

## **Analisa Kecepatan Pengelasan dan Kecepatan Putar *Pin Tool* terhadap Konduktivitas Listrik Sambungan Aluminium dan Tembaga Hasil *Friction Stir Welding (FSW)***

<sup>(1)\*</sup>Wikan Jatimurti, <sup>(2)</sup>Fauzan Kurniawan, <sup>(3)</sup>Budi Agung Kurniawan

<sup>(1),(2),(3)</sup>Departemen Teknik Material dan Metalurgi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS),  
Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

\*Email: [wikan@mat-eng.its.ac.id](mailto:wikan@mat-eng.its.ac.id)

Diterima: 15.10.2019 Disetujui: 29.10.2019 Diterbitkan: 30.11.2019

### **ABSTRACT**

*The tool pin rotational speed and welding speed affect the electrical conductivity value of the Al-Cu connection. Al-Cu connection is a butt joint resulting from the friction stir welding (FSW) process. The material used is Al 6061 and pure copper. The friction stir welding (FSW) process uses a pin tool with a pin design that integrates with the pin tool and a three-degree angle. The purpose of this study was to determine the electrical conductivity value of the Al-Cu connection with the friction stir welding (FSW) process at the butt joint connection. The variables used in this study were pin tool rotation speeds of 800, 1000, and 1250 RPM and welding speeds of 10, 12.5, and 16 mm/min. Tests conducted in this study were macro structure testing, measurement of resistance values, and microhardness testing. Besides, an analysis of heat input and welding time is needed for each variable. The results of macro and XRD structure test results show that in the aluminum and copper connection, there are intermetallic compounds in the form of AlCu and Al<sub>2</sub>Cu. The results of the analysis state that the welding results with a welding speed of 12.5 mm/min are the most optimum variables. The welding process results in conductivity values ranging from 27.173 mΩ<sup>-1</sup>mm<sup>-2</sup> and 28.09 mΩ<sup>-1</sup>mm<sup>-2</sup>. The presence of intermetallic compounds affects the conductivity value of the connection.*

*Keywords: Al-Cu, friction stir welding, electrical conductivity, butt joint, aluminum, copper*

### **ABSTRAK**

Kecepatan putar *pin tool* dan kecepatan pengelasan mempengaruhi nilai konduktivitas listrik sambungan Al-Cu. Sambungan Al-Cu adalah *butt joint* hasil proses *friction stir welding (FSW)*. Bahan yang digunakan adalah Al 6061 dan tembaga murni. Proses *friction stir welding (FSW)* menggunakan *pin tool* dengan desain pin yang menyatu dengan *pin tool* dan sudut kemiringan tiga derajat. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui nilai konduktivitas listrik sambungan Al-Cu dengan proses *friction stir welding (FSW)* pada sambungan *butt joint*. Variabel yang digunakan pada penelitian ini adalah kecepatan rotasi *pin tool* yaitu 800, 1000, dan 1250 RPM dan kecepatan pengelasan yaitu 10, 12.5, dan 16 mm/min. Pengujian yang dilakukan pada penelitian ini adalah pengujian struktur makro, pengukuran nilai resistansi dan pengujian micro hardness. Disamping itu, dilakukan analisis *heat input* dan waktu pengelasan yang dibutuhkan pada setiap variabel. Hasil pengujian struktur makro dan XRD menghasilkan bahwa pada sambungan aluminium dan tembaga terdapat senyawa intermetalik berupa AlCu dan Al<sub>2</sub>Cu. Hasil analisis menyatakan bahwa hasil pengelasan dengan kecepatan pengelasan 12.5 mm/min merupakan variabel yang paling optimum. Hasil proses pengelasan mendapatkan nilai konduktivitas berkisar antara 27,173 mΩ<sup>-1</sup>mm<sup>-2</sup> dan 28,09 mΩ<sup>-1</sup>mm<sup>-2</sup>. Adanya senyawa intermetalik mempengaruhi nilai konduktivitas sambungan.

Kata Kunci: Al-Cu, *friction stir welding*, konduktivitas listrik, *butt joint*, aluminium, tembaga

## I. Pendahuluan

Kesuksesan penyambungan aluminium dan tembaga menjadi topik penelitian yang menarik di bidang kimia, nuklir, pembangkit listrik, pesawat terbang dan industri elektronik (Al-Roubaiy, Nabat, & Batako, 2014). Salah satu aplikasi penggunaan hasil sambungan aluminium dan tembaga adalah sebagai bagian transisi pada *high direct-current bus systems* (Braunovic & Aleksandrov, 1993). Jika bagian aluminium dan tembaga dihubungkan secara langsung, umur pakai sambungan listrik tersebut adalah sekitar satu tahun, namun jika menggunakan bimetal hasil penyambungan aluminium dan tembaga maka umur pakainya meningkat hingga lebih dari sepuluh tahun.

