat struktur makro dan mikro, uji kekerasan mikro vickers dan uji tarik dengan standard ASTM E-8.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin rendah kecepatan putar akan mengakibatkan semakin banyak kemungkinan terjadinya cacat. Pada kecepatan putar 910 Rpm terjadi cacat *incomplete fusion*. Pada struktur mikro semakin tinggi kecepatan putaran semakin halus hasilnya. Untuk hasil kekerasan, semakin rendah kecepatan putar maka semakin tinggi nilainya. Pada hasil kekuatan tarik hasil yang paling tinggi adalah kecepatan putaran 1500 Rpm dengan nilai 96,28 MPa. Sedangkan untuk patahan las terjadi adanya retak pada kecepatan putar 910 rpm, dan pada kecepatan putar 1500 dan 2280 rpm terjadi patahan ulet.

**Kata Kunci:** FSW, aluminium 1xxx, aluminium 5xxx, kecepatan putar

## Abstract

This research was conducted to provide information on the results of friction stir welding double sided aluminum 1xxx and aluminum 5xxx. Double-sided FSW is used because research using double-sided FSW is rarely done and there were defects in single-sided and double-sided studies with similar material that have been done. While aluminum 1xxx and aluminum 5xxx were chosen because these materials are rarely used in double sided friction stir welding. The purpose of this study was to determine the effect of tool rotational speed on physical and mechanical properties of double sided aluminum 1xxx and Aluminum 5xxx FSW.

The material used in this study is aluminum 1xxx and aluminum 5xxx which have dimensions of 100 mm x 65 mm and have a thickness of 5 mm. Feed rate used is 56,7 mm/minute, while the pin tool rotational speed used is 910 rpm, 1500 rpm and 2280 rpm. The results of the joint were tested by looking at their macro and micro structure, vickers-micro hardness, and tensile test with ASTM E-8 standard.

The results show that the lower rotational speed will result in more and more possibilities of defects. At a rotating speed of 910 rpm an incomplete fusion defect occurs. In microstructure, the higher the rotation speed, the smoother the results. For hardness results, the lower the rotational speed, the higher the value. On the results of the tensile strength the highest yield is a rotation speed of 1500 rpm, which is 96,28 MPa. Whereas for cracking welding faults occurs at a rotating speed of 910 rpm, and at rotating speeds of 1500 and 2280 rpm a ductile fracture occurs.

**Keywords :** FSW, aluminum 1xxx, aluminum 5xxx, rotation speed

## 1. Pendahuluan

Sudah banyak penelitian yang dilakukan dengan FSW untuk melakukan pengujian tarik, kekerasan dan uji struktur mikro dan makro . Tetapi, dari sekian banyaknya penelitian kecepatan putaran tool dan feed rate yang dipakai pada umumnya rendah. Maka dari itu, di penelitian ini dilakukan penelitian dengan kecepatan putar tool dan feed rate yang rendah. Tetapi, memiliki kemiringan pengelasan yang berbeda dan dilakukan pengelasan secara dissimilar.

Pengelasan adalah teknik menyambung logam dengan cara melelehkan sebagian logam induk dan logam pengisi dengan atau tanpa tekanan dan dengan atau tanpa logam penambah yang akan menghasilkan sambungan yang kontinyu. Pengelasan dapat digunakan dalam berbagai hal yaitu : konstruksi. Meliputi : perkapalan, jembatan, rangka baja, bejana tekan dan berbagai macam pipa.

Pengelasan friction stir welding las yang memanfaatkan putaran dari alat - alat yang bergesek terhadap dua buah lempengan logam yang disambung. Pengelasan ini pada umumnya digunakan pada plat-plat logam. Plat yang akan disambung diletakkan berjejer dan di cekam, kemudian alat yang berputar digerakan secara kontinyu dan dengan gerakan aksial yang konstan.

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa pengaruh putaran tool terhadap sifat-sifat mekanis sambungan pada aluminium 1xxx dengan metode friction stir welding. Bahwa nilai titik uji kekerasan tertinggi pada spesimen yang memiliki kecepatan putar tertinggi (Prasetyo, 2015). Sedangkan pada Aluminium 5052 ditemukan sebaliknya. Bahwa semakin rendah kecepatan putar maka akan semakin tinggi hasil nilai kekerasan (Merdiyanto, 2016) . Ini menunjukkan bahwa kecepatan putar tidak akan mempengaruhi hasil kekerasan. Kecepatan putar juga tidak akan menentukan hasil dari uji tarik, yang akan menentukan adalah cacat yang ada pada spesimen.

Pengaruh kecepatan putar tool terhadap kekuatan mekanik dengan friction stir welding (FSW) pada aluminium 5052. Hasil penelitian ini memiliki propertis kekerasan Vickers sebesar 78 VHN. Kemudian dilakukan pengelasan dengan variasi kecepatan putar tool 950, 1500, 2500 dan 3600 rpm. Dimana hasil uji kekerasan dan uji tarik yang paling tertinggi pada kecepatan putar tool 3600 rpm sebesar 207 MPa dan 69,6 VHN, sedangkan yang hasil uji mekanik yang terendah pada putaran tool 1500 rpm yaitu 112 MPa dan 56,5 VHN (Erwanto, 2015).

