

PENGARUH WAKTU DAN TEKANAN GESEK TERHADAP KEKUATAN TARIK SAMBUNGAN PADUAN ALUMINIUM DAN BAJA KARBON PADA PENGELASAN GESEK *CONTINUOUS DRIVE*

Jack Carol Adolf Pah¹, Yudy Surya Irawan², Wahyono Suprpto³
^{1,2,3}Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya
Jl. MT. Haryono 167 Malang 65165, Jawa Timur-Indonesia
Telp. 0341-551611 / fax. 0341-565420
E-Mail: jackcarol2012@yahoo.com

Abstract

The objective of this research was to investigate the effect of friction time and friction pressure on the tensile strength of the joining of two dissimilar materials, aluminum alloy AA6061 and carbon steel, with continuous drive friction welding process. Variations of friction times of 5 seconds, 7 seconds, 9 seconds, and 11 seconds, at each variation of friction pressures of 24 MPa, 32 MPa, and 40 MPa. Controlled variables in this friction welding process were rotational speed of 1600 rpm, upset pressure of 79 MPa which was applied for 60 seconds and diameter of friction surface of specimens which were 15 mm. The resulting strength of the bonding were then evaluated on the basis of tensile strength. Observations of temperature change during the welding process, the distribution of Vickers hardness values around the bonds area, and micro photographs, were used as support to the analysis. The results showed that the longer friction time was applied, the higher tensile strength of the bonds would be, until it began to decrease after a certain maximum value of the tensile strength had been reached. Increased of the tensile strength of the bonding did not occur linearly due to the variation of friction pressure at 9 seconds and 11 seconds of friction time. At 5 seconds and 7 seconds of friction time, increase of friction pressure caused a linear increase of tensile strength. Higher temperatures in the welding process increased the thickness of brittle layer at the bonds boundary. The increase of the brittle layer thickness causes decrease of the tensile strength of the bonds.

Keywords: *friction welding, friction time, friction pressure, tensile strength, AA6061, carbon steel*

PENDAHULUAN

Penggunaan energi yang efisien dalam suatu aplikasi teknologi, sudah merupakan suatu keharusan pada saat ini, untuk mengantisipasi kelangkaan energi mineral. Berbagai penelitian dan pengembangan teknologi, terfokus pada isu penghematan energi. Dalam bidang teknologi material, penerapan berbagai material baru dalam mensubsitusi penggunaan material-material yang konvensional, semakin sering dilakukan. Hal ini dapat dilihat pada peralatan-peralatan transportasi yang menggunakan berbagai material-material lainnya yang memiliki *strength to weight ratio* yang lebih besar, tanpa mengabaikan syarat-syarat desain lainnya.

Penerapan material yang dengan massa jenis yang kecil, dan material yang mempunyai sifat-sifat yang lain, yang paling tepat pada suatu komponen peralatan, merupakan salah satu cara dalam penggunaan energi yang lebih efisien [1]. Berbagai jenis material

digunakan bersama pada satu struktur peralatan dikarenakan masing-masing material memiliki sifat-sifat mekanis, kimiawi yang berbeda. Dengan demikian, penggunaan berbagai jenis material dalam suatu peralatan dapat meningkatkan nilai keefektifan, nilai ekonomis, dan kemampuan suatu peralatan, yang mana disebabkan oleh sifat-sifat yang dimiliki setiap material [2].

Menjadi suatu konsekuensi logis, dari penerapan berbagai material yang tidak sejenis dalam suatu struktur peralatan, adalah proses penyambungan dua atau lebih material yang tidak sejenis. Berbagai metode penyambungan dapat diterapkan untuk menyambung dua logam tidak sejenis pada suatu struktur komponen. Penyambungan aluminium dan baja dapat dilakukan, dengan menggunakan pengikatan mekanis (*mechanical fastening*), dan juga menggunakan pengikatan adesif (*adhesive bonding*). Kedua metode pengikatan ini memiliki keterbatasan pada kekuatan

spesifik sambungan dan juga geometri pada daerah sambungan, seperti harus adanya bentuk pangkuan sambungan (lap geometry) yang cukup luas [3]. Metode lainnya adalah metode pengelasan, yang dapat dibedakan menjadi pengelasan fusi dan pengelasan *solid-state*.

Metode penyambungan dengan pengelasan gesek merupakan suatu pilihan metode untuk penyambungan dua jenis logam berbeda, yang mana pada proses ini, penyambungan kedua jenis logam terjadi pada fase solid, tanpa membutuhkan logam pengisi (filler metal), *flux*, dan gas pelindung [2]. Pengelasan gesek merupakan suatu metode manufaktur yang juga digunakan untuk menyambungkan logam dengan bukan logam [4].