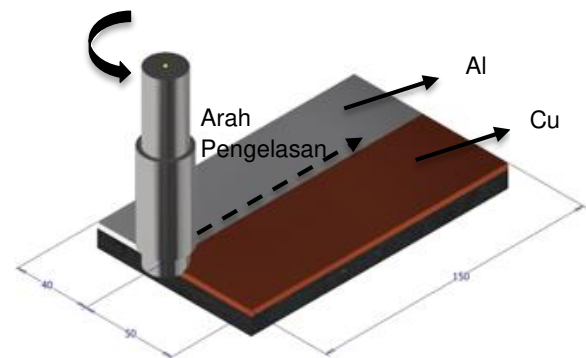
Penyambungan antara aluminium dan tembaga tidak dapat menggunakan penyambungan mekanis dikarenakan seringnya terjadi *defect* yang berupa celah (Messler Jr., 2008). Maka dari itu, dibutuhkan sambungan metalurgi (*metallurgical joint*) pada aplikasi *bimetal* untuk peralatan sambungan listrik. Hal ini dikarenakan sebuah peralatan listrik harus mampu menghantarkan elektron dari satu titik ke titik lainnya (Sharma, Khan, & Siddiquee, 2017). Namun, dikarenakan perbedaan yang cukup besar pada sifat fisik dan kimianya, proses penyambungan metalurgi aluminium dan tembaga lebih sulit dilakukan. Beragam metode pengelasan termasuk *fusion welding*, *brazing* dan *pressure welding* sudah diterapkan pada sambungan Al-Cu tetapi masih banyak masalah yang ditemui seperti oksidasi, kavitas dan retak (Ouyang, Yarrapareddy, & Kovacevic, 2006). Hal ini, disebabkan karena aluminium dan tembaga memiliki afinitas yang tinggi kepada satu sama lain pada temperatur lebih dari 120 °C dan menghasilkan intermetalik yang getas, berkekuatan rendah serta memiliki hambatan yang tinggi pada lapisan antar mukanya (Hu, Chen, Li, Hu, & Zhu, 2016). Hambatan yang tinggi ini yang nantinya akan membawa dampak buruk bagi sambungan listrik dikarenakan akan menurunkan nilai konduktivitas *bimetal* aluminium dan tembaga.

Artikel ini berfokus pada pengaruh kecepatan putar *pin tool* dan kecepatan pengelasan terhadap nilai konduktivitas hasil penyambungan aluminium dan tembaga melalui metode *Friction Stir Welding*.

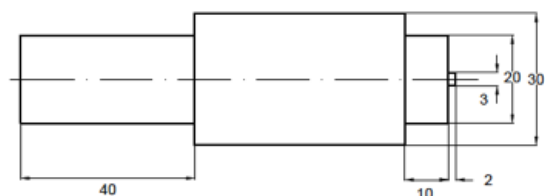
## II. Bahan dan Metode

### 2.1. Preparasi Benda Kerja dan *Pin Tool*

Pada penelitian ini, bahan yang digunakan adalah aluminium 6061 dan tembaga murni dengan ukuran masing-masing adalah 150 mm x 40 mm x 3 mm dan 150 mm x 50 mm x 3 mm. Aluminium diletakkan pada *advancing side* dan tembaga diletakkan pada *retreating side*. Gambar 1. menunjukkan skema proses *friction stir welding*. *Pin tool* yang digunakan terbuat dari *tool steel* H13 dengan dimensi seperti tertera pada Gambar 2. dan berputar secara *clockwise*, dengan sudut kemiringan 3 derajat. Kecepatan putar yang digunakan adalah 800, 1000, dan 1250 RPM. Sedangkan kecepatan pengelasannya adalah 10, 12.5, dan 16 mm/min.