Proses *friction stir welding* aluminium 5083 – H112 memakai mesin frais dan *tool* dengan bentuk *pin* tirus beralur, silinder beralur dan segitiga beralur dengan parameter putaran *tool* 1500 rpm, kecepatan pengelasan 29 mm/min, sudut kemiringan *tool* 0° dan kedalaman pembenaman *pin* 4,8 mm menunjukkan nilai kekerasan sebesar 85 HV dan dampak rata - rata di sambungan las sebesar 0,24 J/mm<sup>2</sup> memakai *pin* tirus beralur lebih tinggi dibanding dengan memakai *pin* silinder beralur dan segitiga beralur. Kekuatan tarik tertinggi menggunakan *pin* tirus beralur sebesar 172 MPa masih lebih rendah dari kekuatan tarik logam induk sebesar 331 MPa karena adanya cacat pada hasil lasan (Helmi & Tarmizi, 2017) .

Paduan Aluminium digunakan sebagai bahan las nya. Paduan yang di gunakan adalah Aluminium 1xxx dan Aluminium 5xxx. Aluminium seri 1xxx memiliki kekuatan yang rendah, ketahanan terhadap korosi yang tinggi, tingkat reflektif yang tinggi, dan dapat menjadi konduktor yang baik . Aluminium seri 1xxx ini cocok untuk pengemasan dan perangkat listrik. Mempelajari sifat fisik dan mekanik sambungan las *friction stir welding* (FSW) AA 5083 dengan variasi bentuk dan kecepatan putar *probe* pada konstruksi kapal. Penggunaan aluminium seri 5xxx sering digunakan untuk konstruksi kapal, karena ketahanan korosi yang sangat tinggi meskipun kekuatan yang dimiliki tidak cukup tinggi (Pratisna, Anggertyo, & Adhiptya N.A, 2016)

Pengaruh tilt angle terhadap kekuatan tarik dan dampak pada aluminium 6061 menggunakan pengelasan *friction stir welding* . Hasilnya adalah semakin rendah tilt angle, maka akan semakin besar hasil uji tarik dan uji dampak. Pada pengelasan dengan tilt angle tertinggi mengalami cacat weld flash (Vernoval, Jokosisworo, & Adiyetya, 2019) .

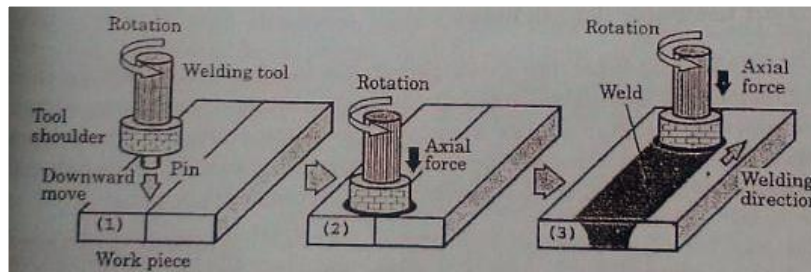
Pengaruh kedalaman pin terhadap kekuatan tarik dan dampak pada pengelasan *friction stir welding* menggunakan aluminium 6061. Hasilnya adalah terjadi cacat pada beberapa

pengelasan. Ada yang mengalami kecepatan tidak konstan, pengelupasan jalur kulit plat ditengah (Prabowo, Jokosisworo, & Adietya, 2019) .

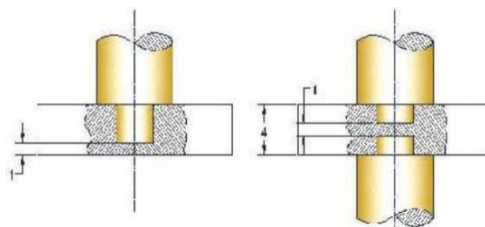
Berdasarkan dari berbagai hasil penelitian diatas dapat disimpulkan bahwa pengelasan FSW *single sided* yang telah dilakukan. Memiliki cacat dari setiap penelitian nya. Diantaranya adalah cacat void, cacat joint line reamnant, cacat IP dan cacat wormholes. Kecepatan putar *pin tool* juga sangat berpengaruh pada hasil kekerasan, uji tarik, makro dan mikro , hal ini disebabkan oleh putaran *pin tool* sangat berpengaruh terhadap panas yang dapat mempengaruhi nilai kekerasan dan kekuatan tarik terhadap panas pada aluminium. Pada penelitian *single sided* diatas, hasil yang diperoleh mendapatkan banyak cacat pada pengelasan. Pada penelitian *double sided* dengan sejenis. Terdapat beberapa cacat, diantaranya cacat *weld flash*, kecepatan tidak konstan dan pengelupasan jalur kulit tengah pada pengelasan. Oleh karena itu pada penelitian kali ini dilakukan menggunakan pengelasan *friction stir welding double sided* yang menggunakan kecepatan putar *tool* sebagai variabel nya memakai aluminium 1xxx dan aluminium 5xxx terhadap sifat mekanik yaitu pengujian tarik, kekerasan serta struktur makro dan mikro . Hai ini bertujuan untuk memperoleh informasi baru tentang proses FSW.

Dalam proses pengerjaanya FSW dibedakan menjadi dua. Pertama proses FSW satu tunggal (*single sided friction stir welding*) yaitu proses pengerjaanya hanya pada satu bidang pengelasan, dan yang kedua FSW sisi ganda (*double sided friction stir welding*) yaitu proses pengerjaanya pada kedua bidang pengelasan.

Gambar 1.1 adalah gambar yang menjelaskan cara kerja FSW. Sedangkan, Gambar 1.2 adalah gambar jenis pengelasan . Jenis pengelasan *single sided* dan *double sided*.