Pengelasan gesek ditinjau dari sisi cara mentransfer energi mekaniknya, dapat diklasifikasikan secara praktis menjadi pengelasan gesek *continuous drive*, dan pengelasan gesek inersia [5]. Pengelasan gesek *continuous drive* merupakan metode pengelasan gesek yang digunakan untuk menyambungkan logam berbentuk selinder dimana terjadi pembangkitan panas akibat gesekan pada permukaan kontak [6].

Pada pengelasan gesek *continuous drive*, terdapat variabel-variabel operasi utama seperti [7].

1. Kecepatan Putar (rotation speed).
2. Waktu Gesek (friction time).
3. Tekanan Gesek (friction pressure).
4. Tekanan Tempa (forging pressure).
5. Waktu Tempa (forging time).

Selain variabel-variabel utama tadi, terdapat variabel-variabel lain, yang berkorelasi dengan kualitas hasil penyambungan, seperti, jenis material yang disambungkan, geometri permukaan kontak, luas permukaan kontak, dan kekasaran permukaan kontak [5].

Beberapa penelitian sebelumnya, telah menemukan berbagai pengaruh variabel-variabel pada pengelasan gesek terhadap hasil penyambungan. Terdapat lapisan *intermetallic brittle compound* yang getas, pada batas sambungan dengan ketebalan maksimum 350 nm yang berbentuk FeAl dan Fe₂Al₅ yang menurunkan kekuatan tarik sambungan AISI 1018 dengan AA6061-T6 pada proses pengelasan gesek inersia [1]. Tekanan gesek yang terus bertambah besar akan

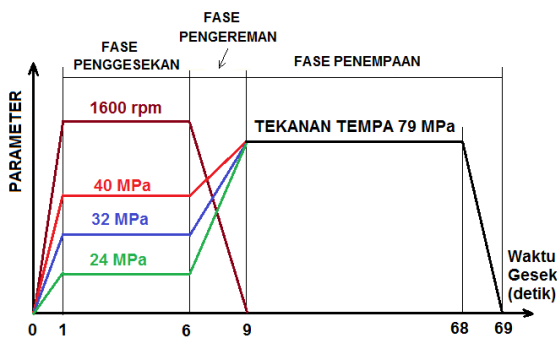
menyebabkan kekuatan tarik sambungan menguat dan kemudian kembali melemah. Pada penyambungan AISI 304 dengan AA6082 dengan proses pengelasan gesek *continuous drive*, didapat kekuatan tarik maksimum 188,4 MPa, pada tekanan gesek 104 MPa, waktu gesek 5 detik [2]. Bentuk geometri permukaan yang berbentuk kerucut pada benda kerja yang diam berpengaruh pada kekuatan puntir sambungan. Nilai perbandingan yang lebih kecil antara diameter bidang gesek dan diameter benda kerja, pada waktu gesek yang lebih singkat dan pada gaya tekan akhir yang rendah, akan menghasilkan kekuatan puntir sambungan yang semakin kuat. Gaya tekan akhir yang semakin besar pada waktu gesek yang semakin lama, menyebabkan kekuatan puntir sambungan menguat, dan mereduksi pengaruh bentuk geometri *one-side-cone* dari permukaan kontak pada pengelasan gesek A6061 [4]. Kombinasi variabel pengelasan gesek *continuous drive* yang optimum, dipengaruhi oleh jenis material yang disambungkan. Pada penyambungan baja AISI 304 dengan aluminium, didapati bahwa semakin lamanya waktu gesek, kekuatan tarik sambungan menguat dan kemudian kembali melemah [5]. Kekasaran permukaan kontak dan geometri permukaan kontak yang bersudut *chamfer*, berpengaruh pada temperatur proses, bentuk geometri *flesh*, dan kekuatan tarik sambungan paduan aluminium A6061 pada pengelasan gesek *continuous drive* [6]. Geometri permukaan gesek berbentuk kerucut pada kedua bidang kontak, dengan sudut *chamfer* 30°, menghasilkan sambungan dengan kekuatan tarik maksimum pada pengelasan gesek *continuous drive* A6061 [8].

Dari penelitian-penelitian sebelumnya, didapati bahwa variabel-variabel pada proses pengelasan gesek, berpengaruh terhadap kualitas hasil penyambungan pengelasan gesek. Kualitas hasil penyambungan ini, dapat ditinjau dari kekuatan mekanis sambungan seperti kekuatan tarik, dan juga dari sisi metalurginya seperti struktur mikro pada daerah sambungan, keadaan makro pada daerah sambungan, dan sebagainya. Selain itu, penelitian sebelumnya masih menggunakan satu variabel untuk sambungan biomaterial. Oleh sebab itu, perlu dilakukan penelitian lanjutan untuk mengetahui konfigurasi dua variabel yaitu waktu dan tekanan gesek

terhadap kekuatan tarik sambungan. Dengan diketahuinya pengaruh dari masing-masing variabel operasi pengelasan gesek, maka akan didapat variasi variabel operasi yang menghasilkan kualitas sambungan yang optimum untuk berbagai variasi material yang disambung dalam proses pengelasan gesek.