Gambar 1. Skema proses FSW (mm)



Gambar 2. Dimensi pin tool (mm)

### 2.2. Analisis *Heat Input*

Analisis *heat input* yang digunakan pada penelitian ini menggunakan persamaan yang dibuat Khandar (Khandkar, Khan, & Reynolds, 2003), yaitu:

$$Q_{in} = \eta \frac{2\pi N \text{ Torque}}{v} \quad (1)$$

Dimana  $\eta$  adalah efisiensi heat transfer pada proses pengelasan (biasanya sekitar 0,9),  $N$  adalah kecepatan putar *tool* (rev/min) dan  $v$  adalah kecepatan pemakanan *tool* dalam satuan mm/min.

### 2.3. Pengukuran Resistansi dan Konduktivitas

Dari pengukuran ini akan didapat nilai resistansi benda uji. Nilai resistansi diukur menggunakan micro-ohmmeter Agilent 34420A. Micro-ohmmeter mengalirkan arus ( $I$ ) dengan besaran tertentu dan mengukur beda potensial antara dua titik benda uji dengan jarak ( $L$ ). *Microprocessor* micro-ohmmeter akan secara otomatis menghitung nilai resistansi ( $R$ ) dari jarak ( $L$ ).

$$R = \frac{\Delta V}{I} \quad (2)$$

Dari nilai resistansi ( $R$ ) yang didapat, dapat diketahui nilai resistivitas ( $\rho$ ) dengan memasukan nilai luas permukaan sambungan ( $A$ ) dan jarak dua *probe* ( $L$ ) ke dalam persamaan berikut:

$$\rho = \frac{RA}{L} \quad (3)$$

Dari nilai resistivitas didapat nilai konduktivitas listrik ( $\sigma$ ) melalui persamaan berikut:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (4)$$

### 2.4. Pengujian

Pengujian yang dilakukan meliputi pengujian struktur makro, pengujian *micro hardness*, pengamatan struktur mikro, dan pengujian XRD.

Pengujian struktur makro bertujuan untuk mengamati morfologi hasil sambungan FSW. Pengujian ini menggunakan kamera DSLR untuk mendokumentasikan gambar sambungan.

Pengujian *micro hardness* bertujuan untuk mengidentifikasi kekerasan yang terjadi pada daerah sambungan benda uji. Adapun permukaan yang di uji adalah penampang melintang benda uji target indentasinya adalah perbatasan antara daerah aluminium dan tembaga. Adapun alat yang digunakan adalah *Microhardness Tester Wilson 402MVD* pengujian kekerasan Vickers dengan gaya tekan 200 gram dan *dwelling time* 10 detik.

Pengamatan struktur mikro dilakukan dengan menggunakan mikroskop trinokular Olympus BX51M. Bagian yang diamati dari benda uji adalah bagian penampang (*cross*

*section*). Tujuan dari pengamatan ini adalah untuk mengetahui apakah terbentuk senyawa pada sambungan Al-Cu. Etsa yang digunakan adalah larutan Keller yang terdiri dari 2 ml HF, 3 ml HCl, 5 ml HNO<sub>3</sub> dan 190 ml air destilasi.

Pengujian XRD dilakukan untuk mengetahui senyawa yang terbentuk pada sambungan benda uji. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan alat uji X-Ray Diffraction dengan merk PANalytical X'Pert Pro.

## III. Hasil dan Pembahasan

### 3.1. Hasil Pengujian Makro

Berdasarkan pengamatan struktur makro, tidak didapati adanya cacat *cavity* yang terbentuk pada kecepatan rotasi yang rendah (800 RPM) dan kecepatan pengelasan yang tinggi (16 mm/min) seperti terlihat pada **Gambar 3**. dan aluminium yang teraduk ke daerah tembaga lebih sedikit dibandingkan benda uji dengan kecepatan rotasi yang tinggi (1250 RPM) dan kecepatan pengelasan yang rendah (10 mm/min) seperti terlihat pada **Gambar 4**.



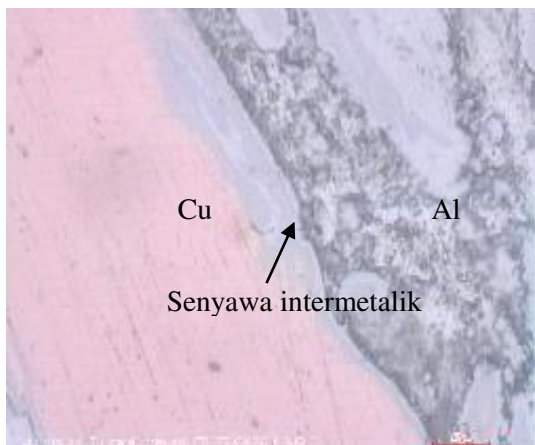
Gambar 3. Makrostruktur benda uji  $N = 800$  RPM dan  $v = 16$  mm/min