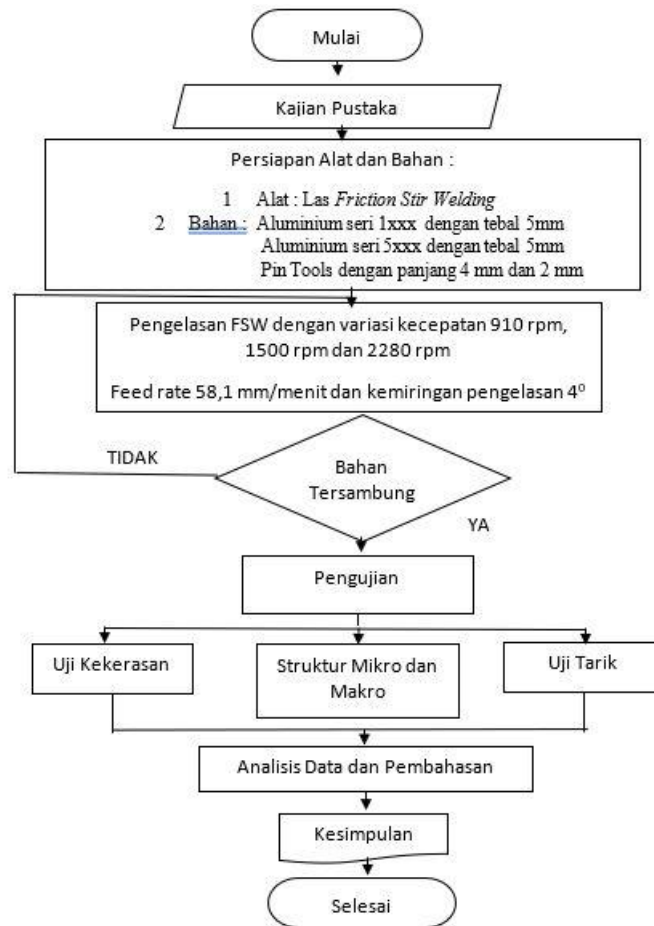


Gambar 1.1 Prinsip FSW (Winarto, 2011)



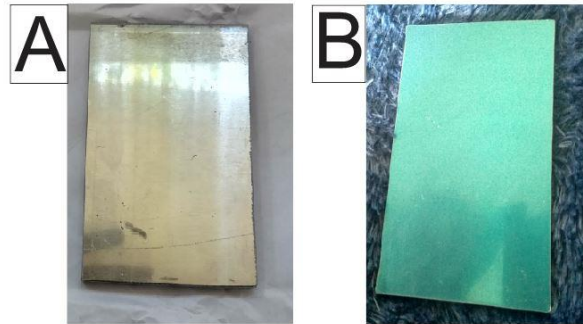
Gambar 1.2 Jenis Pengelasan (Prabowo, Jokosisworo, & Adietya, 2019)

## 2. Metode Penelitian



Gambar 2.1 Diagram alir penelitian

Material yang digunakan pada penelitian adalah aluminium seri 1xxx dan aluminium seri 5xxx dengan ketebalan 5 mm, panjang 100 mm dan lebar 60 mm. Pada aluminium seri 1xxx mempunyai kandungan aluminium 99% atau aluminium murni sebagai penghantar panas yang baik. Sedangkan pada aluminium aluminium seri 5xxx termasuk dalam golongan paduan aluminium 5xxx, yaitu paduan aluminium dengan magnesium (Mg) sifatnya tahan korosi.



Gambar 2.2 Aluminium seri ( A )1xxx dan aluminium ( B ) 5xxx

Baja yang digunakan adalah baja karbon tinggi As st90 dengan diameter 22mm dan panjang 100mm. Fungsinya sebagai bahan baku pembuatan *tool* untuk pengelasan *friction stir welding* (FSW).



Gambar 2.3 Pin *tool* (A) Pin *tool* dengan panjang ujung 4mm dan (B) Pin *tool* dengan panjang ujung 2mm.

## 2.1 Pengujian Struktur Mikro

Pengujian struktur mikro spesimen uji menggunakan standar pengujian ASTM E8/E8M- 09 dit, lalu diampelas, dipoles aotosol, kemudian dietsa menggunakan larutan methanol 25ml, hydrochloric acid 25ml, nitric acid 25ml, hydrofluotic acid 1 tetes dengan waktu 10-60 detik.. Pengambilan foto mikro dilakukan pada daerah base metal, HAZ, dan stir zone menggunakan pembesaran 100x.

## 2.2 Pengujian Kekerasan

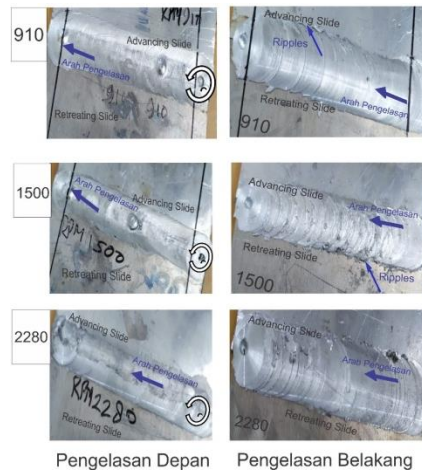
Menggunakan pengujian kekerasan metode *vickers*. Beban penekanan yang digunakan untuk pengujian kedua material sebesar 200 gf dengan waktu penekanan selama 5 detik. Hasil penekanan akan terbentuk sesuai indenter dari metode *vickers* dan panjang dari diagonal-diagonalnya digunakan untuk menentukan nilai kekerasan *micro vickers*.

