

# PENGARUH WAKTU PENGELASAN TERHADAP REAKSI ANTARMUKA PADA SAMBUNGAN ALUMINIUM AL6061 DAN BAJA GALVANIS

**Sigit Edy Purwanto, Mustakim, Triyono, Nurul Muhayat**  
Program Studi Teknik Mesin, Institut Teknologi Nasional Yogyakarta  
email: [sigitedyp@itny.ac.id](mailto:sigitedyp@itny.ac.id)

## Abstrak

Bahan bakar merupakan kebutuhan yang sangat penting bagi alat transportasi. Saat ini, cadangan bahan bakar fosil semakin berkurang. Untuk menghemat bahan bakar diperlukan alat transportasi yang ringan. Konstruksi yang ringan dapat diperoleh dengan menggabungkan dua atau lebih jenis material. Jenis sambungan yang sesuai untuk mendapatkan konstruksi yang ringan adalah sambungan las. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui sifat mampu las antara baja galvanis dengan aluminium Al6061. Metode pengelasan yang digunakan adalah Resistance Spot Welding (RSW). Sifat mampu las dari kedua material dapat diketahui dari jenis senyawa intermetalik yang terbentuk pada antarmuka lasan. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa reaksi antarmuka yang terbentuk untuk waktu pengelasan 4 dan 5 siklus adalah senyawa intermetalik FeAl dengan ketebalan masing-masing 19,25  $\mu\text{m}$  dan 10,52  $\mu\text{m}$ , untuk waktu pengelasan 6 siklus adalah senyawa intermetalik FeAl<sub>3</sub> dengan ketebalan 8,07  $\mu\text{m}$ . Kekekaran tertinggi 623,1 HV0.1 dan kekerasan terendah 572,2 HV0.1.

**Kata kunci:** Aluminium Al6061, Baja Galvanis, RSW, Senyawa Intermetalik

## Abstract

Fuel is a very important in transportation. Unfortunately, the amount of fossil fuel reserve is decreasing. Using lightweight material for vehicle is one way to save fossil fuel. Lightweight construction can be obtained by combining two or more types of material. The right type of connection to get a lightweight construction is a welded joint. This study aimed to determine the properties of weldability between galvanized steel and aluminum Al6061. The welding method used was Resistance Spot Welding (RSW). The weldability of the two materials could be seen from the types of intermetallic compounds formed at the weld interface. The results of this study indicated that the formed interface reaction was FeAl intermetallic compound layer with a thickness of 19,25  $\mu\text{m}$  and 10,52  $\mu\text{m}$  respectively for 4 and 5 cycles of welding time, and FeAl<sub>3</sub> intermetallic compound layer with a thickness of 8,07  $\mu\text{m}$  for 6 cycles of the welding time. The highest hardness was 623.1 HV0.1 and the lowest hardness was 572.2 HV0.1.

**Keywords:** Aluminum, Galvanized Steel, RSW, Intermetallic Compound

## 1. Pendahuluan

Alat transportasi seperti sepeda motor, mobil, kereta api, pesawat terbang maupun kapal laut merupakan kebutuhan yang sangat penting. Dengan semakin berkurangnya cadangan bahan bakar fosil, maka diperlukan alat transportasi yang murah dan hemat energi. Struktur yang ringan merupakan salah satu cara untuk menghemat energi [1]. Oleh karena itu, pengurangan berat lebih lanjut pada mobil sudah menjadi suatu keharusan [2]. Struktur hibrida dari paduan aluminium dan baja disarankan karena mengurangi berat mobil untuk meningkatkan efisiensi bahan bakar dan mengontrol polusi udara [3].

Pengelasan logam tak sejenis (*dissimilar metals*) antara aluminium dan baja semakin banyak diterapkan di bidang teknik karena tuntutan desain dan ekonomi. Namun, penyambungan paduan aluminium dan baja mengalami kesulitan besar dengan pengelasan fusi karena sejumlah besar senyawa intermetalik yang rapuh terbentuk pada sambungan [4]. Menyambung secara langsung aluminium dengan baja sering menemui kesulitan karena perbedaan besar dalam sifat termo-fisik antara aluminium dan besi, dan pembentukan senyawa intermetalik Fe-Al yang mudah rapuh pada temperatur tinggi yang memperburuk sifat mekanik sambungan [5].

Baja memadukan sifat yang diinginkan dari kekuatan tinggi, modulus elastisitas tinggi dan harga murah, sedangkan paduan aluminium yang rendah kepadatan, memiliki konduktivitas listrik yang baik dan tahan korosi, dan relatif mudah dalam hal fabrikasi [6]. Pada pengelasan bahan tak sejenis, (*dissimilar materials*) terutama dengan perbedaan yang tinggi pada titik lelehnya, evolusi struktur mikro dan perilaku aliran material adalah masalah dasar pada studi mampu las [7].

Dewasa ini banyak penelitian yang dilakukan untuk memenuhi tuntutan desain dan ekonomi tersebut. Hasil terbaik untuk lasan baja-aluminium hibrida menggunakan proses berkas elektron (*electron beam process*) dapat dicapai dengan lapisan menengah dari titanium [8]. Las TIG (*Tungsten Inert Gas*) adalah proses pengelasan yang cocok untuk penyambungan pada penampang yang tipis [9]. *Magnetic pulse welding* (MPW) merupakan alat yang sangat baik untuk memperoleh sambungan lembaran aluminium dan baja [3]. Proses *Resistance Spot Welding* (RSW) digunakan secara luas untuk menyambung komponen baja karbon rendah seperti badan dan sasis mobil, truk, trailer, bus, rumah mobil, rumah motor, kendaraan rekreasi dan rails jalan mobil penumpang, serta lemari, perabot kantor, dan barang manufaktur industri [10]. Memahami karakteristik antarmuka dari sambungan baja/paduan aluminium adalah perlu sekali untuk mengoptimasi hubungan pengolahan-sifat sehingga memperoleh sambungan yang kuat [11].

### 3. Metode Penelitian

Material yang dipergunakan dalam pengelasan dengan menggunakan metode RSW adalah paduan aluminium Al6061 dengan dimensi 60 mm × 30 mm × 6 mm dan baja galvanis dengan dimensi 60 mm × 30 mm × 2 mm. Komposisi kimia Al6061 dan baja Galvanis diberikan dalam Tabel 1 dan Tabel 2.