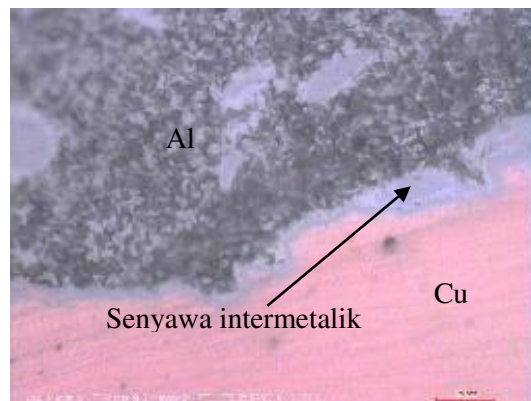
Gambar 4. Makrostruktur benda uji  $N = 1250$  RPM dan  $v = 10$  mm/min

### 3.2. Hasil Pengujian Struktur Mikro

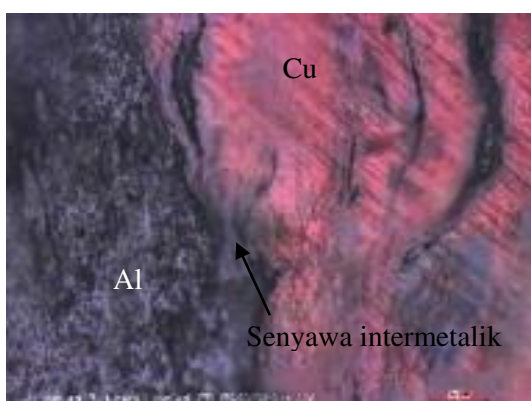
Sambungan aluminium dan tembaga sisi TMZ terdapat daerah yang tidak terkorosi akibat proses etsa. Daerah tembaga berwarna coklat dan daerah aluminium berwarna abu-abu yang terdapat bitnik-bintik hitam akibat proses pengetsaan. Daerah dengan warna abu-abu terang yang muncul pada sambungan Al-Cu merupakan senyawa intermetalik (Muthu & Jayabalan, 2016) sebagaimana terlihat pada **Gambar 5**. sampai dengan **Gambar 9**.



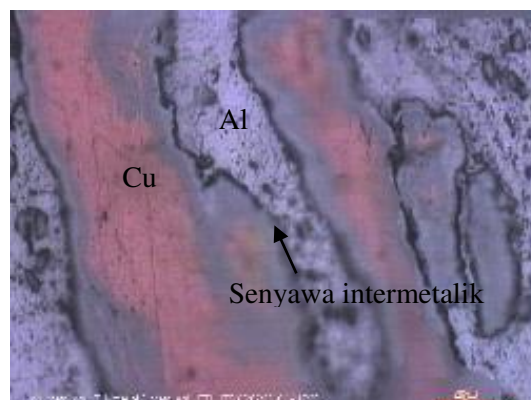
Gambar 5. Mikrostruktur benda uji N=800 RPM  
 $v=10 \text{ mm/min}$



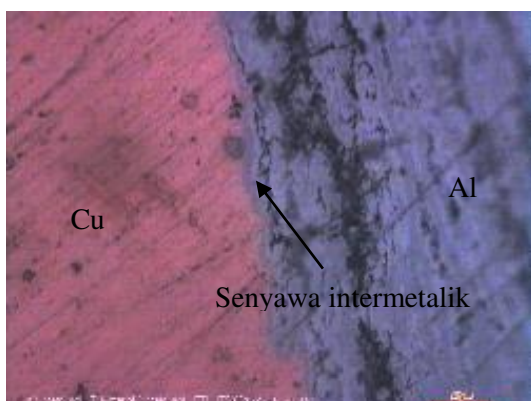
Gambar 8. Mikrostruktur benda uji N=1000 RPM  
 $v=10 \text{ mm/min}$