### 2.3 Pengujian Tarik

Pengujian tarik merupakan salah satu pengujian yang digunakan untuk menentukan karakteristik material terutama untuk mengetahui kemampuan sambungan menerima pembebanan tarik pada sambungan *Friction Stir Welding*. Dari pengujian tarik ini didapatkan nilai kapasitas beban tarik hasil sambungan las FSW pada setiap variasi kecepatan putar.

### 3. Hasil dan Pembahasan

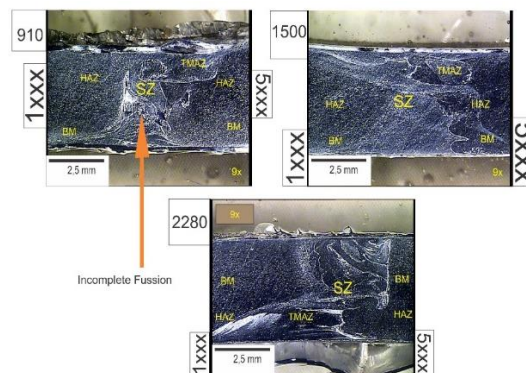
Hasil pengelasan aluminium *double sided* dengan variasi kecepatan putar dan menggunakan metode FSW dapat dilihat pada Gambar 3.1. Pada kecepatan putar 910 rpm dan 1500 rpm pengelasan mengalami cacat ripples pada bagian belakang. Hal, itu disebabkan karena kedalaman penekanan tool yang terlalu dalam pada saat pengelasan .



Gambar 3.1 Hasil pengelasan FSW dua sisi antara aluminium 1xxx dengan 5xxx variasi kecepatan putar (A) 910rpm (B) 1500rpm dan (C) 2280rpm.

### 3.1 Hasil Pengujian Struktur Makro dan Mikro

- Hasil makro



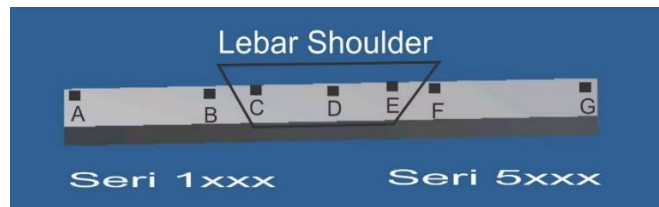
Gambar 3.2 Hasil sruktur makro variasi kecepatan putar (A) 910rpm (B) 1500rpm (C) 2280rpm

Hasil foto struktur makro dengan pembesaran 9x pengelasan FSW terjadi cacat *incomplete fussion* pada kecepatan putar 910 rpm . Cacat ini terjadi karena putaran tool terlalu rendah sehingga penyambungan tidak maksimal dan juga terdapat kotoran pada permukaan pengelasan.



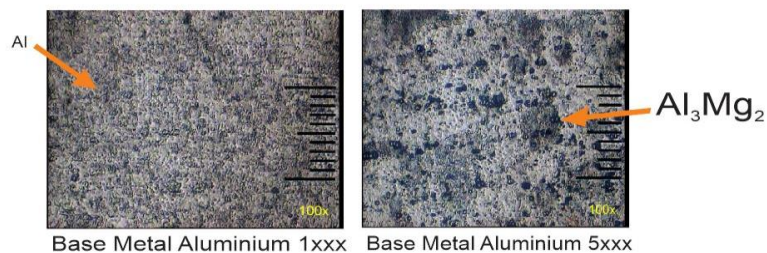
- Hasil mikro

Pengamatan struktur mikro dilakukan untuk mengetahui perubahan struktur mikro yang terjadi pada proses pengelasan FSW, yaitu didaerah Stir zone, HAZ, dan Base metal.



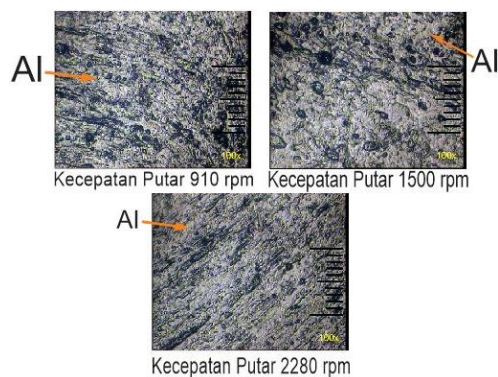
Gambar 3.3 Daerah pengujian struktur mikro

Gambar 3.3 adalah posisi pengambilan gambar pada daerah pengelasan. (A) base metal seri 1xxx, (B) HAZ seri 1xxx, (C) daerah stir zone, (D) HAZ seri 5xx. dan (E) base metal seri 5xxx.