**Tabel 1.** Komposisi Kimia Al6061 [12]

Si	Fe	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn	Ti	Sn	Mg	Cr	Al
0,43	0,43	0,24	0,139	<0,05	0,024	0,006	0,022	0,001	0,802	0,154	Balance

**Tabel 2.** Komposisi Kimia Baja Galvanis [13]

C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	Nb	Fe
0,065	0,404	0,018	0,017	0,095	0,017	0,032	0,004	0,053	0,001	Base

*Resistance Spot Welding* adalah metode pengelasan yang menggunakan tahanan listrik dimana dua permukaan plat yang akan disambung ditekan satu sama lain oleh dua buah elektroda. Ketika arus listrik dialirkan melalui kedua buah elektroda maka terjadi sambungan las pada posisi jepitan elektroda. Hasil lasan berupa titik. Bentuk dan ukuran titik las dipengaruhi ujung elektroda. Arus pengelasan yang dipergunakan adalah 8 kA dan waktu pengelasan masing-masing adalah 4 siklus, 5 siklus dan 6 siklus.

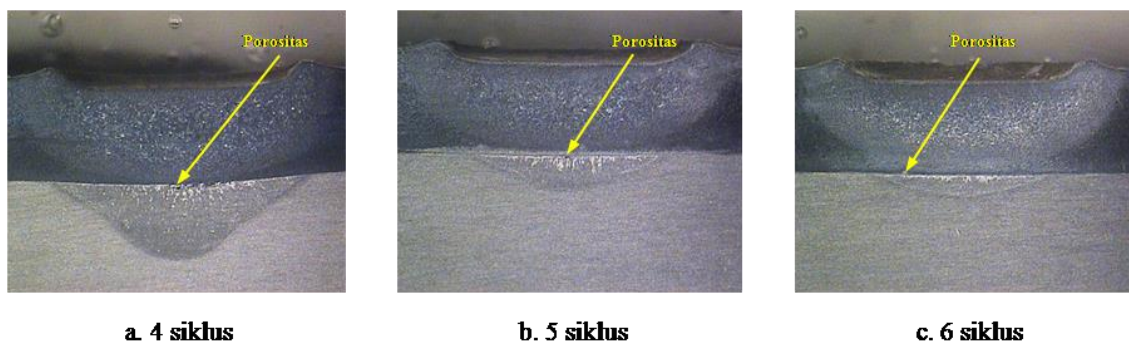
Pengujian pada penelitian ini menggunakan foto makro, foto mikro, dan pengujian SEM/EDX (*Scanning Electron Microscop/Energy Dispersive X-ray*) sehingga struktur mikro dari sambungan tersebut dapat diketahui secara lengkap. Sedangkan untuk mengetahui nilai kekerasan pada spesimen digunakan uji kekerasan Vickers.

### 3. Hasil dan Analisis

#### 3.1. Foto Makro

Pengamatan foto makro merupakan salah satu elemen yang sangat penting untuk mengetahui sejauh mana fenomena yang terjadi pada daerah antarmuka lasan. Dari pengamatan foto makro ini dapat diperoleh data mengenai porositas yang mungkin terjadi, terjadinya difusi dan keretakan pada antarmuka lasan.

Spesimen hasil pengelasan dipotong di tengah-tengah sambungan dan untuk melihat struktur penampang melintangnya dapat digunakan mikroskop optik makro dan mikro. Pengamatan foto makro pada penelitian ini menggunakan mikroskop optik dengan perbesaran 12,5 kali.



**Gambar 1.** Foto Makro Spesimen

Waktu pengelasan merupakan salah satu parameter yang sangat berpengaruh terhadap hasil sambungan RSW. Peningkatan waktu pengelasan juga meningkatkan masukan panas ketika kondisi lainnya konstan [14]. Waktu pengelasan merupakan salah satu faktor yang sangat penting sebagai hasil dari pengaruh jumlah masukan panas [15].

Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa semakin meningkatnya waktu pengelasan mempunyai dampak terhadap porositas yang terbentuk pada daerah peleburan seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Seiring dengan peningkatan waktu pengelasan, porositas yang terjadi pada daerah peleburan semakin berkurang. Hal ini terjadi karena sebagian besar dari masukan panas dipergunakan untuk pertumbuhan butir pada daerah peleburan. Gambar 1 juga menunjukkan adanya perbedaan luas daerah *nugget* pada material baja galvanis dan paduan aluminium Al6061. Hal ini disebabkan karena kedua material mempunyai ketebalan yang tidak sama dan perbedaan konduktivitas thermal dari kedua material tak sejenis.

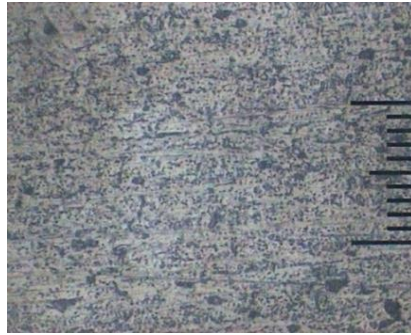
Porositas terbentuk akibat adanya penyusutan (*shrinkage*) pada saat *nugget* mengalami proses pembekuan. Panas yang terjadi pada saat pengelasan ditransfer ke lingkungan luar. Dengan demikian bagian terluar dari *nugget* akan mengalami pembekuan terlebih dahulu sehingga leburan pada bagian tengah akan tertarik ke arah luar *nugget*. Pengelasan dengan menggunakan RSW pada lembaran aluminium cenderung menghasilkan cacat seperti porositas [16]. Beberapa inklusi dapat menyebabkan porositas las, yang umumnya dianggap tidak diinginkan tapi benar-benar tidak dapat diterima jika melampaui batasan tertentu [17]. Pengaturan mesin seperti waktu pengelasan yang tidak memadai dan peningkatan arus pengelasan juga dapat mengakibatkan porositas. Porositas moderat yaitu porositas yang terjadi dekat pusat *nugget* las biasanya dapat diterima. Cacat akibat porositas tersebut tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kekuatan statis dan dinamis dari sambungan las [10]. Hal ini dikarenakan tegangan pada daerah tengah sambungan las bernilai nol.