Gambar 6. Mikrostruktur benda uji N=800 RPM  
 $v=12.5 \text{ mm/min}$



Gambar 9. Mikrostruktur benda uji N=1250 RPM  
 $v=10 \text{ mm/min}$

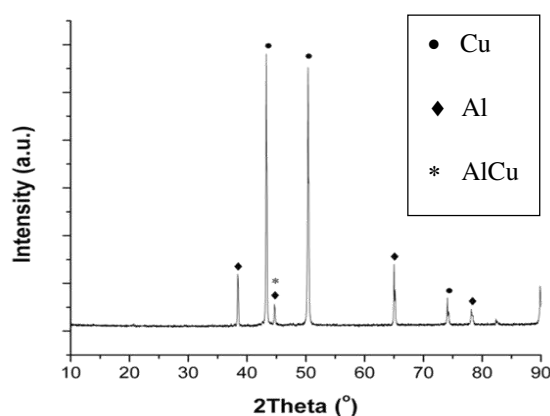


Gambar 7. Mikrostruktur benda uji N=800 RPM  
 $v=16 \text{ mm/min}$

Daerah permukaan antar muka sambungan aluminium dan tembaga rentan terhadap nukleasi dan pertumbuhan senyawa intermetalik pada temperatur lebih besar dari  $120 \text{ }^\circ\text{C}$  (Abbasi, Taheri, & Salehi, 2001). Setelah dilakukan pengujian XRD, daerah tersebut diidentifikasi terbentuk senyawa intermetalik dengan intensitas kecil.

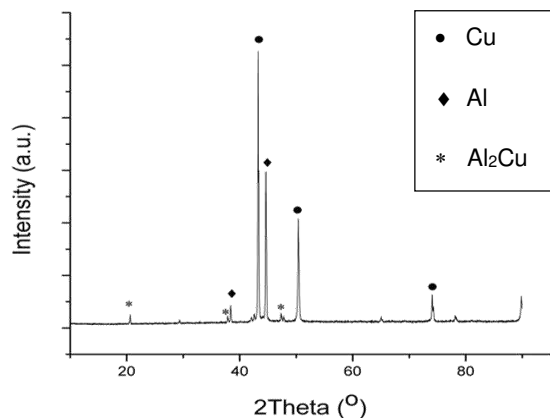
### 3.3. Hasil Pengujian XRD

Pada sambungan aluminium dan tembaga terbentuk senyawa intermetalik dimana senyawa intermetalik yang terbentuk adalah  $\text{AlCu}$  dan  $\text{Al}_2\text{Cu}$  dengan intensitas yang kecil sebagaimana terlihat pada Gambar 10. Sampai dengan Gambar 13.

