



## PENGARUH KECEPATAN PENGELASAN TERHADAP SIFAT MEKANIK SAMBUNGAN ALUMINIUM PADUAN 5052-H32 PADA PROSES *FRICTION STIR WELDING*

Tarmizi<sup>1,\*</sup>, Robi Farid Abdurachman Wahid<sup>2</sup>, Irfan<sup>1</sup> Jl. Sangkuriang No.12 Bandung, Indonesia 40135

<sup>2</sup>Jurusan Teknik Metalurgi, Fakultas Teknik, Universitas Jenderal Achmad Yani  
Jl. Terusan Gatot Subroto, Bandung, Indonesia 40285

<sup>1</sup>Balai Besar Logam dan Mesin-Kemenperin

\*Email: [tarmizi@kemenperin.go.id](mailto:tarmizi@kemenperin.go.id)

Masuk Tanggal : 22-10-2018, revisi tanggal : 04-03-2019, diterima untuk diterbitkan tanggal 28-06-2019

### Intisari

Salah satu penyebab terjadinya cacat pada las aduk gesek adalah kecepatan pengelasan yang kurang tepat yang akan menyebabkan timbulnya cacat pada sambungan logam. Penelitian las aduk gesek dengan variasi kecepatan pengelasan ini dilakukan untuk mengatasi permasalahan tersebut. Penelitian ini dilakukan menggunakan material pelat aluminium 5052-H32 dengan tebal 10 mm dan putaran perkakas konstan 1500 rpm. Pada penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan kecepatan pengelasan 38, 64, dan 83 (mm/min) dengan tool silinder ulir *counter* searah jarum jam menghasilkan cacat *tunnel* yang cukup besar sepanjang garis sambung sedangkan pada penggunaan perkakas silinder ulir *counter* searah jarum jam dengan kecepatan pengelasan 22 mm/min menghasilkan sambungan dengan cacat yang lebih kecil sepanjang garis sambungan. Seluruh percobaan menghasilkan cacat *flash* dan masih bisa diterima sesuai standar AWS D17.3. Secara kualitatif semakin tinggi kecepatan pengelasan maka cacat yang dihasilkan semakin besar

**Kata Kunci:**  $Al_2O_3$ , las aduk gesek, kecepatan pengelasan, aluminium 5052-H32

### Abstract

*One of the causes of FSW (friction stir welding) defects is improper welding speed, which will cause void defects in metal joints. FSW research with welding speed variations is done to overcome these problems. This study was conducted using aluminum plate 5052-H32 with a thickness of 10 mm and a constant tool rotation of 1500 rpm. In the current research show that the use of welding speed 38, 64, and 83 (mm / min) with clockwise threaded cylinder tool produce a large tunnel defect along the joint line. In the use of the counterclockwise threaded cylinder tool with welding speed 22 mm/min resulted in connection with smaller voids along the joint line. All experimental results produce flash defects, which are still in AWS D17.3 standards. Increasing welding speed qualitatively provide more significant defect.*

**Keywords:**  $Al_2O_3$ , friction stir welding, welding speed, aluminum 5052-H32

## 1. PENDAHULUAN

Alumunium termasuk logam yang jumlahnya banyak di alam dan digunakan dalam berbagai industri transportasi, kimia, konstruksi dan penyimpanan dengan konduktifitas panas yang tinggi dan mempunyai sifat mampu las rendah karena adanya lapisan  $Al_2O_3$  yang memiliki temperatur cair lebih tinggi daripada alumunium. Proses penyambungan alumunium dengan proses

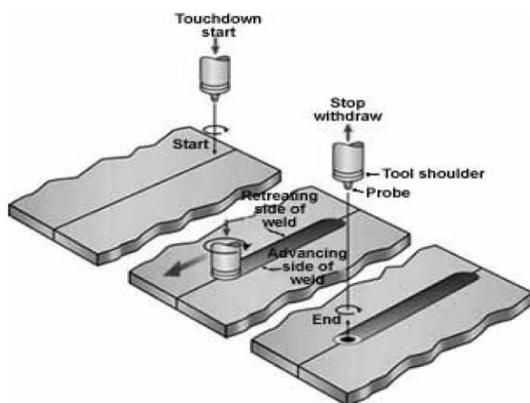
GTAW (*gas tungsten arc welding*) atau GMAW (*gas metal arc welding*) rentan munculnya cacat seperti distorsi, porositas dan *crack* sehingga sifat mekanik sambungan menjadi rendah [1]. Untuk meningkatkan kualitas sambungan hasil pengelasan dilakukan dengan metode *friction stir welding* (FSW) dengan memanfaatkan panas hasil gesekan antara *tool* dan benda kerja untuk melunakan logam induk yang disambung tanpa mengalami

proses pencairan dan penyambungan material merupakan hasil dari deformasi plastis akibat adukan pin di lokasi pengelasan [2], seperti pada Gambar 1. Proses FSW ini mempunyai kelebihan yaitu tidak membutuhkan logam tambah, gas pelindung, distorsi yang rendah dan tidak ada retakan [3]-[5].