### 3.2. Foto Mikro

Untuk melihat struktur mikro pada pengelasan dengan RSW antara paduan aluminium Al6061 dan baja galvanis perlu dilakukan etsa pada sampel lasan. Material yang akan dietsa harus dipotong terlebih dahulu pada pusat lasan. Kemudian, pada daerah potongan tersebut dihaluskan dengan menggunakan amplas secara bertahap. Setelah dihaluskan dengan amplas, daerah potongan tersebut dipoles dengan menggunakan autosol. Bahan untuk larutan etsa aluminium menggunakan cairan *kellers reagent* dengan komposisi campuran 47,5 ml aquades, 1,25 ml  $\text{HNO}_3$ , 0,75 ml  $\text{HCl}$  dan 0,5 ml  $\text{HF}$ , dan aluminium dicelupkan selama lebih kurang 2 menit. Sedangkan bahan untuk larutan etsa baja galvanis yaitu 1 ml  $\text{HNO}_3$  dan 15 ml aquades, dan baja galvanis dicelupkan selama 1 – 2 siklus.

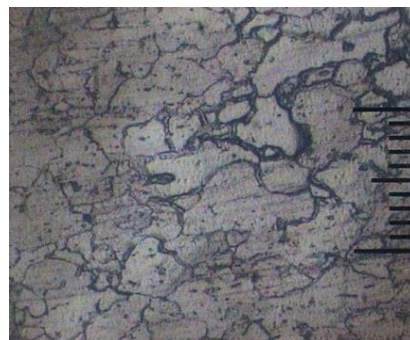
Uji struktur mikro ini dilakukan dengan menggunakan foto mikro pada daerah logam dasar dan HAZ. Logam dasar merupakan daerah terpengaruh panas tetapi tidak menyebabkan terjadinya perubahan struktur mikro. HAZ merupakan daerah terpengaruh panas yang berdekatan dengan daerah lasan dan mengakibatkan terjadinya perubahan struktur mikro tetapi tidak sampai terjadi peleburan. Selama proses pengelasan daerah ini mengalami siklus termal pemanasan dan pendinginan yang lebih lambat dari daerah lasan sehingga daerah ini merupakan daerah yang paling kritis pada sambungan las.

Tujuan dari pengamatan struktur mikro adalah untuk mengetahui susunan, bentuk dan ukuran butir pada daerah lasan dan HAZ. Struktur mikro pada pengelasan dipengaruhi beberapa faktor, antara lain: kuat arus, waktu pengelasan dan masukan panas.



**Gambar 2.** Struktur mikro logam dasar paduan aluminium Al6061

Hasil uji struktur mikro logam dasar paduan aluminium Al6061 dengan perbesaran 200 kali pada Gambar 2 secara umum berbentuk dendrit dengan warna gelap yang menunjukkan fasa aluminium-magnesium (Al-Mg) dan warna terang yang menunjukkan fasa  $\alpha$ -aluminium [18].

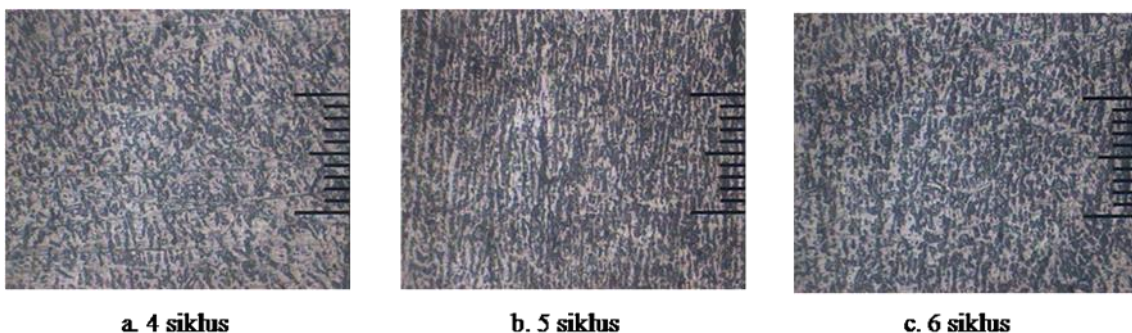


**Gambar 3.** Struktur mikro logam dasar baja galvanis

Sedangkan hasil uji struktur mikro logam dasar baja karbon rendah dengan perbesaran 200 kali terdiri dari struktur ferit yang ditunjukkan oleh warna yang lebih terang dan perlit ( $\text{Fe} + \text{Fe}_3\text{C}$ ) yang ditunjukkan oleh warna yang lebih gelap seperti ditunjukkan pada Gambar 3.

Untuk semua variasi waktu pengelasan struktur mikro daerah logam dasar baja galvanis adalah sama, karena daerah logam dasar merupakan logam dasar dimana panas dan suhu pengelasan tidak menyebabkan terjadinya perubahan-perubahan struktur dan sifat.

Secara umum, struktur mikro pengelasan RSW pada paduan aluminium dapat dibagi menjadi tiga daerah yang berbeda: logam dasar, daerah terpengaruh panas, dan daerah lebur [19].



**a. 4 siklus**

**b. 5 siklus**

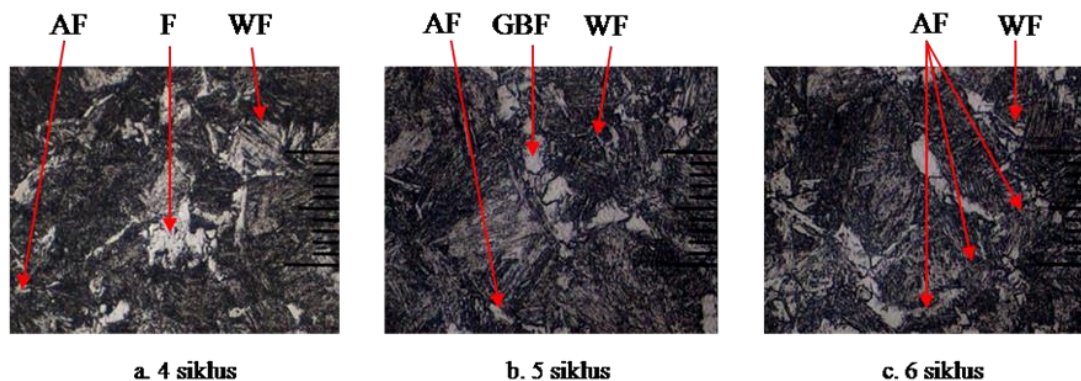
**c. 6 siklus**

**Gambar 4.** Struktur mikro pada *nugget* paduan aluminium Al6061

Gambar 4 menunjukkan struktur mikro pada *nugget* paduan aluminium Al6061. Daerah ini mempunyai bentuk butiran yang mengalami perubahan ukuran butir dan cenderung menjadi lebih kecil. Pada daerah ini juga terjadi penghalusan ukuran butir. Pengurangan ukuran butir di daerah lebur adalah karena laju pendinginan yang tinggi selama pembekuan, berlawanan dengan pengurangan panas yang dialami pada daerah HAZ, yang menyebabkan pertumbuhan butir [19]. Daerah yang berwarna terang



merupakan fasa  $\alpha$  (aluminium), sedangkan yang berwarna gelap merupakan fasa Al + Mg<sub>2</sub>Si dengan senyawa aluminium-silikon-magnesium (Al-Si-Mg) yang berbentuk presipitat.