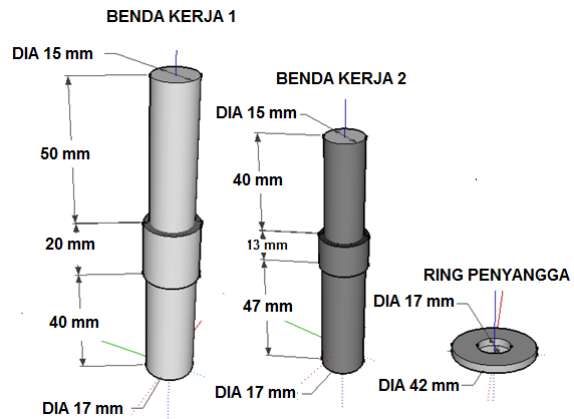
METODOLOGI PENELITIAN

Variabel-variabel yang dalam penelitian ini terdiri dari variabel bebas, terikat dan terkontrol. Variabel bebas penelitian ini adalah waktu gesek 5 detik, 7 detik, 9 detik, 11 detik dan tekanan gesek pada permukaan kontak 24 MPa, 32 MPa, 40 MPa. Variabel terikat (dependent) pada penelitian ini adalah kekuatan tarik sambungan. Variabel terkontrol yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari kecepatan putar relatif pada permukaan kontak sebesar 1600 rpm, waktu tempa 60 detik, tekanan tempa 79 MPa, diameter permukaan kontak, kedua benda kerja pada saat proses pengelasan sebesar 15 mm, diameter permukaan kontak kedua benda kerja pada saat proses pengujian tarik sebesar 13 mm, besar sudut *chamfer* sebesar 0°, kondisi kerataan, kehalusan, kebersihan permukaan kontak benda kerja dianggap baik dan seragam untuk setiap benda uji. Grafik variabel pengujian untuk Waktu Gesek 5 detik seperti Gambar 1.



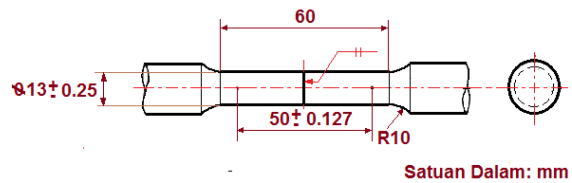
Gambar 1. Variabel Pengujian pada Waktu Gesek 5 Detik

Ukuran spesimen yang digunakan pada pengujian ini seperti Gambar 2.



Gambar 2. Ukuran Spesimen

Spesimen hasil pengelasan, dibubut sesuai ukuran standar pengujian tarik seperti pada Gambar 3 [9].



Gambar 3. Ukuran Spesimen Uji Tarik

Pengujian tarik dilakukan sesuai standar pengujian tarik pada mesin uji tarik yang digunakan. Rincian jumlah total spesimen yang dilakukan pengelasan pada pengujian ini seperti Tabel 1.

Tabel 1. Jumlah Spesimen Uji

Variabel Bebas	Tekanan Gesek			JUMLAH
	24 MPa	32 MPa	40 MPa	
Waktu Gesek (detik)	Jumlah Spesimen			
5	6	6	6	18
7	6	6	6	18
9	6	6	6	18
11	6	6	6	18
Total Jumlah				72

Pengukuran temperatur proses penggesekan menggunakan termometer digital Krisbow KW06-283 dengan kemampuan mengukur -500°C sampai 13000°C. Nilai temperatur setiap saat direkam dengan

menggunakan camera digital. Ujung termokopel diletakan pada lubang dengan diameter 1 mm, kedalaman 2 mm, jarak titik pusat lubang sebesar 2 mm, dari permukaan kontak benda kerja baja karbon.

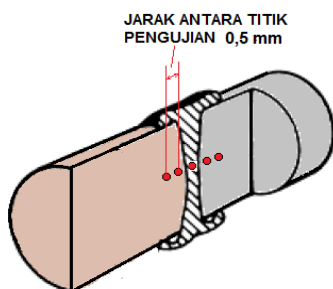


Gambar 4. Lubang Tempat Peletakan Termokopel



Gambar 5. Proses Pengukuran Temperatur pada Saat pengelasan

Pengujian kekerasan Vickers sesuai standar, dengan menggunakan beban 0,9 kgf, dengan jarak antara titik 0,5 mm.