Penggunaan perkakas (*tool*) berbentuk silinder ulir pada proses FSW aluminium 5052 menghasilkan sifat mekanik yang lebih baik pada kecepatan putaran 1500 rpm [6]-[7]. Perbedaan kecepatan pengelasan berpengaruh terhadap *heat input* pada saat proses FSW berlangsung dan akan mempengaruhi sifat mekanik hasil lasan [4],[8]. Proses FSW banyak digunakan untuk menyambung material aluminium dan paduannya pada industri pembuatan sayap atau bodi pesawat pada industri kedirgantaraan, otomotif seperti pembuatan bodi mobil dan pengelasan lambung kapal pada industri perkapalan [9].

Menurut Sulaiman, dkk. [10] dan H. S. Lee, dkk. [8] peningkatan kecepatan pengelasan pada proses FSW akan meningkatkan masukan panas (*heat input*) sehingga akan mempengaruhi sifat mekanik hasil las. Sedangkan disain pin yang tepat akan menghasilkan *heat input* yang optimal.

Permasalahan yang dikaji pada penelitian ini adalah pengaruh kecepatan pengelasan (*welding speed*) dan disain arah ulir pin terhadap kualitas sambungan aluminium paduan 5052-H32 pada proses FSW dihubungkan dengan sifat mekanik dan struktur mikro hasil lasan. Penelitian ini bertujuan melakukan proses FSW untuk mendapatkan parameter pengelasan yang optimum pada proses FSW untuk material paduan aluminium 5052-H32 dan mengetahui sifat mekanik lasan serta analisis struktur mikro hasil proses FSW.



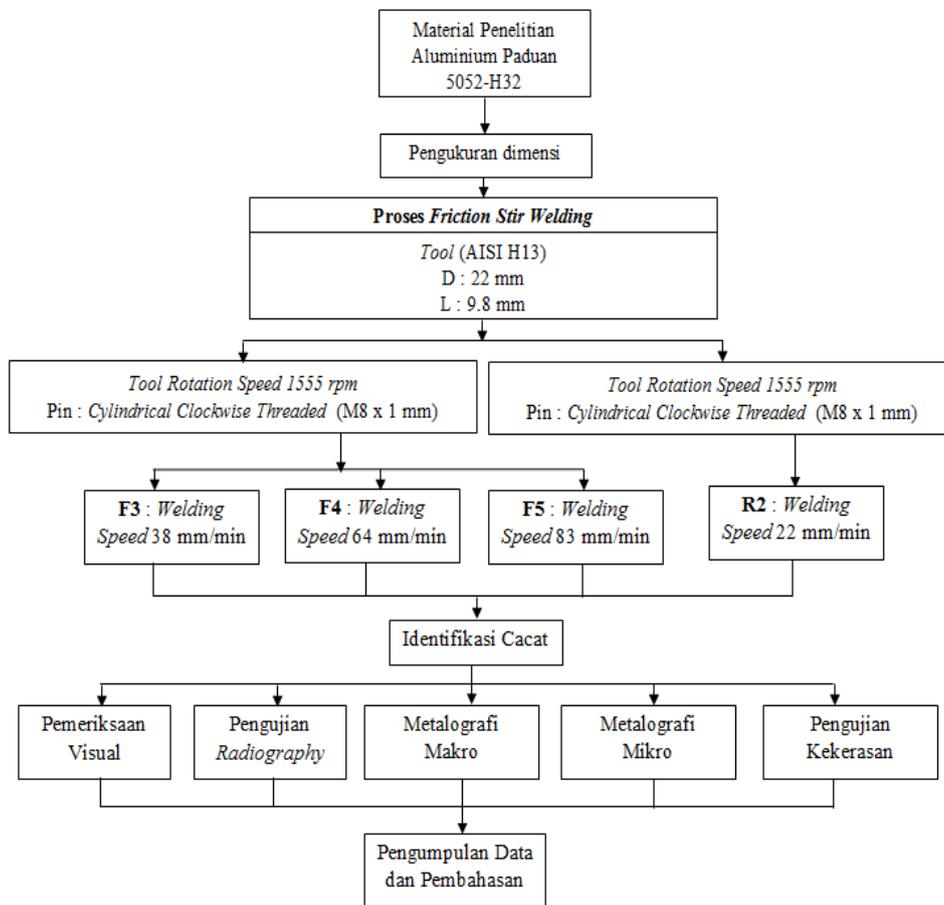
Gambar 1. Skematik proses *friction stir welding*[11]

Parameter proses FSW yang perlu diperhatikan pada pengelasan aluminium adalah kecepatan putaran perkakas, kecepatan pengelasan, kedalaman ceburan (*plunge depth*), kemiringan perkakas, dan rancangan dan geometri perkakas [12]. 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 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. Aluminium 5052 merupakan paduan aluminium dengan magnesium (Mg). Paduan ini memiliki sifat tidak dapat diperlakukan-panas, tetapi memiliki sifat baik dalam daya tahan korosi terutama korosi oleh air laut dan sifat mampu las Al-Mg banyak dipakai untuk konstruksi umum termasuk konstruksi kapal [13]. Pada penelitian ini digunakan mesin *milling* dengan variasi kecepatan pengelasan dan rancangan arah ulir yang berbeda untuk mendapatkan kualitas sambungan hasil pengujian secara visual, *radiography test*, analisis struktur makro dan mikro serta kekerasan hasil proses FSW.