**Gambar 5.** Struktur mikro pada *nugget* baja galvanis

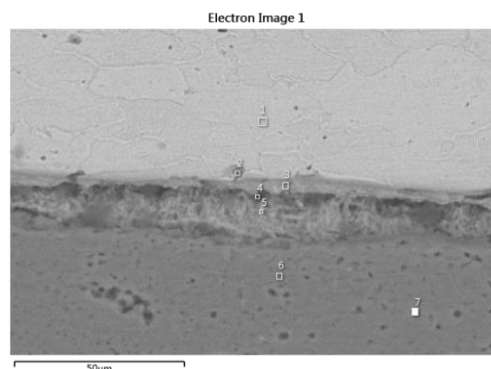
Struktur mikro pada baja galvanis yang dihasilkan oleh pengelasan RSW terdiri dari *Widmanstatten Ferrite (WF)*, *Grain Boundary Ferrite (GBF)*, dan *Acicular Ferrite (AF)*. Struktur tersebut terbentuk karena pada daerah logam las mengalami siklus termal yaitu pemanasan sampai suhu tertentu yang kemudian diikuti dengan pendinginan yang cepat. Jenis mikrostruktur yang terbentuk di *nugget* pada baja antara lain terdiri dari *Widmanstatten Ferrite*, *Grain Boundary Ferrite*, dan *Acicular Ferrite* dan tergantung pada laju pendinginannya [20]. Struktur *Acicular Ferrite* adalah struktur yang diharapkan pada setiap proses pengelasan karena mempunyai ketangguhan yang lebih tinggi dibandingkan struktur yang lain. *Acicular Ferrite* mempunyai sifat sebagai *interlocking structure* yaitu mampu menghambat laju perambatan retak [21].

Pada waktu pengelasan 4 siklus (Gambar 5a) terlihat struktur *Ferrit*, *Acicular Ferrit* dan *Widmanstatten Ferrite* dalam jumlah yang cukup banyak. *Widmanstatten Ferrite* ini muncul di *nugget* dan HAZ dekat daerah lebur. Semakin jauh dari daerah lebur, *Widmanstatten Ferrite* semakin tidak terlihat. Pada waktu pengelasan 5 siklus (Gambar 5b) terlihat struktur *Widmanstatten Ferrite* dengan jumlah yang masih cukup banyak dan juga terlihat struktur *Acicular Ferrit* dan *Grain Boundary Ferrite*. Pada waktu pengelasan 6 siklus (Gambar 5c) terlihat struktur *Acicular Ferrite* yang tersebar di beberapa tempat. Terbentuknya *Acicular Ferrit* ini disebabkan oleh laju pendinginan yang relatif cepat.

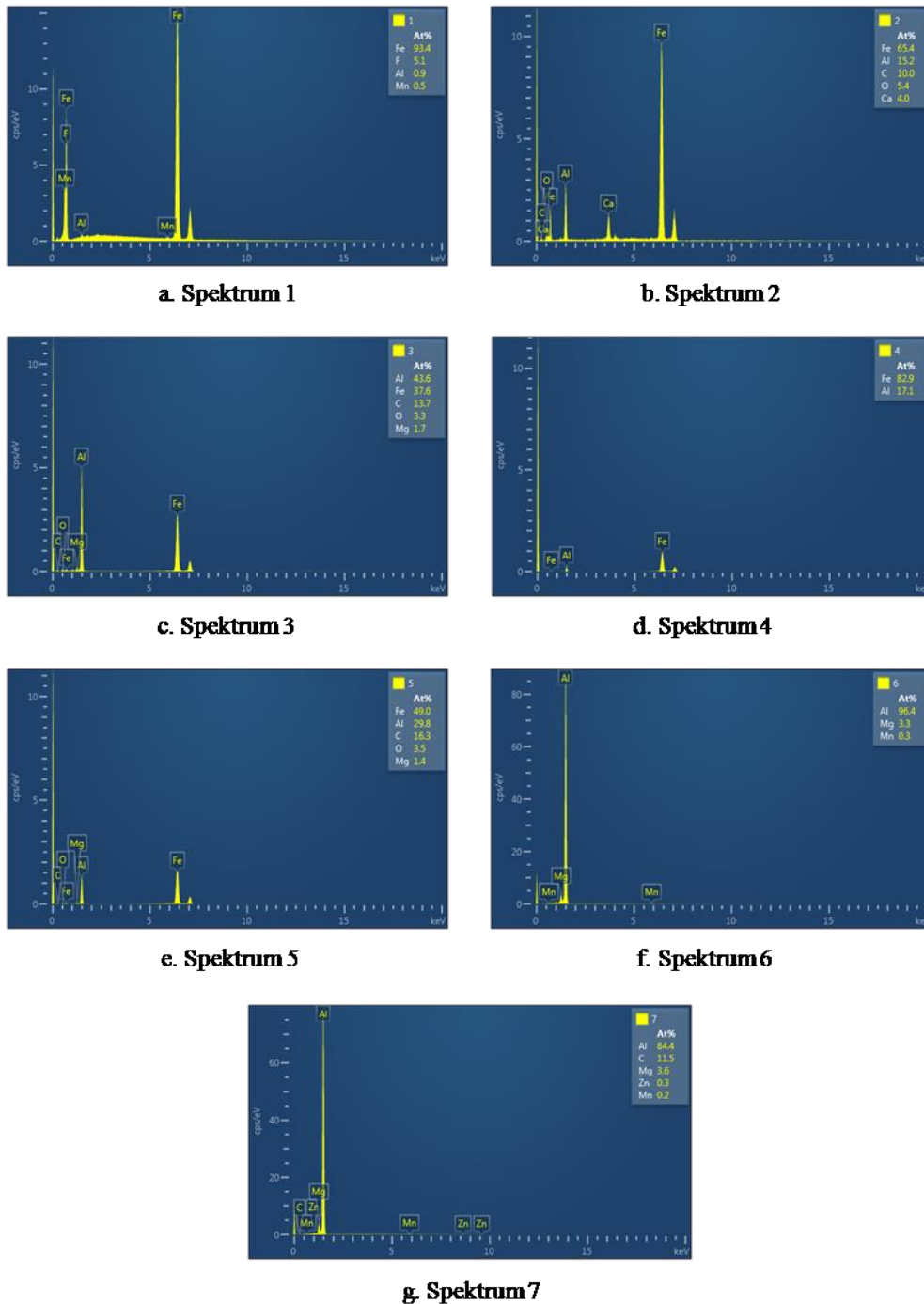
Dalam pembentukannya *Acicular Ferrite* terbentuk pada suhu yang lebih rendah dibandingkan *Widmanstatten Ferrite*. *Acicular Ferrite* terbentuk pada suhu 650°C, sedangkan *Widmanstatten Ferrite* terbentuk pada suhu 650°C – 750°C.