Gambar 6. Skema Titi-Titik Pengujian Kekerasan Vickers.

Pengujian dengan foto mikro menggunakan pembesara 200 kali, dengan dua kali proses etsa. Untuk AA6061 digunakan *keller's reagent* (nitric acid) pada pelarut air selama 3 menit. Untuk baja karbon digunakan *nital* pada pelarut alkohol, dengan waktu etsa dibawah 1 menit.

Komposisi kimia dari material spesimen seperti Tabel 2.

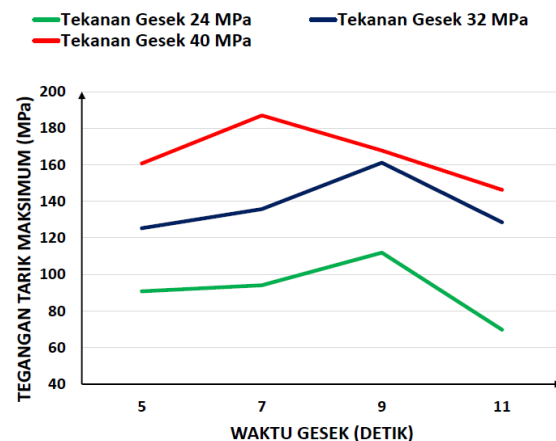
Tabel 2. Komposisi Kimia Material Spesimen

UNSUR KIMIA	AA6061	BAJA KARBON
	PERSEN BERAT (\bar{W}_t %)	PERSEN BERAT (\bar{W}_t %)
Mn	1,06	0,55
Si	0,71	0,26
Al	96,93	0,56
Fe	0,56	98,76
C	0,09	0,16
O	0,88	0,07
F	-	0,06

Dari hasil pengujian komposisi kimia diketahui bahwa material spesimen uji dalam penelitian ini adalah aluminium paduan AA6061 dan baja karbon sedang.

HASIL DAN PEMBAHASAN

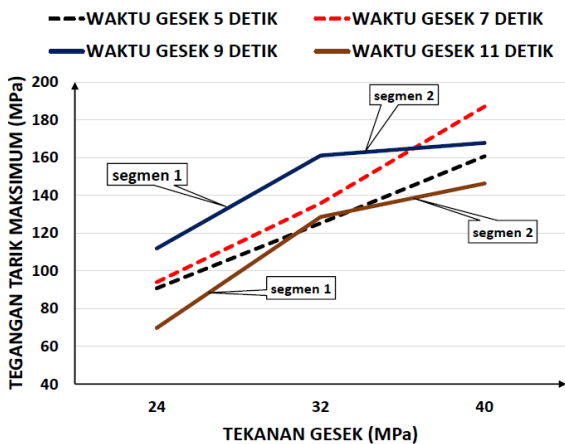
Dari hasil pengujian tarik untuk masing-masing spesimen hasil pengelasan gesek dengan kombinasi variabel waktu gesek dan tekanan gesek, maka didapat hubungan antara kekuatan tarik maksimum sambungan, terhadap variasi waktu gesek seperti grafik pada Gambar 7.



Gambar 7. Grafik Hubungan Kekuatan Tarik terhadap Waktu Gesek

Dari grafik hubungan antara kekuatan tarik maksimum sambungan terhadap variasi waktu gesek, menunjukkan bahwa dengan semakin

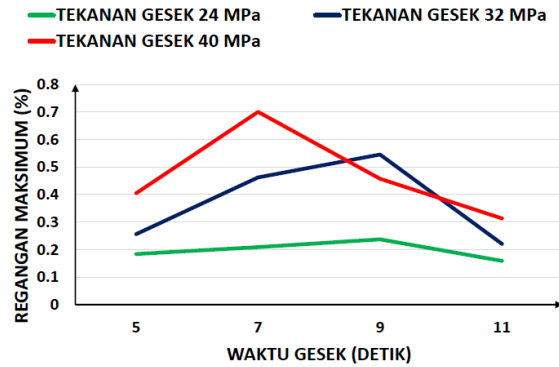
lamanya waktu gesek, kekuatan tarik sambungan akan menguat sampai nilai maksimum dan kemudian kekuatan tarik sambungannya kembali menurun. Tekanan gesek yang semakin tinggi dari 24 MPa, 32 MPa, sampai 40 MPa, akan menghasilkan kekuatan tarik sambungan yang semakin besar, untuk setiap waktu gesek. Kekuatan tarik sambungan terkuat 186,978 MPa, pada penerapan waktu gesek 7 detik, dan tekanan gesek 40 MPa.