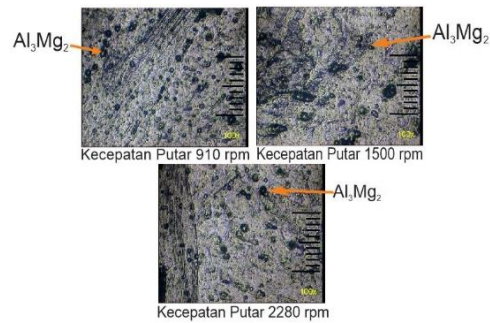


Gambar 3.4 Struktur mikro daerah *base metal* dengan skala 10  $\mu\text{m}$

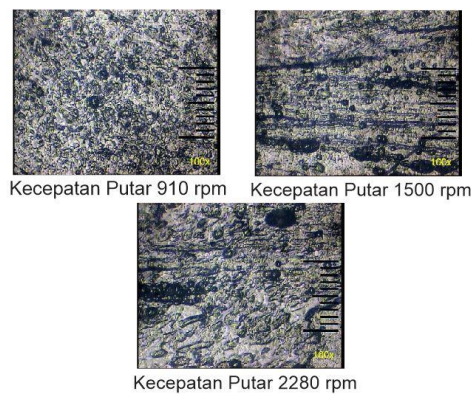
Gambar 3.4 adalah struktur mikro daerah *base metal* (BM) aluminium seri 1xxx dan 5xxx. Daerah *base metal* adalah bahan material yang belum dilas, jadi material tidak mengalami deformasi dan perubahan struktur makro. Bentuk butir pada *base metal* aluminium 1xxx dan aluminium 5xxx yaitu berbentuk proses perlakuan *cold working* pada saat proses pembuatannya.



Gambar 3.5 Struktur mikro daerah HAZ aluminium seri 1xxx dengan skala 10  $\mu\text{m}$



Gambar 3.6 Struktur mikro daerah HAZ aluminium seri 5xxx



Gambar 3.7 Struktur mikro daerah *stir zone* dengan skala 10  $\mu\text{m}$

Berdasarkan pada hasil struktur mikro gambar diatas terdapat perbedaan pada tiap- tiap daerahnya antara lain daerah stir zone, base metal dan HAZ. Hasil pengelasan pada variasi kecepatan putar 910 rpm terjadi cacat *incomplete fusion*. *Incomplete Fusion* dikarenakan pada saat pengelasan. Permukaan Logam induk kurang dibersihkan. *Incomplete Fusion* ini menyebabkan hasil pengelasan kurang merata.

### 3.2 Pengujian Kekerasan

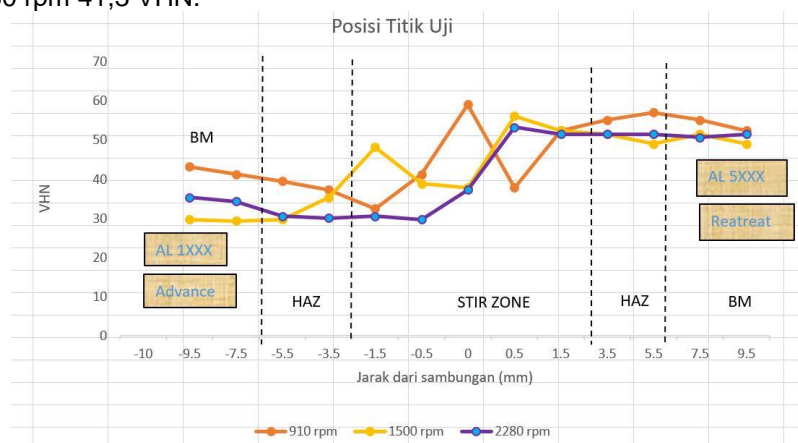
Pengujian kekerasan vickers microhardness dilakukan untuk menguji distribusi kekerasan pada logam induk, HAZ dan weld metal. Pengujian vikers menggunakan beban 200 gr force dengan waktu penekanan 5 detik.



No	Jarak dari Sambungan (mm)		Nilai Kekerasan VHN				
			910Rpm	1500Rpm	2280Rpm	Raw Material Al 1xxx	Raw Material Al 5xxx
1	Al Seri 1xxx	9,5	43,2	29,7	35,3		
2		7,5	41,3	29,3	34,3		
3		5,5	39,5	29,7	30,5		
4		3,5	37,3	35,3	30,1		
5		1,5	32,5	48,2	30,5		
6		0,5	41,3	38,9	29,7		
7	Tengah	0	59,1	37,8	37,3	38,4	66
8	Al Seri 5xxx	-0,5	37,8	56,1	53,3	39,5	67,3
9		-1,5	52,4	52,4	51,5		
10		-3,5	55,1	51,5	51,5		
11		-5,5	57,1	49	51,5		
12		-7,5	55,1	51,5	50,7		
13		-9,5	52,4	49	51,5		

Tabel 3.1 Hasil pengujian kekerasan

Nilai kekerasan pada daerah raw material aluminium seri 5xxx memiliki nilai tertinggi 66,8 VHN dan nilai raw material aluminium seri 1xx 38,7 VHN. Pada variasi kecepatan putar nilai tertinggi pada 910 rpm yaitu sebesar 46,4 VHN, lalu 1500 rpm 42,9 VHN, dan nilai terendah 2280 rpm 41,3 VHN.