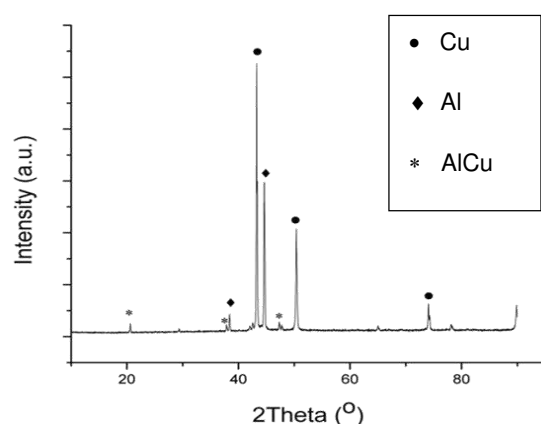


Gambar 10. Hasil XRD Benda Uji N=800 RPM  
 $v=12.5 \text{ mm/min}$

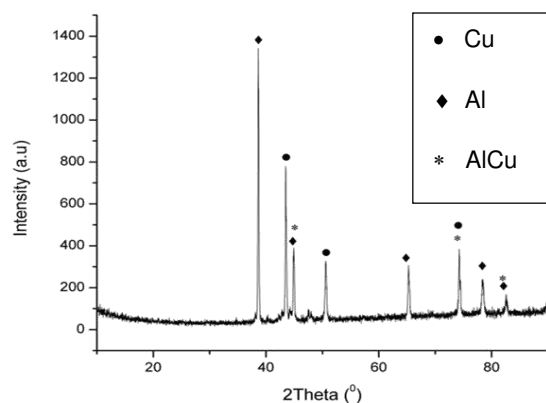




Gambar 11. Hasil XRD Benda Uji N=800 RPM  
 $v=16$  mm/min



Gambar 12. Hasil XRD Benda Uji N=1000 RPM  
 $v=16$  mm/min



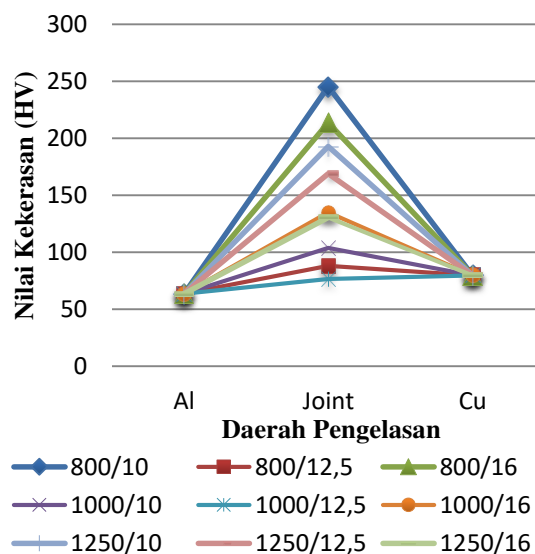
Gambar 13. Hasil XRD Benda Uji N=1250 RPM  
 $v=10$  mm/min

### 3.4. Hasil Pengujian *Micro Hardness*

Pembentukan senyawa intermetalik diperkuat dengan data dari pengujian *micro hardness*. Dari pengujian kekerasan yang dilakukan didapati 8 benda uji memiliki kekerasan yang lebih tinggi dibanding *base metal* aluminium seperti yang tertera pada

**Gambar 14.** Pada benda uji N=1000 RPM dan  $v=12,5$  mm/min memiliki kekerasan yang rendah (76,433 HV). Nilai kekerasan yang kecil mengindikasikan pembentukan senyawa intermetalik yang lebih sedikit dibandingkan dengan variabel benda uji lainnya.

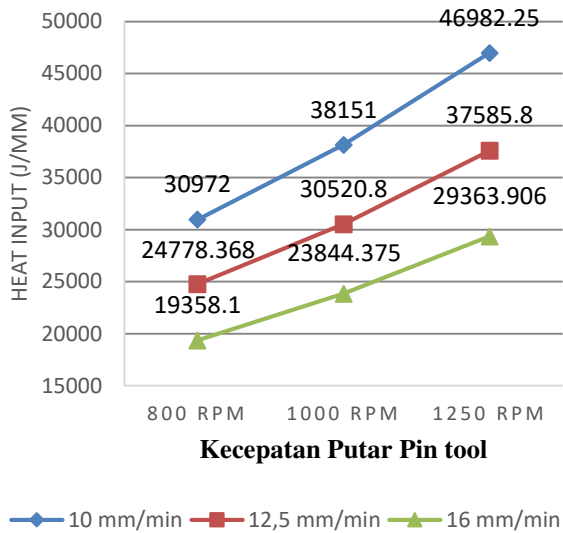
Nilai kekerasan pada sambungan aluminium dan tembaga dipengaruhi oleh kehadiran senyawa intermetalik. Daerah permukaan antar muka sambungan Al-Cu rentan terhadap nukleasi dan pertumbuhan senyawa intermetalik pada temperatur lebih besar dari  $120$  °C (Abbasi, Taheri, & Salehi, 2001). Senyawa AlCu dan Al<sub>2</sub>Cu termasuk ke dalam senyawa yang memiliki ikatan kovalen yang mengakibatkan memiliki nilai kekerasan yang lebih besar dibanding material penyusunnya (Aluminium atau Tembaga) (Gueydan, Domengès, & Hug, 2014). Pada penelitian lain didapati nilai kekerasan pada sambungan aluminium dan tembaga adalah 180 HV (Alshemary, 2015). Kekerasan ini dipengaruhi keberadaan senyawa intermetalik AlCu dan Al<sub>4</sub>Cu<sub>9</sub> yang terbentuk pada proses pengelasan (Alshemary, 2015).



Gambar 14. Nilai Kekerasan Benda Uji

### 3.5. Hasil Analisis *Heat Input*

Nilai *heat input* akan semakin tinggi dengan naiknya kecepatan putar *pin tool* dan turunnya kecepatan pengelasan seperti yang dapat dilihat pada Gambar 15.



Gambar 15 Heat Input Benda Uji

Hal ini, sesuai dimana semakin tinggi kecepatan putar mata pahat (atau semakin rendahnya kecepatan pengelasan) menghasilkan heat input yang lebih tinggi (Elangovan & Balasubramanian, 2007). Dan dengan bertambahnya nilai heat input, menyebabkan meningkatnya terbentuknya senyawa intermetalik (Barekatain, Kazeminezhad, & Kokabi, 2014) (Liu, Shi, Wang, Wang, & Zhang, 2008) (Xue, Ni, Wang, Xiao, & Ma, 2011).