Gambar 8. Grafik Hubungan Kekuatan Tarik terhadap Tekanan Gesek

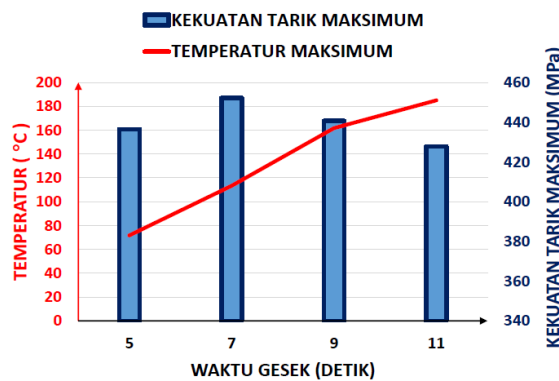
Hubungan antara kekuatan tarik maksimum terhadap variasi tekanan gesek seperti grafik pada Gambar 8. Pada waktu gesek 5 detik dan 7 detik, setiap kenaikan tekanan gesek, akan menyebabkan kekuatan tarik sambungan meningkat, dengan laju peningkatan yang cenderung konstan. Pada waktu gesek 9 detik dan 11 detik, terlihat grafiknya sebagai dua segmen garis dengan kemiringan tiap segmen garis berbeda. Kemiringan garis segmen 1 lebih besar dari kemiringan garis segmen 2. Pada waktu gesek 9 detik dan 11 detik, kenaikan kekuatan tarik sambungan tidak lagi linier terhadap peningkatan tekanan gesek. Pada tekanan gesek yang lebih besar, akan menunjukkan laju peningkatan kekuatan tarik sambungan yang mengecil.

Regangan maksimum saat uji tarik dari sambungan akibat dari variasi waktu gesek seperti grafik pada Gambar 9.



Gambar 9. Regangan Maksimum terhadap Waktu Gesek

Regangan maksimum yang terjadi pada sambungan akan meningkat dengan semakin lamanya waktu gesek, hingga mencapai regangan maksimum, dan kemudian regangannya akan kembali menurun. Peningkatan waktu gesek setelah nilai regangan maksimum ini tercapai, akan menyebabkan sambungan menjadi semakin getas. Regangan terbesar tercapai pada saat sambungan memiliki kekuatan tarik terbesar.

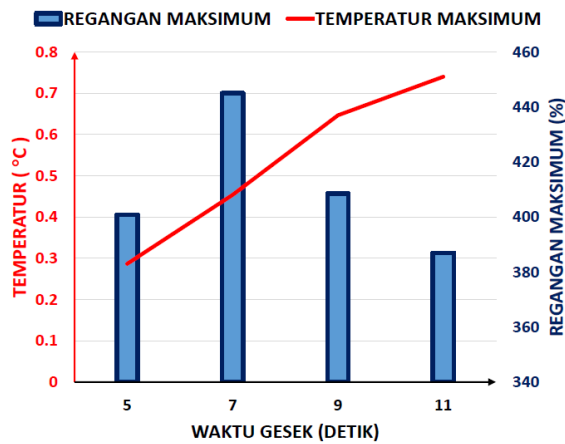


Gambar 10. Temperatur Maksimum dan Kekuatan Tarik Maksimum terhadap Variasi Waktu Gesek

Hubungan antara kekuatan tarik sambungan dan temperatur maksimum proses, terhadap variasi waktu gesek, pada tekanan gesek 40 MPa, seperti grafik pada Gambar 10.

Dapat dilihat bahwa semakin lamanya waktu gesek, maka temperatur maksimum proses terus meninggi untuk keseluruhan waktu gesek. Di sisi lain, kekuatan tarik sambungan menguat sampai nilai maksimum tertentu dan kemudian kembali melemah. Kekuatan tarik

sambungan terbesar, tidak terjadi pada sambungan dengan temperatur proses yang tertinggi.



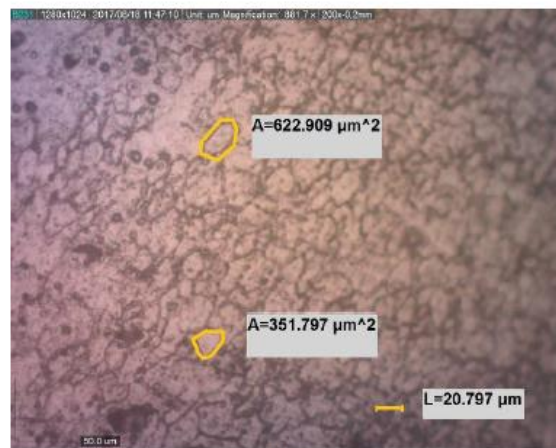
Gambar 11. Temperatur Maksimum dan Regangan Maksimum terhadap Variasi Waktu Gesek

Pola yang sama dengan grafik pada Gambar 10, juga terlihat pada hubungan antara regangan maksimum sambungan dan temperatur maksimum proses, terhadap variasi waktu gesek, seperti pada Gambar 11. Waktu gesek yang semakin lama, menyebabkan temperatur maksimum proses semakin tinggi, tetapi regangan sambungan akan membesar sampai nilai maksimum tertentu, kemudian kembali mengecil. Regangan maksimum sambungan berkaitan dengan kegetasan sambungan. Regangan maksimum sambungan yang mengecil menunjukkan kegetasan sambungan meningkat.