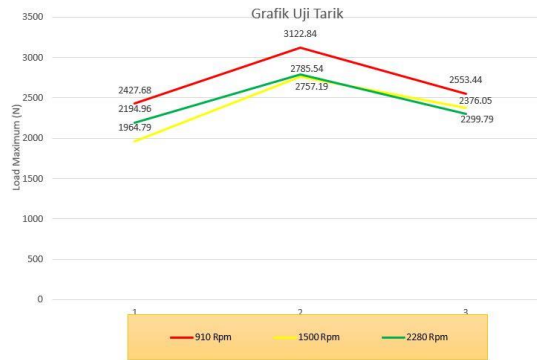


3.8 Grafik uji kekerasan

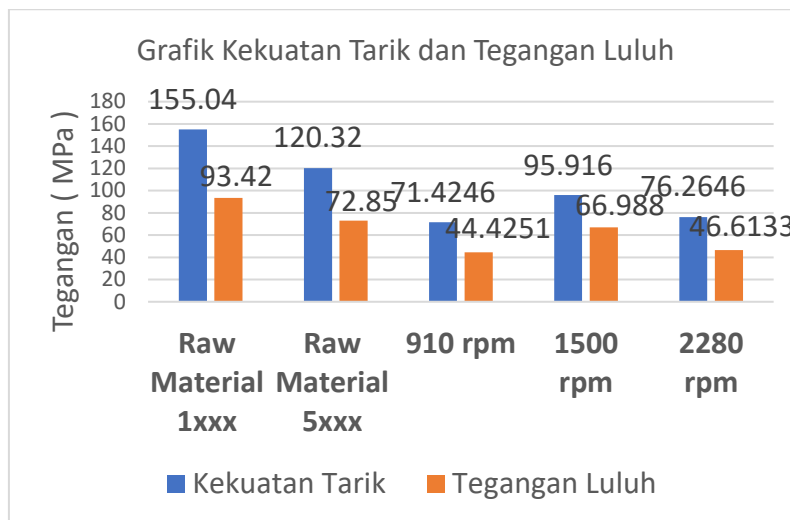
Pada Gambar 3.8 menunjukkan Gambar dari Distribusi Kekerasan. Pada gambar tersebut ditunjukkan bahwa pada salah satu titik spesimen yang terlihat dari struktur makro terdapat pori-pori. Pori-pori tersebut mengakibatkan naik turun nilai grafik stir zone .

### 3.3 Pengujian Tarik

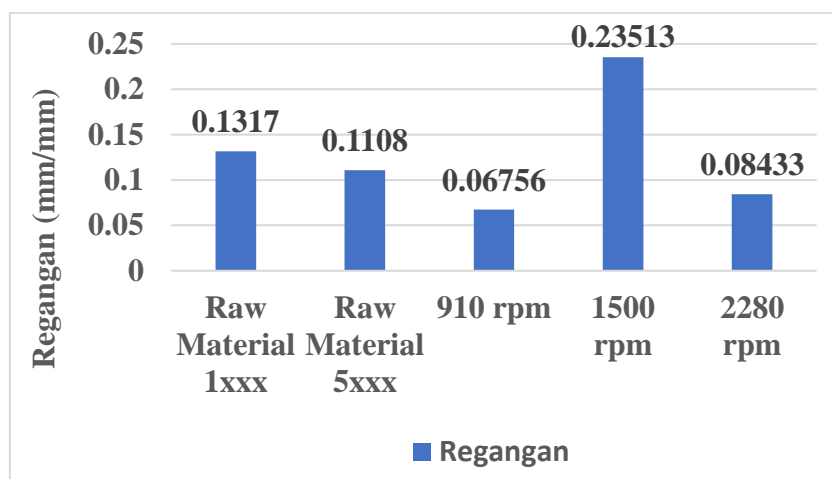
Pengujian tarik dengan menggunakan standar ASTM E8-09 pada pengelasan friction stir welding dua sisi material aluminium seri 1xxx dan aluminium seri 5xxx dengan variasi feed rate 58.1 mm/mnt dan sudut kemiringan 4° dengan kecepatan putar tool 910, 1500, dan 2280rpm. Pada Gambar 3.9 terdapat Grafik Uji Tarik yang menyatakan beban maximum dari setiap penelitian.



Gambar 3.9 Grafik Uji Tarik Hasil FSW dissimilar Pada Kecepatan Putaran



Gambar 3.10 Pengaruh Kecepatan Putaran Pin Tool Terhadap Kekuatan Tarik

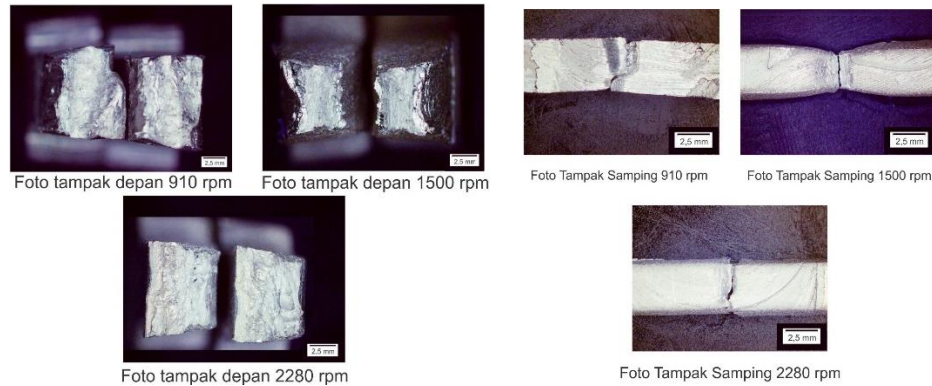


Gambar 3.11 Regangan

Gambar 3.10 adalah Grafik Kekuatan Tarik. Sedangkan Gambar 3.11 adalah Grafik Regangan. Hasil kekuatan tarik yang tertinggi adalah spesimen dengan kecepatan putar 1500 rpm dibandingkan yang lain. Regangan tertinggi pun adalah spesimen dengan kecepatan putar 1500 rpm. Spesimen dengan kecepatan putar 910 rpm mengalami hasil yang paling rendah karena mengalami cacat *incomplete fusion*.