### 3.3. SEM/EDX

Pengujian SEM/EDX (*Scanning Electron Microscop/Energy Dispersive X-ray*) dilakukan untuk mengetahui kelarutan aluminium pada baja yang terjadi pada material baja dan kelarutan baja pada aluminium yang terjadi pada material aluminium. Dari pengujian ini juga diketahui senyawa intermetalik yang terbentuk pada antarmuka lasan dan ketebalan senyawa tersebut.

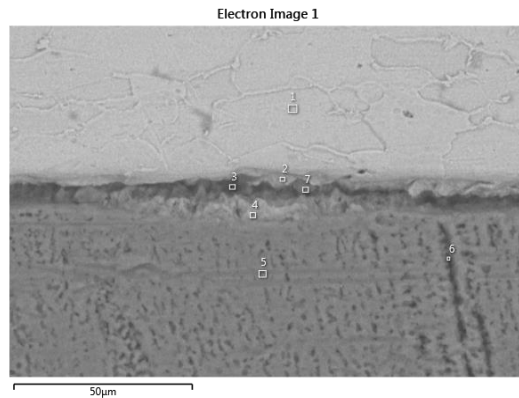


**Gambar 6.** SEM spesimen dengan waktu pengelasan 4 siklus

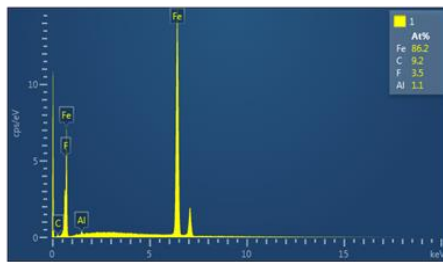


**Gambar 7.** EDX spesimen dengan waktu pengelasan 4 siklus

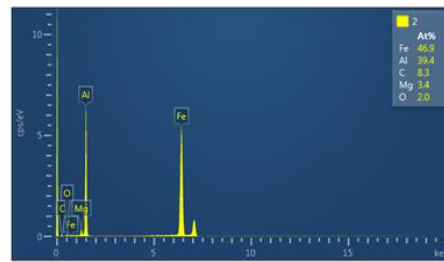
Hasil uji SEM-EDX spesimen dengan arus pengelasan 8 kA dan waktu pengelasan 4 siklus memperlihatkan bahwa jumlah atom aluminium terlarut ke baja pada spektrum 1 – 5 berturut turut adalah sebesar 0,9 at%, 15,2 at%, 37,6 at%, 17,1 at%, dan 29,8 wt%. Sedangkan spektrum 6 dan 7 menunjukkan tidak terdapat kelarutan baja pada aluminium. Lapisan intermetalik yang terbentuk pada antarmuka material adalah senyawa FeAl yang merupakan senyawa superstruktur [8] dan mempunyai ketebalan 19,25  $\mu\text{m}$ .



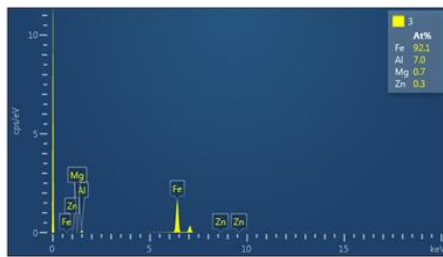
Gambar 8. SEM spesimen dengan waktu pengelasan 5 siklus