## 2. METODE

Tahapan proses yang dilakukan dalam penelitian proses FSW (*friction stir welding*) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.

Penelitian FSW yang dilakukan di Balai Besar Logam dan Mesin Bandung menggunakan mesin *milling* vertikal merk G Dufour dengan kecepatan putar maksimum 1500 rpm dan kecepatan potong berkisar 10 – 900 mm/min. Material yang disambung adalah aluminium 5052-H32 ketebalan 10 mm dengan ukuran 305 mm x 125 mm dan tipe sambungan *butt joint* menggunakan perkakas (*tool*) dengan variasi kecepatan pengelasan 38, 64, 83 dan 22 mm/min. Perkakas yang digunakan pada proses FSW aluminium 5052-H32 terbuat dari material *tool steel* AISI H13 berbentuk silinder dengan panjang pin 9,8 mm menggunakan ulir M8x1 arah jarum jam (*clockwise*) dan berlawanan dengan arah jarum jam (*counter clockwise*) serta panjang dan diameter *shoulder* 22 mm.



Gambar 2. Diagram alir penelitian FSW aluminium 5052-H32

Bentuk perkakas yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 3. Setelah pengujian secara visual maka dilakukan pengujian radiografi sinar-x menggunakan mesin model Eresco MF4 dengan daya 100 kV dan arus 2 A selama 2 menit untuk melihat adanya indikasi cacat di dalam spesimen uji. Setelah itu pengujian metalografi dimulai dengan spesimen yang dipotong, dimounting dan kemudian diampelas sampai halus menggunakan amplas nomor 2000 dan *polishing* sebelum dicelupkan ke dalam larutan etsa *keller's reagent* untuk melihat daerah lasan dan sekitarnya secara makro dan mikro menggunakan mikroskop optik. Pengukuran kekerasan dilakukan 2 titik pada masing-masing area dan percobaan dengan jarak 1 mm menggunakan metode mikro Vicker's dengan beban 100 gram.



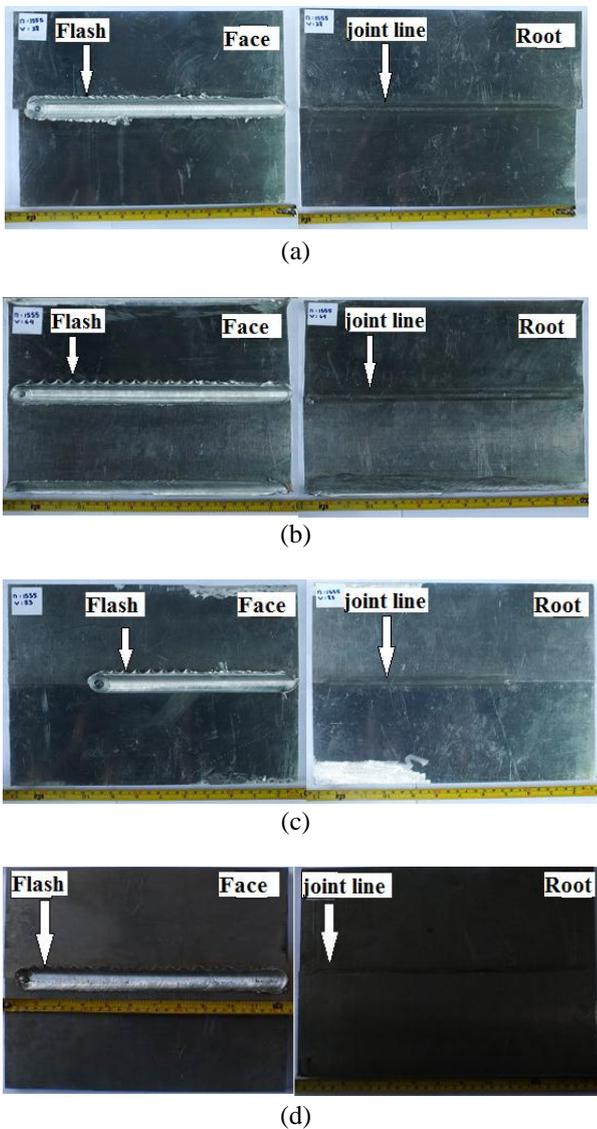
Gambar 3. Desain perkakas proses FSW pada aluminium 5052-H32

### 3. HASIL DAN DISKUSI

#### 3.1 Analisis Visual Hasil Pengelasan

Gambar 4 adalah hasil proses FSW (*friction stir welding*) aluminium 5052-H32

menggunakan variasi kecepatan pengelasan yang berbeda. Pengamatan visual menunjukkan seluruh benda uji tersambung dengan baik dan sempurna sampai bagian *root* walaupun terdapat cacat *flash* pada bagian *face*. Cacat *flash* dengan ukuran yang besar dan kasar terjadi karena penggunaan kecepatan pengelasan yang cukup tinggi seperti ditunjukkan Gambar 4(c). Penggunaan kecepatan pengelasan yang lebih rendah menghasilkan cacat *flash* yang lebih sedikit seperti ditunjukkan Gambar 4(a) dan 4(b). Sedangkan penggunaan arah ulir pin yang berbeda dan kecepatan paling rendah menunjukkan *flash* yang terjadi lebih halus dan paling sedikit seperti ditunjukkan Gambar 4(d). *Flash* yang terjadi akibat adanya *heat input* berlebih [14].