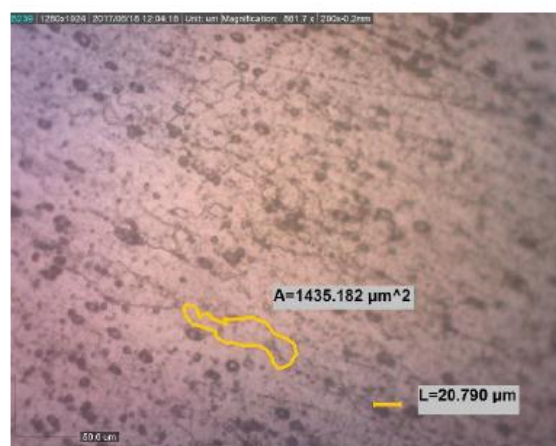
Foto mikro pada benda uji untuk proses dengan tekanan gesek 40 MPa, waktu gesek 7 detik, temperatur maksimum 408°C, dengan kekuatan Tarik $\sigma_u = 186,98$ MPa, pada sisi AA6061 pada daerah batas sambungan, daerah pengaruh panas (HAZ), dan pada daerah *base metal*, pada Gambar 12.



(a)



(b)



(c)

Gambar 12. Foto pada Tekanan Gesek 40 MPa, Waktu Gesek 7 Detik, $\sigma_u = 186,98$ MPa (a). Pada Batas Sambungan (b) Pada HAZ (c) Pada *Base Metal*

Pada daerah batas sambungan, mengalami proses pemanasan dengan temperatur yang lebih tinggi, dan juga laju pendinginan yang lebih cepat, jika dibandingkan pada daerah HAZ dan *base metal*. Tingginya temperatur dari panas yang dibangkitkan, dan laju pendinginan yang terjadi, menyebabkan ukuran butiran pada daerah sekitar batas sambungan lebih kecil dan merata, jika dibandingkan dengan ukuran butiran pada daerah HAZ. Ukuran butiran pada *base metal*, lebih besar dari ukuran butiran di daerah HAZ. Perubahan ukuran butiran ini, menyebabkan perubahan pada sifat mekanis dari logam induk pada daerah HAZ dan daerah disekitar batas sambungan.

Foto mikro daerah batas sambungan, yang dihasilkan oleh proses dengan tekanan gesek 40 MPa, waktu gesek 7 detik, temperatur maksimum 408°C, dan kekuatan tarik sambungan $\sigma_u = 186,98$ MPa, seperti pada Gambar 12 (a). Pada Gambar 13, untuk waktu gesek 11 detik, temperatur maksimum 451°C yang menghasilkan kekuatan tarik sambungan $\sigma_u = 128,52$ MPa.



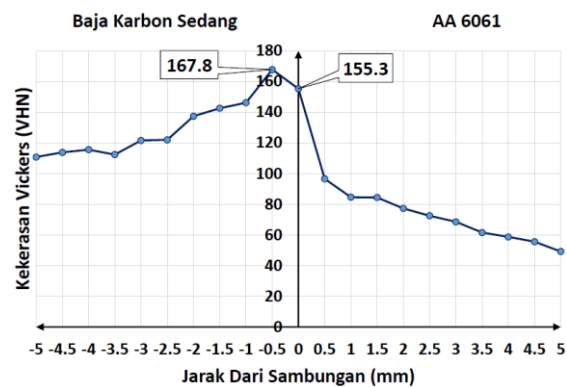
Gambar 13. Foto Mikro pada Batas Sambungan dengan Tekanan Gesek 40 MPa, Waktu Gesek 11 Detik, $\sigma_u = 128,52$ MPa

Pada Gambar 12 (a), garis warna gelap yang memanjang pada batas sambungan, menunjukkan suatu lapisan getas yang terbentuk pada batas sambungan, dengan ketebalan 5,31 μm . Ketebalan lapisan getas itu lebih tipis jika dibandingkan dengan yang terdapat pada proses yang lebih lama, dengan temperatur yang lebih tinggi, yakni pada proses