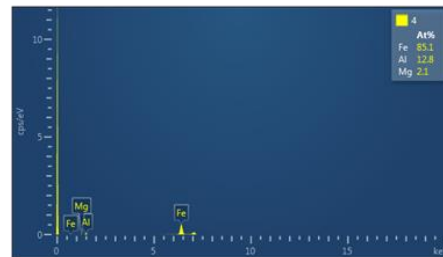
a. Spektrum 1



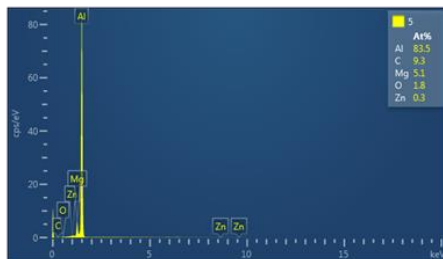
b. Spektrum 2



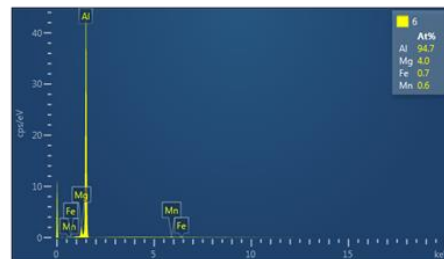
c. Spektrum 3



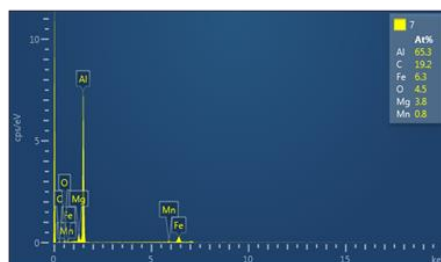
d. Spektrum 4



e. Spektrum 5



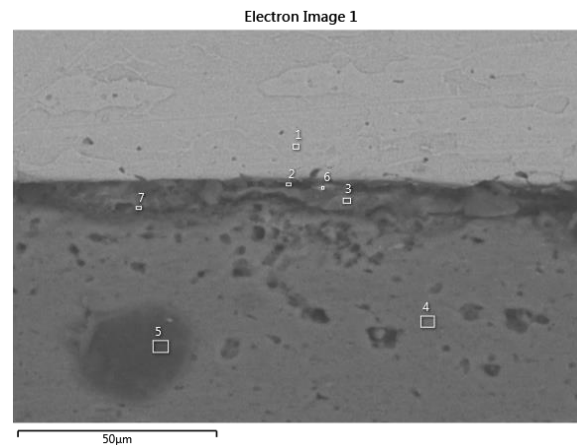
f. Spektrum 6



g. Spektrum 7

Gambar 9. EDX spesimen dengan waktu pengelasan 5 siklus

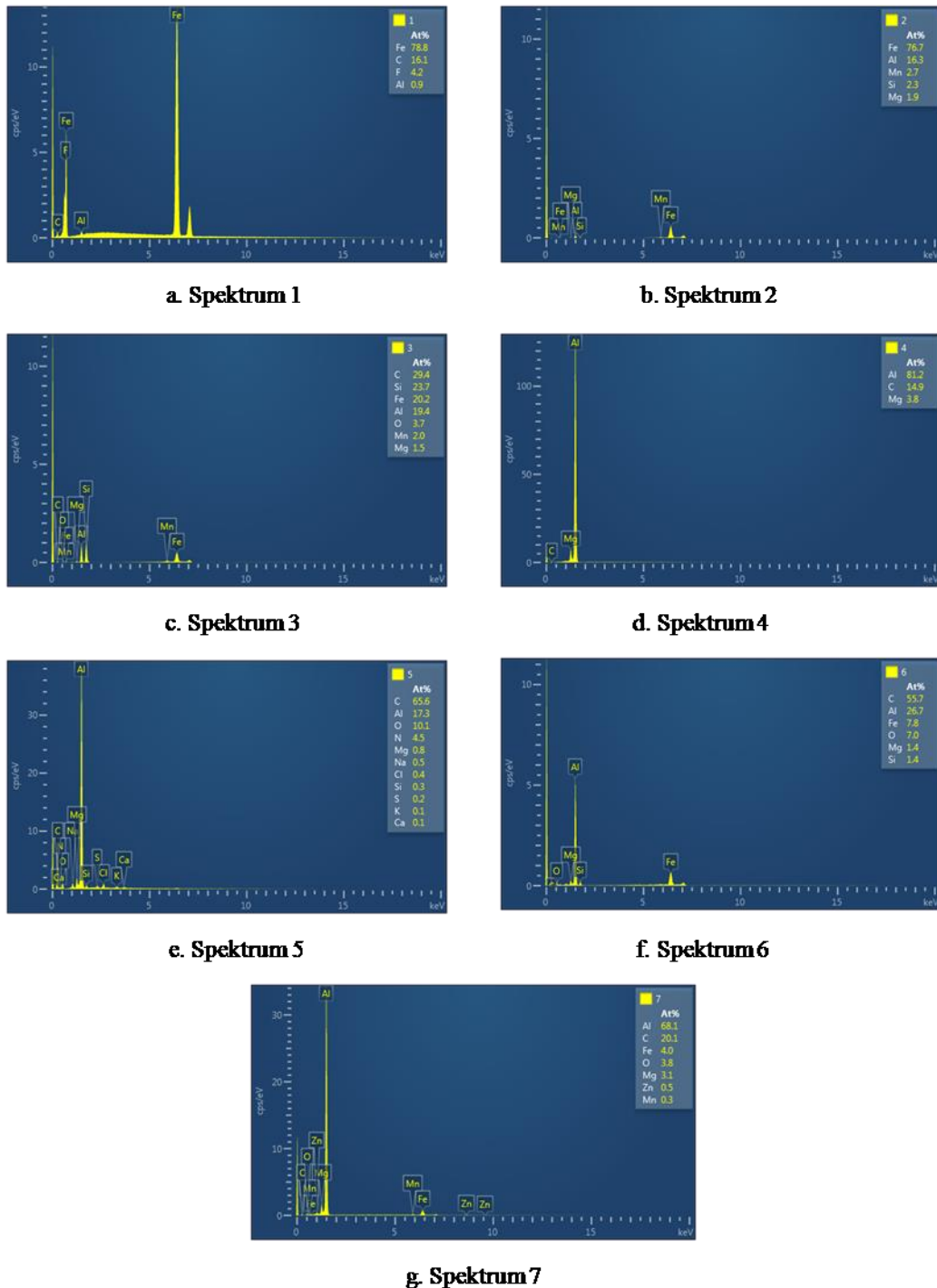
Hasil uji SEM-EDX spesimen dengan arus pengelasan 8 kA dan waktu pengelasan 5 siklus memperlihatkan bahwa jumlah atom aluminium terlarut ke baja pada spektrum 1 – 5 berturut turut adalah sebesar 1,1 at%, 39,4 at%, 7,0 at%, dan 12,8 at%. Sedangkan pada spektrum 5 – 7 menunjukkan kelarutan baja pada aluminium berturut-turut adalah sebesar 0,0 at%, 0,7 at% dan 6,3 at%. Lapisan intermetalik yang terbentuk pada antarmuka material adalah senyawa FeAl yang merupakan senyawa superstruktur [8] dan mempunyai ketebalan 10,52  $\mu\text{m}$ .



**Gambar 10.** SEM spesimen dengan waktu pengelasan 6 siklus

Hasil uji SEM-EDX spesimen dengan arus pengelasan 8 kA dan waktu pengelasan 6 siklus memperlihatkan bahwa jumlah atom aluminium terlarut ke baja pada spektrum 1 – 3 berturut turut adalah sebesar 0,9 at%, 16,3 at%, dan 19,4 at%. Pada spektrum 4 – 5 menunjukkan tidak ada kelarutan baja pada aluminium. Sedangkan pada spektrum 6 – 7 kelarutan baja pada aluminium adalah 7,8 at% dan 4,0 at%. Lapisan intermetalik yang terbentuk pada antarmuka material adalah senyawa  $\text{FeAl}_3$  yang merupakan senyawa intermetalik yang rapuh [8] dan mempunyai ketebalan 8,07  $\mu\text{m}$ .