### 3.6. Hasil Pengukuran Nilai Resistansi dan Perhitungan Nilai Konduktivitas

Nilai resistansi dari setiap benda uji dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Nilai Resistansi Benda Uji

Kecepatan Putar	v = 10 mm/min	v = 12,5 mm/min	v = 16 mm/min
800 RPM	73,33 $\mu\Omega$	92,00 $\mu\Omega$	106,00 $\mu\Omega$
1000 RPM	103,00 $\mu\Omega$	89,67 $\mu\Omega$	96,33 $\mu\Omega$
1250 RPM	87,00 $\mu\Omega$	89,00 $\mu\Omega$	105,33 $\mu\Omega$

Berdasarkan dari nilai resistansi yang didapat, maka nilai resistivitas dan konduktivitas listrik dapat diperoleh Tabel 2. dan Tabel 3. yang menunjukkan nilai resistivitas dan konduktivitas dari semua benda uji.

Tabel 2. Nilai Resistivitas Benda Uji Dalam Satuan  $\Omega \text{ mm}^2 \text{ m}^{-1}$

Kecepatan Putar	v = 10 mm/min	v = 12,5 mm/min	v = 16 mm/min
800 RPM	0,036	0,036	0,042
1000 RPM	0,041	0,036	0,038
1250 RPM	0,034	0,035	0,042

Tabel 3. Nilai Konduktivitas Listrik Benda Uji dalam Satuan  $\text{m } \Omega^{-1} \text{ mm}^{-2}$

Kecepatan Putar	v = 10 mm/min	v = 12,5 mm/min	v = 16 mm/min
800 RPM	27,272	27,173	23,585
1000 RPM	24,272	27,881	25,950
1250 RPM	28,735	28,090	23,734

Dari nilai konduktivitas didapat dapat dilihat bahwa terdapat kecenderungan tren naik pada setiap kenaikan kecepatan rotasi putar *pin tool*. Sedangkan terdapat kecenderungan tren naik pada penurunan kecepatan pengelasan di kecepatan putar *pin tool* 800 dan 1250 RPM. Variabel pengelasan v = 12,5 mm/min memiliki ketiga nilai konduktivitas yang berada di atas nilai konduktivitas rata-rata dari semua benda uji (26,299  $\text{m } \Omega^{-1} \text{ mm}^{-2}$ ).

Keberadaan senyawa intermetalik pada sambungan aluminium dan tembaga berpengaruh terhadap nilai konduktivitas sambungan. Nilai konduktivitas dari senyawa intermetalik sepertujuh dari nilai konduktivitas tembaga atau seperlima dari nilai konduktivitas aluminium, menunjukkan bahwa karena pembentukan senyawa ini konduktivitas total sambungan Al-Cu nilainya berkurang (Kadian & Biswas, 2018).

Konduktivitas diartikan sebagai indikasi kemudahan suatu material untuk mengalirkan arus listrik. Pada logam, mekanisme perpindahan arus listrik dibawa oleh elektron atau disebut sebagai konduksi elektrik. Pada senyawa IMC AlCu dan Al<sub>2</sub>Cu, didapati bahwa keduanya merupakan senyawa dengan ikatan kovalen (Gueydan, Domengès, & Hug, 2014). Senyawa kovalen memiliki konfigurasi yang stabil dikarenakan atom-atom yang berdekatan berbagi elektronnya. Jika dibandingkan dengan

logam, elektron valensi dari atom logam tidak berikatan pada apapun. Hal ini memungkinkan untuk terbentuknya lautan elektron bebas. Dibawah medan listrik, elektron bebas bergerak melalui logam mengalirkan muatan listrik saat bergerak (Callister Jr. & Rethwisch, 2012). Dengan tidak adanya elektron bebas pada senyawa intermetalik tersebut, maka kemampuan untuk mengalirkan arus pada senyawa intermetalik menjadi buruk.

#### IV. Kesimpulan

Dari analisa yang telah dilakukan, didapati bahwa variabel dengan kecepatan pengelasan 12.5 mm/min di semua kecepatan putar *pin tool* adalah variabel yang paling optimum. Hal ini dikarenakan variabel ini memiliki ketiga nilai konduktivitas yang berada di atas nilai konduktivitas semua benda uji. Kekerasan yang meningkat menunjukkan bahwa adanya senyawa intermetalik AlCu dan Al<sub>2</sub>Cu yang banyak pula dan hal ini mempengaruhi nilai konduktivitas sambungan aluminium dan tembaga.