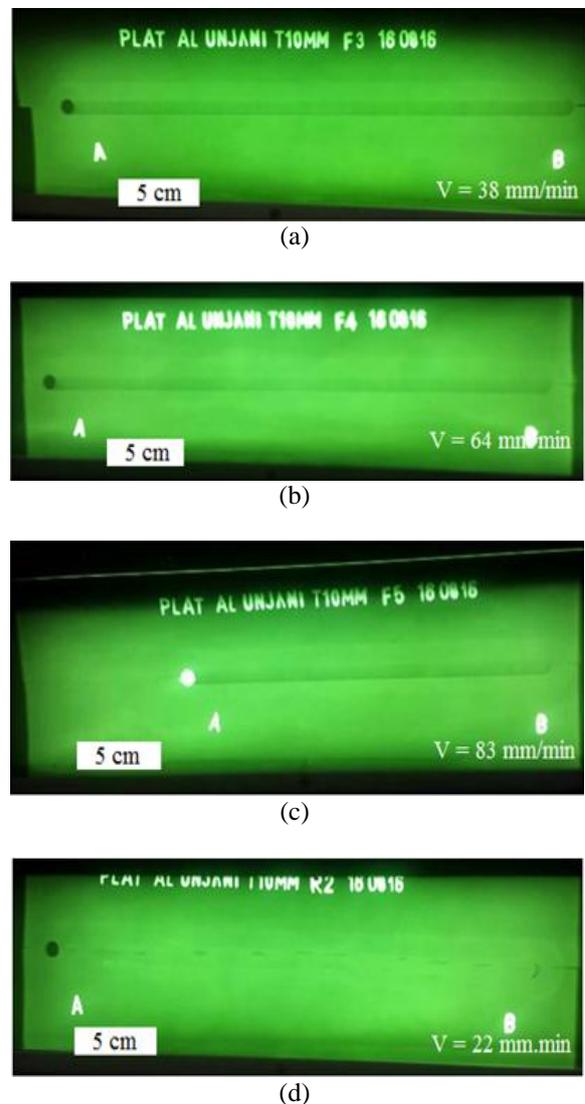


Gambar 4. Hasil proses FSW aluminium 5052-H32 dengan kecepatan pengelasan (mm/min) : (a) V = 38, (b) V = 64, (c) V = 83, (d) V = 22

Secara skematis *flash* terbentuk akibat dorongan dari *shoulder* pada permukaan benda kerja dan kelebihan *heat input* yang menyebabkan logam pada bagian samping dinding *tool* terdorong keluar dan terangkat membentuk *flash* [14]-[15]. Berdasarkan AWS D17.3 [16], seluruh *flash* dapat dihilangkan setelah pemeriksaan visual dan sebelum dilakukan pengujian NDT (*non destructive test*) lainnya.

### 3.2 Analisis Visual Hasil Radiografi

Hasil pemeriksaan visual seluruh benda uji menunjukkan tidak adanya cacat dan dilanjutkan dengan pengujian radiografi, untuk mengetahui cacat yang ada di dalam permukaan benda uji [7].



Gambar 5. Hasil uji radiografi FSW aluminium 5052-H32 dengan kecepatan pengelasan (mm/min) : (a) V = 38, (b) V = 64, (c) V = 83, (d) V = 22

Hasil uji radiografi dengan sinar X ditunjukkan pada Gambar 5. Pada Gambar 5(a),

5(b) dan 5(c) benda uji hasil radiografi terlihat adanya indikasi cacat rongga dengan adanya perbedaan warna pada bagian tengah sepanjang alur pengelasan. Sedangkan pada Gambar 5(d) benda uji hasil radiografi, indikasi cacat terlihat samar.

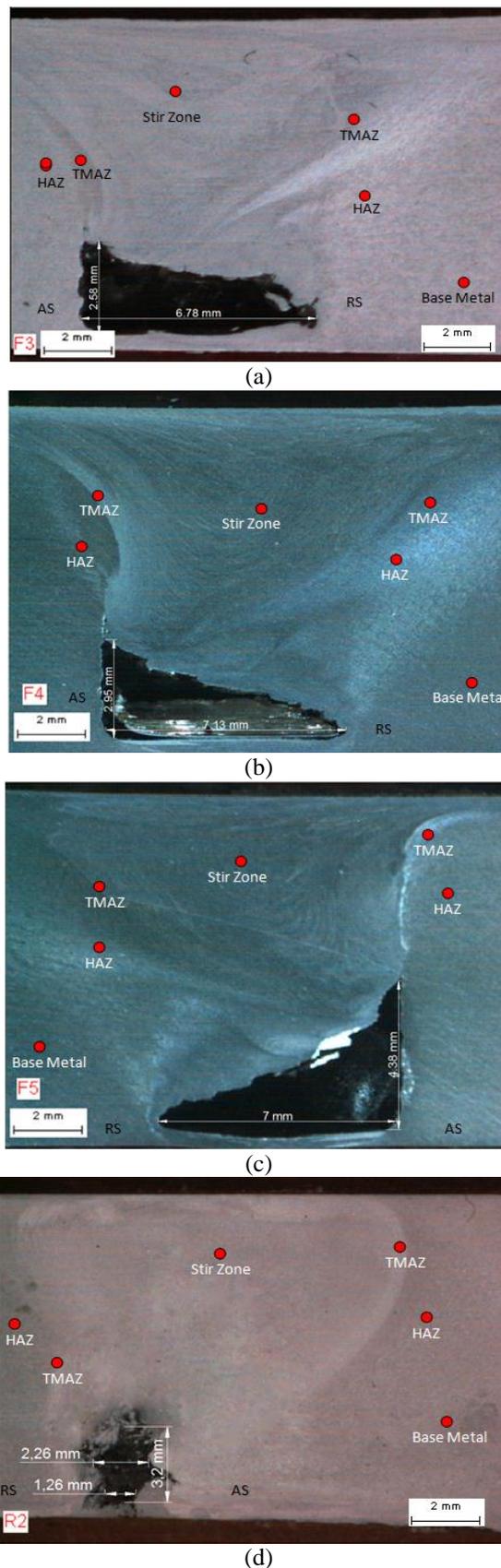
### 3.3 Analisis Cacat dan Struktur Makro