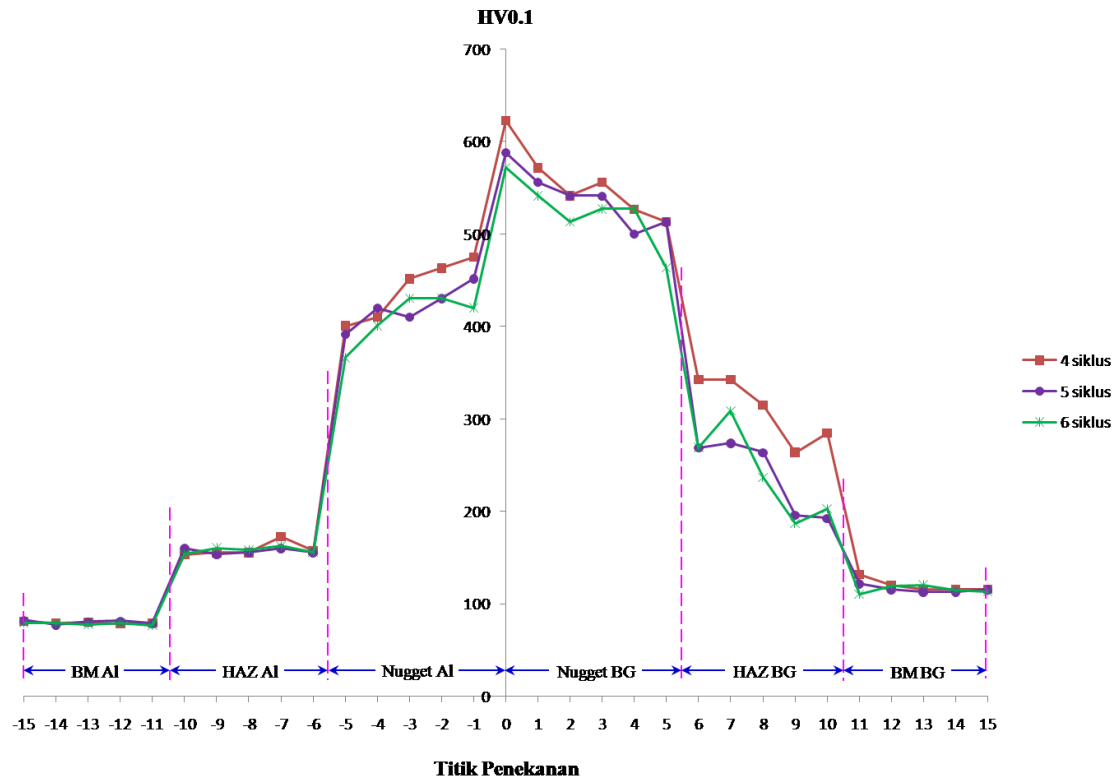
Gambar 11. EDX spesimen dengan waktu pengelasan 6 siklus

### 3.4. Uji Kekerasan

Hasil penelitian menunjukkan logam dasar paduan aluminium Al6061 memiliki nilai kekerasan terendah sebesar 76,4 HV0.1 dan tertinggi sebesar 82,2 HV0.1. Di daerah HAZ, untuk waktu pengelasan 4 siklus mempunyai nilai kekerasan terendah sebesar 153,5,6 HV0.1 dan tertinggi sebesar 172,9 HV0.1. Untuk waktu pengelasan 5 siklus mempunyai nilai kekerasan terendah sebesar 153,5 HV0.1 dan tertinggi sebesar 160,4,0 HV0.1. Dan untuk waktu pengelasan 6 siklus mempunyai nilai kekerasan terendah sebesar 153,5 HV0,1 dan tertinggi 163,8 HV0.1.

Gambar 12 menunjukkan daerah HAZ paduan aluminium Al6061 memiliki kekerasan lebih tinggi dibandingkan logam dasar untuk semua variasi waktu pengelasan. Pada nugget paduan aluminium

Al6061 memiliki kekerasan yang paling tinggi untuk semua variasi waktu pengelasan. Peningkatan kekerasan ini dikarenakan pada HAZ dan nugget mengalami pertumbuhan butir [19], dan juga mengalami pengkasaran butir akibat suhu yang tinggi pada waktu pengelasan dan waktu laju pendinginan yang cukup cepat selama pembekuan.



Gambar 12. Uji kekerasan Vickers

Logam dasar baja galvanis memiliki kekerasan terendah sebesar 110,3 HV0,1 dan tertinggi sebesar 131,8 HV0,1. Di daerah HAZ, untuk waktu pengelasan 4 siklus mempunyai nilai kekerasan terendah sebesar 264,0 HV0,1 dan tertinggi sebesar 343, 0 HV0,1. Untuk waktu pengelasan 5 siklus mempunyai nilai kekerasan terendah sebesar 192,9 HV0,1 dan tertinggi sebesar 274,3 HV0,1. Dan untuk waktu pengelasan 6 siklus mempunyai nilai kekerasan terendah sebesar 186,8 HV0,1 dan tertinggi sebesar 308,9 HV0,1.

Daerah HAZ baja galvanis memiliki kekerasan lebih tinggi dibandingkan logam dasar untuk semua variasi waktu pengelasan. Pada nugget baja galvanis memiliki kekerasan yang paling tinggi untuk semua variasi waktu pengelasan. Kekerasan pada HAZ dan daerah las lebih tinggi daripada kekerasan logam dasar [22,23]. Peningkatan kekerasan ini dikarenakan HAZ mengalami pengkasaran butir akibat suhu yang tinggi dan waktu pendinginan yang cukup cepat.

Semakin jauh dari logam las, nilai kekerasan akan semakin menurun, hal ini disebabkan pada daerah lasan terjadi proses pemanasan pada saat pengelasan dan proses pendinginan setelah pengelasan sehingga struktur *Ferrite* berubah menjadi struktur *Acicular Ferrite*, *Widmanstatten Ferrite*, dan *Grain Boundary Ferrite*. *Acicular Ferrite* terbentuk pada suhu dibawah 650°C dan mempunyai sifat menghambat laju perambatan retak. Dibandingkan dengan struktur yang lain *Acicular Ferrit* merupakan struktur yang memiliki nilai kekerasan tertinggi. *Widmanstatten Ferrite* terbentuk pada suhu 650°C-750°C dan mempunyai sifat menurunkan keuletan dan ketangguhan. Serta *Grain Boundary Ferrite* terbentuk pada suhu 650°C-1000°C dan mempunyai sifat menurunkan ketangguhan dan keuletan. Perubahan struktur *Ferrite* menjadi *Acicular Ferrite*, *Widmanstatten Ferrite*, dan *Grain Boundary Ferrite* ditunjukkan dilihat pada gambar struktur mikro di daerah HAZ (Gambar 10). Daerah logam dasar memiliki *Ferrite* lebih banyak dibandingkan daerah HAZ. Ukuran butir dan jumlah kandungan *Ferrite* akan mempengaruhi kekerasan bahan.