#### Daftar Pustaka

- Abbasi, M., Taheri, A. K., & Salehi, M. T. (2001). Growth rate of intermetallic compounds in Al/Cu bimetal produced by cold roll welding process. *Journal of Alloys and Compounds*, 319(1-2), 233-241.
- Al-Roubaiy, A. O., Nabat, S. M., & Batako, A. D. (2014). Experimental and theoretical analysis of friction stir welding of Al–Cu joints. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 71(9-12), 1631-1642.
- Alshemary, K. K. (2015). The Effect of Rotational Speeds on The Mechanical Properties of Dissimilar Friction Stir Welding for Commercially Pure Aluminium and Copper. *Iraqi Journal of Mechanical and Material Engineering*, 15(2), 117-126.
- Barekatin, H., Kazeminezhad, M., & Kokabi, A. H. (2014). Microstructure and Mechanical Properties in Dissimilar Butt Friction Stir Welding of Severely Plastic Deformed Aluminum AA 1050 and Commercially Pure Copper Sheets. *Journal of Materials Science & Technology*, 30(8), 826-834.
- Braunovic, M., & Aleksandrov, N. (1993). Effect of electrical current on the morphology and kinetics of formation of intermetallic phases in bimetallic aluminum-copper joints. *Proceedings of IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, 261-268.
- Callister Jr., W. D., & Rethwisch, D. G. (2012). *Fundamentals of materials science and engineering: An integrated approach*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Elangovan, K., & Balasubramanian, V. (2007). Influences of pin profile and rotational speed of the tool on the formation of friction stir processing zone in AA2219 aluminium alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 459(1-2), 7-18.
- Gueydan, A., Domengès, B., & Hug, E. (2014). Study of the intermetallic growth in copper-clad aluminum wires after thermal aging. *Intermetallics*, 50, 34-42.
- Hu, Y., Chen, Y., Li, L., Hu, H., & Zhu, Z. (2016). Microstructure and properties of Al/Cu bimetal in liquid–solid compound casting process. *Trans. Nonferr. Metal. Soc*, 26, 1555-1563.
- Kadian, A. K., & Biswas, P. (2018). The study of material flow behaviour in dissimilar material FSW of AA6061 and Cu-B370 alloys plates. *Journal of Manufacturing Processes*, 34, 96-105.
- Khandkar, M., Khan, J. A., & Reynolds, A. P. (2003). Prediction of temperature distribution and thermal history during friction stir welding: Input torque based model. *Science and Technology of Welding and Joining*, 8(3), 165-174.
- Liu, P., Shi, Q., Wang, W., Wang, X., & Zhang, Z. (2008). Microstructure and XRD analysis of FSW joints for copper T2/aluminium 5A06 dissimilar materials. *Materials Letters*, 62(25), 4106-4108.
- Messler Jr., R. W. (2008). *Principles of welding: Processes, physics, chemistry, and metallurgy*. New Jersey: John Wiley & Sons.

- Milčić, M., Burzić, Z., Radisavljević, I., Vuherer, T., Milčić, D., & Grabulov, V. (2018). Experimental investigation of fatigue properties of FSW in AA2024-T351. *Procedia Structural Integrity*, 13, 1977-1984.
- Muthu, M. F., & Jayabalan, V. (2016). Effect of pin profile and process parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir welded Al–Cu joints. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 26(4), 984-993.
- Ouyang, J., Yarrapareddy, E., & Kovacevic, R. (2006). Microstructural evolution in the friction stir welded 6061 aluminum alloy (T6-temper condition) to copper. *Journal of Materials Processing Technology*, 172(1), 110-122.
- Sharma, N., Khan, Z. A., & Siddiquee, A. N. (2017). Friction stir welding of aluminum to copper-An overview. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 27(10), 2113-2136.
- Silveria, V., & Mury, A. (1987). Analysis of the behavior of bimetallic joints (Al/Cu). *J. Microstruct. Sci.*, 14, 277-287.
- Xue, P., Ni, D., Wang, D., Xiao, B., & Ma, Z. (2011). Effect of friction stir welding parameters on the microstructure and mechanical properties of the dissimilar Al–Cu joints. *Materials Science and Engineering: A*, 528(13-14), 4683-4689.