Untuk melihat cacat yang ada pada hasil proses FSW maka dilakukan pemotongan spesimen pada penampang melintang garis las. Berdasarkan hasil pemotongan dan uji makro seperti ditunjukkan Gambar 6(a), 6(b) dan 6(c) pada benda uji dengan kecepatan pengelasan 38, 64 dan 83 mm/min terlihat bahwa sepanjang *joint line* terdapat cacat *tunnel* yang cukup besar yang berada dekat dengan *root* [14]. Sedangkan Gambar 6(d) pada benda uji hanya terlihat cacat *void* kecil yang terletak dekat dengan permukaan (*face*) [14]. Hal ini terjadi karena proses FSW menggunakan *tool* dengan arah ulir *counter clockwise*, yang berlawanan dengan percobaan sebelumnya dan kecepatan yang digunakan lebih rendah sehingga *heat input* yang dihasilkan cukup untuk melunakkan material dan membentuk sambungan yang lebih baik walaupun belum optimal dengan *void* yang lebih kecil. Pemotongan benda uji untuk menegaskan hasil uji radiografi tentang adanya cacat pada hasil FSW.

Secara kualitatif benda uji pada Gambar 6(a), mempunyai luas cacat lebih kecil daripada benda uji pada Gambar 6(b). Sedangkan pada Gambar 6(c) benda uji menghasilkan luas cacat lebih besar dari benda uji lainnya. Pada Gambar 6(a), 6(b) dan 6(c) ketinggian cacat berada pada sisi *advancing side* karena pada daerah tersebut pertama kali terjadi pengadukan dan menyebabkan logam terangkat sesuai arah ulir *clockwise* dan berpindah kearah *retreating side*. *Advancing side* merupakan daerah yang arah putaran *tool* searah dengan laju pengelasan.

Gambar 6(d) menunjukkan cacat yang lebih kecil yaitu berupa *void* sepanjang *joint line* pada daerah dekat *face* lasan. Hal tersebut terjadi karena arah ulir dirubah menjadi *counter clockwise* dan penurunan kecepatan pengelasan yang mampu mengaduk material lunak dengan baik dan bergerak mengisi celah kosong yang di tinggalkan *tool* saat bergerak translasi. Kedua jenis cacat ini terbentuk akibat efek pengadukan selama proses FSW. Hal ini sesuai dengan fakta hasil penelitian bahwa pengadukan mempengaruhi hasil lasan, dimana pengadukan sendiri dipengaruhi oleh arah ulir

*tool* dan berhubungan dengan arah aliran logam [15].



Gambar 6. Hasil uji makro FSW aluminium 5052-H32 dengan kecepatan pengelasan (mm/min) : (a) V = 38, (b) V = 64, (c) V = 83, (d) V = 22