### 3.4 Fraktografi

Pada gambar 3.12 kecepatan putar 910 rpm terdapat cacat *incomplete fusion* pada hasil las FSW, hal ini disebabkan *heat input* terlalu rendah dan juga permukaan yang ingin dilas masih kotor. Patahan pada gambar 4.12 kecepatan putar 910 rpm dan 1500 rpm mengalami patahan ulet. Hal ini disebabkan hasil las menyatu dengan baik dan tidak teramati retak. Sedangkan pada kecepatan putar 2280 rpm mengalami patahan getas



Gambar 3.12 Permukaan patahan uji tarik

### 4. Kesimpulan

Dari hasil penelitian tentang pengaruh kecepatan putar *pin tool* terhadap sambungan las aluminium 1xxx dan 5xxx ketebalan 5 mm menggunakan metode friction stir welding dapat disimpulkan bahwa :

1. Pada hasil foto makro terdapat cacat *incomplete fusion* pada kecepatan putaran 910 rpm. Cacat ini disebabkan oleh logam induk yang kotor dan karena kecepatan putaran yang terlalu rendah. Sedangkan struktur mikronya, pada hasil HAZ struktur terhalus adalah menggunakan kecepatan 2280 rpm dibandingkan HAZ 910 rpm dan HAZ 1500 rpm. Namun, pada daerah *Stir Zone* menjadi lebih lembut dan merata jika dibandingkan dengan daerah HAZ dan base metal. Hal ini terjadi karena pengaruh adukan *tool joint* dan panas saat proses pengelasan.
2. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin tinggi putaran *tool* mengakibatkan nilai kekerasannya menurun. Nilai kekerasan tertinggi terjadi pada kecepatan putar *pin tool* 910 rpm di pusat las sebesar 59,1 VHN. Kekerasan yang rendah di pusat las pada kecepatan putar *pin tool* 2280 rpm di pusat las sebesar 37,3 VHN. Ini terjadi karena menggunakan kecepatan putaran yang terlalu kecil.
3. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin tinggi kecepatan putar maka akan menghasilkan kekuatan tarik yang lebih kecil. Kekuatan tarik tertinggi adalah pada kecepatan putaran *pin tool* 1500 rpm memiliki kekuatan tarik tertinggi yaitu sebesar 95,916 MPa, sedangkan yang terendah pada kecepatan putar 910 rpm sebesar 71,4246 MPa.
4. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengelasan *friction stir welding double sided* menggunakan aluminium 1xxx dan 5xxx tidak cocok untuk digunakan pada konstruksi. Hal

ini dikarenakan kekuatan tarik dan tegangan luluh yang dihasilkan jauh lebih rendah dari hasil kekuatan tarik dan tegangan luluh pada *raw material*.

## 5. DAFTAR PUSTAKA

- Apriansyah, D. 2015. "Pengaruh *Feed Rate Terhadap* Kekuatan Sambungan Aluminium 5052 Dengan Metode *Friction Stir Welding*" Yogyakarta: Skripsi Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.
- Baihaqi, T dan Santosa, B. 2013. "Analisis Pengaruh Sisi Pengelasan Terhadap Sifat Mekanik Hasil Pengelasan Dua Sisi *Friction Stir Welding* Aluminium 5083 Pada Kapal Katamaran" Surabaya: Skripsi Institut Teknologi Sepuluh.
- Erwanto, R. 2015. "Pengaruh Kecepatan Putar *Tool Terhadap* Kekuatan Mekanik Sambungan Las *Friction Stir Welding* Pada Aluminium 5052" Yogyakarta: Skripsi Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.
- ESAB. 2020. *Friction Stir Welding–The ESAB Way*. <http://eng.esab.co.kr/Web-App/Upload/2012/04/05/Friction%20Stir%20Welding.pdf> diakses pada tanggal 12 Januari 2020.
- Hariyanto. 2010. "Pengaruh Putaran Dan Kecepatan *Tool Terhadap* Sifat Mekanik Sambungan Tumpul Las FSW Tak Sejenis Antara Al 2024-T3 dengan Al 1100" Semarang: Skripsi Universitas Wahid Hasyim.
- Helmi, I dan Tarmizi. 2017. Pengaruh Bentuk Pin Terhadap Sifat Mekanik Aluminium 5083-H112 Hasil Proses *Friction Stir Welding*. *Jurnal Riset Teknologi Industri*. Vol.11, No.1: 31-42
- Ilham, MW. 2017. "Analisis Kombinasi Elektroda Pada Pengelasan Material Baja Dengan *Stainless Steel* Ditinjau Dari Sifat Mekanik" Surabaya: Skripsi Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Iqbal, M., Tarkono., Ibrahim, GA. 2014. Pengaruh Putaran dan Kecepatan *Tool Terhadap* Sifat Mekanik Pada Pengelasan *Friction Stir Welding* Aluminium 5052. *Jurnal FEMA*. Vol.2, No.1: 23-27.
- Kanda, Sakuma-cho dan Chiyoda-ku. 2014. *Teknologi Pengelasan*. Terjemahan Winarto. Jakarta: Asosiasi Pengelasan Indonesia.
- Khaled, T. 2005. *An Outsider Looks at Friction Stir Welding*. Report#:ANM-112N-05-06.
- Manohar, B., Satishkumar, P dan Devaraju, Aruri. 2016. Effect of Microstructure and Mechanical Properties of *Friction Stir Welded Dissimilar AA-5083-AA6061* Aluminium Alloy Joints. *International Journal of Research in Engineering and Technology (IJRET)*. Vol.5, No.11: 58-62.
- Merdiyanto, A. 2016. "Pengaruh Putaran *Pin Tool Terhadap* Sifat-Sifat Mekanis Sambungan Pada Aluminium 5051 Dengan Metode *Friction Stir Welding*" Yogyakarta: Skripsi Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.
- Moradi, MM., Aval, HJ., Jamaati, R., Amir Khanlou, S dan Ji, S. 2018. *Microstructure and Texture Evolution of Friction Stir Welded Dissimilar Aluminium Alloys: AA2024 And AA6061*. *Journal of Manufacturing Procces*. Vol.32, No.1: 1-10.