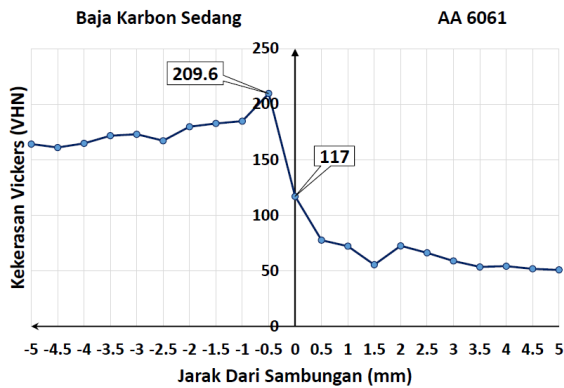
dengan waktu gesek 11 detik, dengan temperatur maksimum 451°C, dimana ketebalan lapisan ini 10,35 μm . Semakin tebal garis berwarna gelap yang memanjang pada batas sambungan, mengidentifikasi terbentuknya suatu lapisan *intermetallic* yang bersifat getas pada batas sambungannya.

Lapisan *intermetallic* yang bersifat getas ini, akan semakin banyak terbentuk di batas sambungan, pada suatu proses pengelasan gesek, dengan temperatur pada proses yang semakin tinggi, dan semakin lama panas itu diterapkan, dalam hal ini adalah durasi waktu gesek yang semakin besar [10]. Lapisan *intermetallic* yang bersifat getas ini, menurunkan kekuatan tarik sambungan [2]. Formasi lapisan *intermetallic* yang semakin tebal, menyebabkan kegetasan sambungan meningkat [10]. Formasi *intermetallic* yang bersifat getas ini mulai terbentuk pada temperatur di bawa temperatur leleh aluminium dengan terdifusinya atom-atom aluminium pada Fe [11].

Distribusi nilai kekerasan Vickers, pada spesimen dengan sambungan terkuat, pada tekanan gesek 40 MPa, waktu gesek 7 detik, dan temperatur maksimum 408°C seperti Gambar 14. Distribusi nilai kekerasan Vickers, pada spesimen dengan sambungan terlemah pada tekanan gesek 40 MPa, yaitu dengan waktu gesek 11 detik, dan temperatur maksimum 423°C seperti Gambar 15.



Gambar 14. Kekerasan Vickers pada Pengelasan Gesek dengan Kekuatan Tarik Sambungan Terkuat



Gambar 15. Kekerasan Vickers pada Pengelasan Gesek dengan Kekuatan Tarik Sambungan Terlemah

Dari kedua grafik distribusi kekerasan Vickers, tingginya temperatur pada proses pengelasan gesek, menentukan luas jangkauan HAZ. Pada proses dengan temperatur yang lebih tinggi (Gambar 15), nilai kekerasan vickers tertinggi 209,6 VHN pada sisi baja karbon. Nilai kekerasan Vickers pada titik-titik yang menjauh daerah batas sambungan, menunjukkan laju penurunan nilai kekerasan yang lebih kecil, jika dibandingkan dengan proses pada temperatur proses yang lebih rendah (Gambar 14), dimana nilai kekerasan Vickers tertinggi hanya 167,8 VHN dengan laju penurunan nilai kekerasan Vickers yang tajam. Semakin tinggi temperatur pada proses pengelasan dan semakin lama panas itu dibangkitkan, akan memperluas HAZ pada kedua sisi sambungan, yang terkonfirmasi dengan perubahan sifat mekanis kekerasan di kedua sisi sambungan. Perubahan nilai kekerasan Vickers ini juga similar dengan apa yang tampak pada perubahan ukuran butiran di daerah batas sambungan, HAZ pada foto mikro.

Dari data-data hasil pengujian, dapat dinyatakan bahwa variabel waktu gesek dan tekanan gesek pada suatu pengelasan gesek, berperan dalam memperluas bidang kontak antara kedua permukaan yang akan disambung, dan juga berperan dalam membangkitkan panas pada permukaan kontak. Pembangkitan panas dan perluasan bidang kontak, akan mendorong terjadinya difusi atomik yang semakin luas dan mendalam pada permukaan kontak, yang berakibat pada

pengikatan difusi atomik yang semakin dalam antara kedua permukaan.

Semakin lama waktu gesek, akan menyebabkan semakin tinggi temperatur dan semakin lama penerapan panas itu, pada permukaan kontak, yang mana menyebabkan pelunakan pada material benda kerja. Di sisi lain, semakin tinggi tekanan gesek akan menyebabkan terjadinya *strain hardening* yang meningkatkan kekerasan pada kedua benda kerja. Suatu kondisi yang *equilibrium* antara waktu gesek yang menyebabkan pelunakan, dan tekanan gesek yang meningkatnya kekerasan, akan menghasilkan pengikatan difusi atomik yang optimum. Waktu gesek yang semakin lama, dan tekanan gesek yang semakin besar, juga akan menyebabkan peningkatan temperatur dan memperlama waktu penerapan panas, yang mana menyebabkan perubahan mikrostruktur yang meluas pada HAZ dan terbentuknya suatu lapisan getas yang semakin tebal pada batas sambungan. Lapisan getas ini memperlemah kekuatan tarik sambungan.