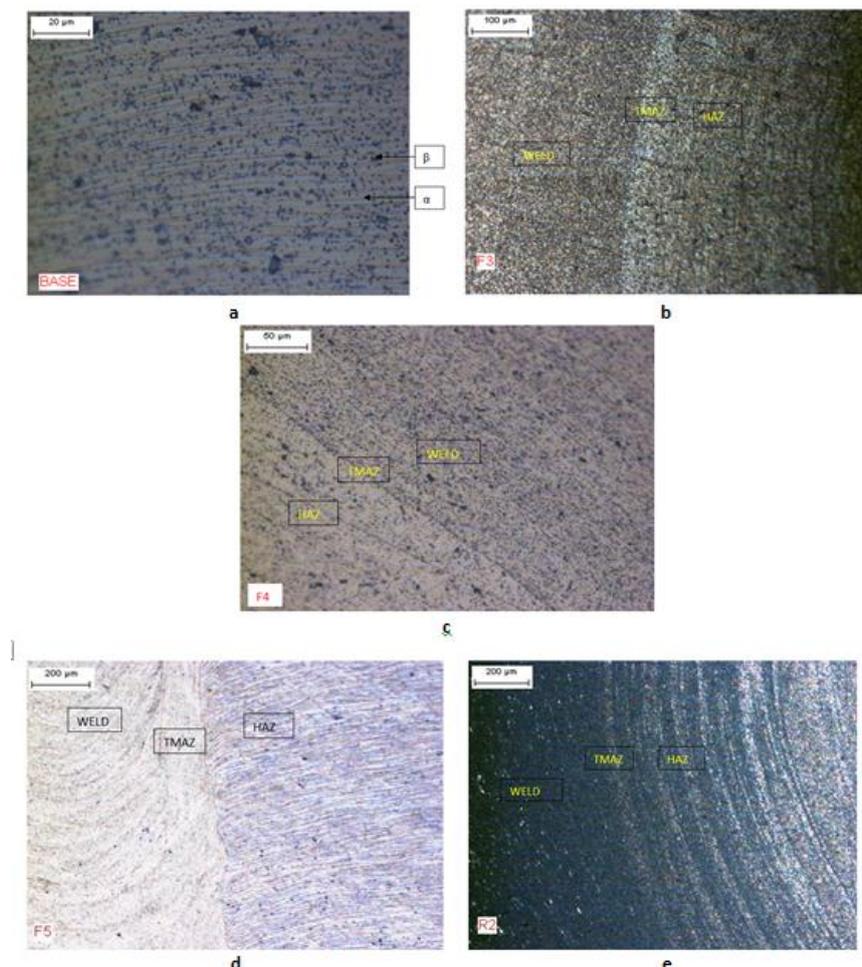
Pada percobaan awal menggunakan ulir pin *clockwise* sedangkan pada percobaan lanjutan menggunakan ulir pin *counterclockwise*. Pada saat ulir *clockwise* menghasilkan cacat dekat dengan *root*, karena arah ulir tersebut membawa aliran logam menuju ke atas permukaan lasan sehingga mengakibatkan daerah *stir zone* memiliki ketinggian lebih tinggi dari base metal, sedangkan pada bagian bawah dekat *root* terjadi kekosongan dan membentuk cacat rongga sepanjang *joint line*.

Berbanding terbalik pada saat menggunakan ulir pin *counter clockwise* dan dipengaruhi oleh kedalaman penekanan proses yang lebih dalam dari percobaan awal, pin ini memaksa logam lasan terdorong kebawah *root* lasan sehingga pada bagian sekitar *root* terisi penuh, namun terjadi penipisan pada permukaan lasan dibandingkan dengan hasil percobaan awal dan terbentuk cacat rongga pada daerah dekat permukaan las sepanjang *joint line*[17].

### 3.4 Analisis Hasil Uji Struktur Mikro

Berdasarkan standar cacat *tunnel* dan cacat *void* hasil proses FSW tidak diperbolehkan karena tidak memenuhi batasan kriteria penerimaan cacat berdasarkan standar AWS D17.3 [16]. Peningkatan kecepatan pengelasan akan berpengaruh terhadap kemungkinan adanya cacat pada hasil FSW.

Gambar 6 juga menunjukkan foto makro empat daerah lasan yang berbeda yang terjadi pada proses FSW, seperti daerah *stir zone*, TMAZ (*thermo-mechanically affected zone*), HAZ (*heat affected zone*), dan *base metal*. Menurut R. S Mishra, dkk. [15] *stir zone* adalah daerah sambungan yang mengalami rekristalisasi penuh, sedangkan TMAZ adalah daerah yang mengalami deformasi plastis tetapi tidak mengalami rekristalisasi. HAZ merupakan daerah terpengaruh panas yang tidak mengalami deformasi plastis.



Gambar 7. Struktur mikro hasil FSW aluminium 5052-H32 dengan kecepatan pengelasan (mm/min) : (a) Base Metal, (b) V= 36, (c) V= 64, (d) V= 83, (e) V= 22. Etsa Keller's reagent