- Nurdiansyah, F., Soeweify dan Zubaydi, A. 2012. Pengaruh RPM Terhadap Kualitas Sambungan dan Metalurgi Las pada *Joint Line* untuk Aluminium Seri 5083 dengan Proses *Friction Stir Welding*. *Jurnal Teknik ITS*. Vol.1, No.3: G55-G58.
- Pamungkas, ASF., Sumarji dan Darsin, M. 2012. Analisis Sifat Mekanik Hasil Pengelasan Aluminium AA 1100 dengan Metode *Friction Stir Welding* (FSW). *Jurnal Rotor*. Vol.5, No.1: 8-17.
- Prabowo, RW., Jokosisworo, S dan Adietya, BA. 2019. Pengaruh Kedalaman *Pin* (*Depth Plunge*) Terhadap Kekuatan Tarik Dan Impak Pada Sambungan Las Aluminium 6061 Hasil Pengelasan *Double Sided Friction Stir Welding*. *Jurnal Hasil Karya Ilmiah Lulusan S1 Teknik Perkapalan Universitas Diponegoro*. Vol. 7, No.4: 294:302.
- Prasetyo, TA. 2015. "Pengaruh Kecepatan Putar *Tool* Terhadap Sifat Mekanik Sambungan Aluminium 1xxx Dengan Metode *Friction Stir Welding*" Yogyakarta: Skripsi Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.
- Pratama, BD. 2017. "Pengujian Fluiditas Metode Vakum dengan Variasi Temperatur & Tekanan Menggunakan Material *Master Alloy* (Al 11% Si)" Padang: Skripsi Universitas Andalas.
- Pratisna, P., Anggertyo, I dan Adhiptya, NAP. 2016. Sifat Fisik Dan Mekanik Sambungan Las *Friction Stir Welding* (FSW) AA 5083 Dengan Variasi Bentuk Dan Kecepatan Putar *Probe* Pada Kontruksi Kapal. *Jurnal Rekayasa Teknologi Dan Informasi*. Vol.3, No.2: 396-397.
- Purnomo. 2017. *Material Teknik*. Malang: Cv.Seribu Bintang.
- Raharjo, H dan Rubijanto, J. 2012. Variasi Arus Listrik Terhadap Sifat Mekanis Sambungan Las *Shielding Metal Arc Welding* (SMAW). *Simposium Nasional RAPI XI FT UMS-2012*. M-93.
- Rino, JJ., Chandramohan, D dan Sucitharan, KS. 2012. *An Overview On Development of Aluminium Metal Matrix Composites With Hybrid Reinforcement*. *International Journal of Science and Research (IJSR)*. Vol.1, No.3: 196-203.
- Sukmana, I dan Sustiono, A. 2016. Pengaruh Kecepatan Putar Indentor Las Gesek Puntir (*Friction Stir Welding*) Terhadap Kualitas Hasil Pengelasan Aluminium 1100-H18. *Jurnal Mechanical*. Vol.7, No.1: 15-19.
- Sumarlin, M. 2015. "Pengaruh Penggunaan *Tool* Terhadap Sifat Mekanik Pengelasan *Friction Stir Welding Aluminium (Al)*" Yogyakarta: Skripsi Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.
- Vernoval, G., Jokosisworo, S dan Adietya, BA. 2019. Pengaruh Perbedaan *Tool Tilt Angle* Terhadap Kekuatan Tarik, Impak Pada Aluminium 6061 Dengan Pengelasan *Double Sided Friction Stir Welding*. *Jurnal Hasil Karya Ilmiah Lulusan S1 Teknik Perkapalan Universitas Diponegoro*. Vol.7, No.4: 168-175.
- Waratama, KE. 2018. "Studi Pengelasan *Friction Stir Welding* (FSW) Pada AA-7075 Dengan Fe Menggunakan Variasi *Feedrate* 30 mm/menit, 40 mm/menit dan 50 mm/ menit" Surakarta: Skripsi Universitas Muhammadiyah Surakarta.
- Wijayanto, J dan Anelis, A. 2010. "Pengaruh *Feed Rate* Terhadap Sifat Mekanik Pada Pengelasan *Friction Stir Welding* Aluminium 6110" Yogyakarta: Skripsi Institut Sains & Teknologi Akprind Yogyakarta.



William, DC dan David, GR. 2007. *Material Science and Engineering: a Source Book*. United States of America: John Wiley & Sons Inc; 7 edition.