#### 4. Kesimpulan dan Saran

1. Porositas yang terjadi berada pada *nugget* tidak mempengaruhi kekuatan las.
2. Senyawa intermetalik yang terbentuk pada antarmuka untuk waktu pengelasan 4 dan 5 siklus adalah senyawa intermetalik superstruktur yang memiliki ketangguhan yang tinggi.
3. Kekerasan pada *nugget* memiliki kekerasan paling tinggi.

#### Daftar Pustaka

- [1] Shubhavardhan, R.N., Surendran S. Friction Welding to Join Stainless Steel and Aluminum Materials. *International Journal of Metallurgical & Materials Science and Engineering*. 2012; 2(3): 53-73.
- [2] Hitoshi Ozaki, Muneharu Kutsuna. Dissimilar Metal Joining of Zinc Coated Steel and Aluminum Alloy by Laser Roll Welding. *Welding Processes*. 2012: 33-54.
- [3] Aizawa, T., Kashani, M., Okagawa, K., Application of Magnetic Pulse Welding for Aluminum Alloys and SPCC Steel Sheet Joints. *Welding Journal*. 2007; 86: 119-124.
- [4] Lin S. B., Song J.L., Yang C. L., Fan C. L., Zhang D., W. Brazability of Dissimilar Metals Tungsten Inert Gas Butt Welding–Brazing between Aluminum Alloy and Stainless Steel with Al–Cu Filler Metal. *Materials and Design*. 2010; 31: 2637-2642.
- [5] Honggang Dong, Wenjin Hua, Yuping Duana, Xudong Wanga, Chuang Dong. Dissimilar Metal Joining of Aluminum Alloy to Galvanized Steel with Al–Si, Al–Cu, Al–Si–Cu and Zn–Al filler wires. *Journal of Materials Processing Technology*. 2012; 212: 458-464.
- [6] Albright, C. E. The Fracture Toughness Testing of Steel-Aluminum Deformation Welds. *Engineering Fracture Mechanics*. 1981; 15: 193-203.
- [7] Chen, C. M., Kovacevic, R. Joining of Al 6061 Alloy to AISI 1018 Steel by Combined Effects of Fusion and Solid State Welding,. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2004; 44: 1205-1214.
- [8] Schimek, M., Springer, A., Kaierle, S., Kracht, D., Wesling, V. Laser-Welded Dissimilar Steel-Aluminum Seams for Automotive Lightweight Construction. *Physics Procedia*. 2012; 39: 43-50.
- [9] Rattana Borrisutthekul, Pusit Mitsomwang, Sirirat Rattanachan, Yoshiharu Mutoh. Feasibility of Using TIG Welding in Dissimilar Metals between Steel/Aluminum Alloy. *Energy Research Journal*. 2010; 1(2): 82-86.
- [10] Ahmet Hasanbaşoğlu, Ramazan Kaçar. Resistance Spot Weldability of Dissimilar Materials. *Materials and Design*. 2007; 28: 1794-1800.
- [11] Ranfeng Qiu, Hongxin Shi, Keke Zhang, Yimin Tu, Chihiro Iwamoto, Shinobu Satonaka. Interfacial Characterization of Joint between Mild Steel and Aluminum Alloy Welded by Resistance Spot Welding. *Materials Characterization*. 2010; 61: 684-688.
- [12] Selvamani, S.T, Umanath, K, Palanikumar, K. Heat Transfer Analysis during Friction Stir Welding of Al6061-T6 Alloy. *International Journal of Engineering Research and Applications*. 2011; 1(4): 1453-1460.
- [13] Marashi P., Pouranvari M. Amirabdollahian S., Abedi A., Goodarzi M. Microstructure and Failure Behavior of Dissimilar Resistance Spot Welds between Low Carbon Galvanized and Austenitic Stainless Steels. *Materials Science and Engineering A*. 2008; 480, pp. 175-180.
- [14] Tang H., Hou W., Hu S. J., Zhang H, Force Characteristics of Resistance Spot Welding of Steels. *Welding Research*. 2000; 7: 175-183.
- [15] Abdul wahab H. Khuder, Esam J. Ebraheam. Study the Factors Effecting on Welding Joint of Dissimilar Metals. *Al-Khwarizmi Engineering Journal*. 2011. 7(1): 76-81.
- [16] A. Gean, S.A. Westgate, J.C. Kucza, J.C. Ehrstorm. Static and fatigue behavior of spot-welded 5182-0 aluminum alloy sheet. *Welding Journal*. 1999; 78: 80-86.
- [17] Steve Lampman. *Editor. Weld Integrity and Performance*. USA: ASM International. 1997.
- [18] Chakrabarti, D.J., Laughlin, D.E. Phase Relation and Precipitation in Al-Mg-Si Alloys with Cu Additions. *Progress in Materials Science*. 2004; 49(3-4): 389-410.
- [19] Manladan, S.M., Yusof, F., Ramesh, S., Fadzil, M. A review on resistance spot welding of magnesium alloys. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016; 86(5–8): 1805–1825.
- [20] Kolhe, K.P., Kumar, P., Dharaskar R.M., Datta C.K. Effects of Heat Input on Grain Details of Multipass Submerged Arc Weld Joint. *International Journal of Agricultural Engineering*. 2010; 3(1): 115-120.

- [21] Dowling, J.M., Corbett, J.M., And Kerr, H.W. Inclusion Phases and the Nucleation of Acicular Ferrite in Submerged Arc Welds in High Strength Low Alloy Steels. *Metallurgical Transactions*. 1986; 17A: 1610-1623.
- [22] Mukhopadhyay, G., Bhattacharya, S., & Ray, K. K. Strength assessment of spot-welded sheets of interstitial free steels. *Journal of Materials Processing Technology*. 2009; 209(4): 1995-2007.
- [23] Oikawa H., Murayama G., Sakiyama T., Takahashi Y., Ishikawa T. *Resistance Spot Weldability of High Strength Steel (HSS) Sheets for Automobiles*. Nippon Steel Technical Report. Report Number: 95. 2007.