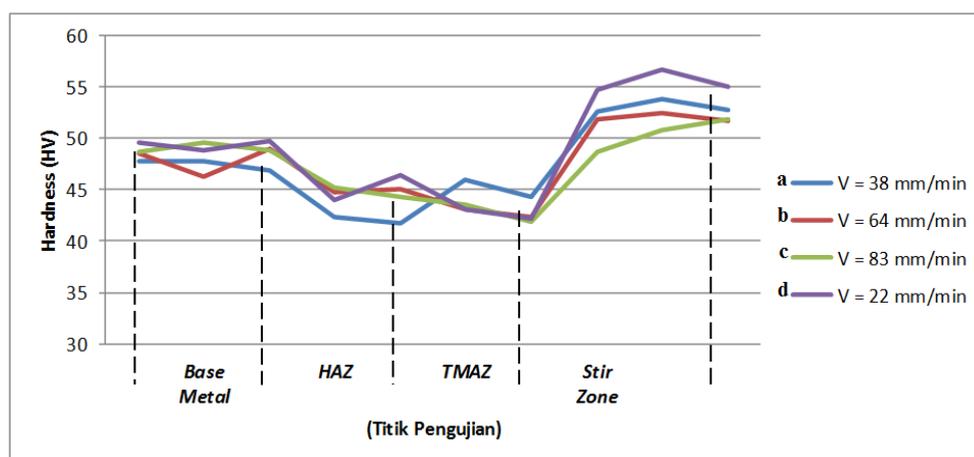
Gambar 7(a) terlihat butir berbentuk pipih karena merupakan logam induk dari *raw material* hasil *rolling* dan terdapat dua fasa yaitu  $\alpha$  berwarna putih sebagai matrik dan  $\beta$  berwarna hitam [18]. Gambar 7(b), 7(c), 7(d) dan 7(e) menunjukkan struktur mikro setiap daerah lasan yang secara kualitatif terlihat perbedaan ukuran besar butir. Ukuran butir paling halus terdapat pada daerah *stir zone* untuk semua benda uji karena mengalami rekristalisasi yang membentuk butir baru dengan proses pendinginan yang lebih lama dibandingkan daerah TMAZ atau HAZ. Ukuran butir pada setiap daerah lasan akan dipengaruhi oleh distribusi panas pada saat proses FSW berlangsung dan pendinginan logam yang terpengaruh panas [9]. Laju pendinginan yang berbeda akan menghasilkan ukuran struktur mikro yang berbeda. HAZ merupakan daerah terpengaruh panas yang mengalami perbesaran butir dibandingkan logam induk. Sedangkan TMAZ memiliki butir yang lebih besar dibandingkan *stir zone* karena mengalami deformasi plastis tetapi tidak terjadi rekristalisasi. Secara kualitatif ukuran butir di daerah *stir zone* pada proses FSW aluminium 5052-H32 menggunakan kecepatan 22 mm/min dengan arah ulir *tool counterclockwise* (Gambar 7(e)) lebih halus dibandingkan dengan menggunakan kecepatan yang lebih besar dengan arah ulir *tool clockwise* (Gambar 7(b), 7(c) dan 7(d)). Hal ini mengindikasikan bahwa nilai kekerasan juga akan meningkat. Butir

yang halus akan menyebabkan banyaknya batas butir yang akan saling menghalangi pergerakan butir tersebut [19]-[20]. Hal ini akan mempengaruhi tingkat kekerasan sambungan logam las.

### 3.5 Analisis Hasil Uji Kekerasan

Gambar 8 menunjukkan distribusi nilai kekerasan pada beberapa titik di daerah lasan dengan menggunakan metode mikro Vicker's. Grafik tersebut menunjukkan perbedaan nilai kekerasan pada tiap daerah lasan dengan kekerasan pada logam dasar (*base metal*) sebesar 48,56 HV. Nilai Kekerasan tertinggi berada di daerah *stir zone* sebesar 55,55 HV untuk benda uji dengan kecepatan pengelasan 22 mm/min, lebih tinggi daripada kekerasan *base metal*, HAZ maupun TMAZ karena pengaruh panas dan laju pendinginan serta adanya mekanisme *solid solution strengthening*.

Mekanisme *solid solution strengthening* terjadi ketika adanya atom masuk ke dalam larutan padat menghasilkan tegangan kisi di sekeliling atom induknya, hasilnya atom ini berinteraksi dengan dislokasi dan menghambat pergerakan dislokasi sehingga terjadi penguatan material [19]. Menurut P. Cavaliere, dkk. [21] panas yang muncul akibat kecepatan pengelasan akan mempengaruhi pembentukan fasa *solid solution* pada material aluminium terutama pada daerah *stir zone*.



Gambar 8. Nilai kekerasan FSW aluminium 5052-H32 dengan kecepatan pengelasan (mm/min) : (a) V= 38 (b) V= 64 (c) V= 83 dan (d) V= 22

Ukuran butir yang lebih besar akan menurunkan nilai kekerasan pada daerah TMAZ dan HAZ seperti yang ditunjukkan Gambar 8. Nilai kekerasan pada HAZ dan TMAZ lebih rendah dari *base metal*, karena pengaruh panas yang terjadi pada daerah HAZ

dan TMAZ lebih rendah dari panas pada daerah *stir zone* sedangkan laju pendinginan yang terjadi lebih cepat sehingga menghasilkan material dengan sifat mekanis lebih rendah daripada *stir zone* ataupun logam induk [9]. Sedangkan logam induk tidak mengalami

perubahan struktur mikro karena tidak terpengaruh oleh panas akibat proses FSW [20].

Hasil uji kekerasan menunjukkan bahwa daerah dengan ukuran butir lebih halus seperti *stir zone* memiliki nilai kekerasan yang paling tinggi dibandingkan dengan daerah sekitar sambungan las dengan ukuran butir yang lebih besar.

#### 4. KESIMPULAN

Proses FSW (*friction stir welding*) aluminium 5052-H32 menggunakan variasi kecepatan pengelasan dan disain arah ulir pin menghasilkan sambungan dengan sifat mekanik yang berbeda-beda. Berdasarkan hasil uji radiografi, struktur makro dan mikro serta kekerasan menunjukkan bahwa sifat mekanik sambungan aluminium 5052-H32 dengan proses FSW dengan putaran *tool constant* 1555 rpm lebih baik menggunakan pin silinder berulir *counter clockwise* dengan kecepatan 22 mm/min dibandingkan pin berulir *clockwise* dengan kecepatan 38, 64 dan 83 mm/min. Proses FSW Aluminium 5052-H32 dengan putaran konstan 1555 rpm dan *tool* silinder berulir *counter clockwise* menghasilkan sifat mekanik sambungan yang lebih baik dengan kecepatan pengelasan yang lebih rendah.

#### UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Bapak Dr. Ing Ir. Supono Adi Dwiwanto, yang telah meluangkan waktu untuk memberikan masukan dan saran dalam kegiatan penelitian dan penulisan makalah ini serta kepada Staff Seksi Pemesinan dan Pengelasan BBLM yang menyediakan waktu dan fasilitas untuk penelitian ini.

#### DAFTAR PUSTAKA

[1] H. Wiryosumarto dan T. Okumura, *Teknologi Pengelasan*, PT Pradnya Paramita, 2000.

[2] T. Khaled, "An outsider looks at friction stir welding," *Fed Aviat Admin*, vol. 90712, pp. 1–71, 2005.

[3] R. S. Mishra dan Z. Y. Ma, *Friction stir welding and processing*, vol. R 50. 2005.

[4] S. Ravikumar, V. S. Rao, dan R. V. Pranesh, "Effect of process parameters on mechanical properties of friction stir welded dissimilar materials between AA6061-T651 and AA7075-T651 Alloys," *Int. J. Adv. Mech*, vol. 4, no. 1, pp. 101–114, 2014.

[5] A. K. Jassim, D. C. Ali, dan A. Barak, "Effect of tool rotational direction and welding speed on the quality of friction stir welded Al-Mg Alloy 5052-O," *Journal of Applied Science and Engineering*, vol. 13 (1), pp. 2352-2358, 2018. Doi: 10.3923/jeasci.2018.2352.2358.

[6] M. Iqbal, Tarkono, dan G. A. Ibrahim, "Pengaruh putaran dan kecepatan tool terhadap sifat mekanik pada pengelasan friction stir welding aluminium 5052," *J. FEMA*, vol. 2, no. 1, pp. 23–27, 2014.

[7] Tarmizi dan B. Prayoga, "Analisa sifat mekanik dan struktur mikro pada proses friction stir welding aluminium 5052," *J. Ris. Teknol. Ind.*, vol. 10, no. 2, pp. 70-82, 2016.

[8] H. Lee, Y. R. Lee dan K. J. Min, "Effects of friction stir welding speed on AA2195 alloy," *MATEC Web of Conference*, vol. 45, 01003, 2016. Doi.org/10.1051/mateconf/20164501003.

[9] Irfan dan Tarmizi, "Pengaruh bentuk pin terhadap sifat mekanik aluminium 5083 – H112 hasil proses friction stir welding," *J. Ris. Teknol. Ind.*, vol. 11, no. 1, pp. 31–42, 2017.

[10] S. Sulaiman, S. Emamian, M. N. Sheikholeslam, dan M. Mehrpouya, "Review of the effects of friction stir welding speed on stainless steel type 304L," *International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing*, vol. 1, no. 1, pp. 85–87, 2013. Doi: 10.7763/IJMMM.2013.V1.18.

[11] P. L. Threadgill, A. J. Leonard, H. R. Shercliff, dan P. J. Withers, "Friction stir welding of aluminium alloys," *International Materials Reviews*, vol. 54, no. 2, pp. 49–93, 2009. Doi.org/10.1179/174328009X411136.

[12] V. Joshi, K. Balasubramaniam, dan R. V. Prakash, "Study of defects in friction stir welded AA 5083 by radiography, ultrasonic and phased array ultrasonic," *Proceedings of the National Seminar & Exhibition on Non-Destructive Evaluation*, pp. 1-7, 2011.

[13] S. Shanavas dan J. E. Raja, "Science direct weld quality prediction of AA 5052-H32 aluminium alloy using neural network approach," *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 2, pp. 8256–8262, 2018.

[14] P. Podržaj, B. Jerman, dan D. Klobčar, "Welding defects at friction stir welding," *Metalurgija*, vol. 54, no. 2, pp. 387–389, 2015.

- [15] R. S. Mishra dan M. W. Mahoney, "Friction stir welding and processing," *ASM Int.*, p. 368, 2007.
- [16] "7. AWS\_D17.3-D17.3M-1.pdf."
- [17] S. Balos, L. Sidjanin, M. Dramicanin, D. L. Zlatanovic dan A. Antic, "Friction stir welding of Al-Mg alloy plates with increased edge roughness using square pin tools of various shoulder geometries," *Materials and Technology*, vol. 50, no. 3, pp. 387–394, 2016. Doi:10.17222/mit.2015.088.
- [18] W. Baldwin, "Metallography and microstructures 2004 ASM," 2004.
- [19] W. D. Callister, *Materials Science*. John Wiley & Sons, Inc, 2007.
- [20] L. N. Tufaro, I. Manzoni, dan H. G. Svoboda, "Effect of heat input on AA5052 friction stir welds characteristics," *Procedia Mater. Sci.*, vol. 8, pp. 914–923, 2015.
- [21] P. Cavaliere, A. Squillace, dan F. Panella, "Effect of welding parameters on mechanical and microstructural properties of AA6082 joints," *J Mater Process Technol*, 200(1–3), pp. 364–372, 2008.