KESIMPULAN

Dari penelitian yang telah dilakukan dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Dengan semakin lamanya waktu gesek, maka kekuatan tarik dari sambungan antara AA6061 dengan baja karbon pada pengelasan gesek *continuous drive*, akan menguat sampai mencapai kekuatan tarik terbesar, dan kemudian kekuatan tariknya akan kembali melemah.
2. Semakin besar tekanan gesek akan menyebabkan semakin kuat kekuatan tarik sambungan yang terbentuk. Pada waktu gesek 5 detik dan 7 detik, pembesaran tekanan gesek menyebabkan meningkatnya kekuatan tarik sambungan secara linier, pada waktu gesek 9 detik dan 11 detik, peningkatan kekuatan tarik sambungan tidak lagi linier, dengan semakin besarnya tekanan gesek.
3. Waktu gesek yang semakin lama, dan tekanan gesek yang semakin besar akan menyebabkan semakin lamanya proses pembangkitan panas dan semakin banyak panas yang dibangkitkan, yang menyebabkan terjadi perubahan ukuran butiran di daerah HAZ, dan juga menyebabkan bertambah tebalnya suatu lapisan *intermetallic* yang bersifat getas

pada batas sambungan, yang mana berakibat pada turunya kekuatan tarik sambungan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Taban, E., Gould, J. E., & Lippold, J. C. (2010). *Dissimilar Friction Welding of 6061-T6 Aluminum and AISI 1018 Steel*. *Materials and Design*. ELSAVIER, Vol. 31, pp.2305-2311.
- [2] Shubhavardhan, R.N., & Surendran, S. (2012). *Friction Welding to Joint Dissimilar Metals*. *IJETAE*, Vol. 2, No. 7, pp. 200-210.
- [3] Uzkut, M., Unlu, B.S., & Akdag, M. (2011). *Determination of Optimum Welding Parameters in Connecting High Alloyed X53CrMnNiN219 and X45CrSi93 by Friction Welding*. *Bulletin of Materials Sciences*, Vol. 34, No. 4, pp. 815-823.
- [4] Irawan, Y.S., Suprpto, W., Oerbandono, T., January, A.R., Kekar, A., Wijaksono, M. & Fauzan, R. (2017). *Torsion Strength of Round Bar A6061 Friction Weld Joint Influenced by Friction Time, Upset Force, and One-Side Cone Geometry*. *Journal of Environmental Engineering & Sustainable Technology*, Vol. 4, No. 2, pp. 78-84.
- [5] Sahin, M., & Misirli, C. (2013). *Mechanical and Metalurgical Properties of Friction Welded Aluminium Joints*. Edited, Zaki Ahmad. INTECH, Ch. 11, pp. 278-300.
- [6] Irawan, Y.S., Imawan, B., Soenoko, R., & Purnomo, H. (2016). *Effect of Surface Roughness and Chamfer Angle on Tensile Strength of Round Aluminum A6061 Produced by Continuous Drive Friction Welding*. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 11. No. 6. Pp. 1178-1185.
- [7] Alves, P.E., Neto, F.P., & Chen, Y.A. (2010). *Welding of AA 1050 Aluminum with AISI 304 Stainless Steel by Rotary Friction Welding Process*. *Aersop Technol Manag* (Sao Jose Dos Campos), Vol. 2. No. 3, pp. 301-306.
- [8] Irawan, Y.S., Wirohardjo, M., & Ma'arif, S. (2012). *Tensile Strength of Weld Joint Produced by Spinning Friction Welding of Round Aluminum A6061 with Various Chamfer Angles*. *Advanced Materials Research*, Vol. 576, pp. 761-765.
- [9] AWS B4.0-98, *Standard Methods for Mechanical Testing of Weld*. (2003). American Welding Society. Miami.
- [10] Ambroziak, A., Korzeniowski, M., Kustron, P., Winnicki, M., Sokolowski, P., & Harapinska, E. (2014). *Friction Welding of Aluminium and Aluminium Alloy with Steel*. *Advances in Materials Science and Engineering*, Vol. 2014. pp. 1-15.
- [11] Novak, P., Michalcova, A., Marek, I., Mudrova, M., Saksli, K., Bednarcik, J., Zikmund, P., & Vojtech, D. (2013). *On Formation of Intermetallic in Fe-Al System an in Situ XRD Study*. ELSAVIER, Vol. 32, pp. 127-136.