

Akibat peningkatan tekanan gesek terhadap kekuatan tarik sambungan pada proses pengelasan gesek *continuous drive* AA6061- baja karbon sedang

Jack Carol Adolf Pah^{1*}, Defmit B. N. Riwu², Erich U.K. Maliwemu³, Adi Yermia Tobe⁴, Wenseslaus Bunganaen⁵, Daud P. Mangesa⁶

¹⁻⁶Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Sains dan Teknik, Universitas Nusa Cendana
Jl. Adisucipto, Penfui-Kupang, NTT 85001, Indonesia
*Corresponding author: jack_pah@staf.undana.ac.id

Abstract

The objective of this research was to get the effect of friction pressure on the tensile strength of the joining of aluminum alloy AA6061 and carbon steel, with continuous drive friction welding process. Variations of friction pressure of this research were 24 MPa, 32 MPa, and 40 MPa. In this study, a friction time 9 seconds was used. Other friction welding variables were, forging pressure 79 MPa, forging time 60 seconds, and friction rotation speed 1600 rpm. The independent variable was the ultimate tensile strength of the welded joint. The results showed that the increase in the tensile strength of the joint was not linear with the increase of frictional pressure. The rate of the increase in the tensile strength of the connection, will decrease after the frictional pressure passes through 32 MPa. When the rate of increase in the tensile strength of the joint begins to decrease, the joint will become more brittle. The maximum tensile strength of the joint in this study was 167.421 MPa at a frictional pressure of 40 MPa.
Keywords: Friction welding; tensile strength; AA6061; carbon steel friction pressure.

Abstrak

Tujuan dari penelitian ini untuk mendapatkan pengaruh dari tekanan gesek terhadap kekuatan tarik sambungan aluminium paduan AA6061 dengan baja karbon sedang, yang disambung menggunakan proses pengelasan gesek *continuous drive*. Waktu gesek pada penelitian ini adalah 9 detik. Variasi tekanan gesek pada penelitian ini adalah sebesar 24 MPa, 32 MPa, 40 MPa. Variabel-variabel pengelasan gesek yang lain adalah tekanan gesek 24 MPa, tekanan tempa 79 MPa, waktu tempa 60 detik, dan putaran penggesekan 1600 rpm. Variabel bebas yang diuji adalah kekuatan tarik *ultimate* dari sambungan hasil pengelasan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan kekuatan tarik sambungan yang terjadi tidak linier terhadap pembesaran tekanan gesek. Laju pertambahan kekuatan tarik sambungannya, akan semakin mengecil setelah tekanan gesek melewati 32 MPa. Pada saat laju pertambahan kekuatan tarik sambungannya mulai mengecil, sambungannya akan semakin bersifat getas. Kekuatan tarik maksimum sambungan pada penelitian ini adalah sebesar 167,421 MPa pada saat tekanan gesek 40 MPa.

Kata kunci: Pengelasan gesek; kekuatan tarik; AA6061; baja karbon; tekanan gesek.

Pendahuluan

Kualitas hasil produk dalam manufaktur, adalah aspek yang penting. Kualitas produk manufaktur dapat diketahui dari terpenuhinya kepuasan konsumen terhadap hasil produksi, dimana ini berkaitan erat dengan proses manufaktur

dari produk itu [1]. Pengelasan umumnya merupakan suatu proses yang ada di dalam alur proses manufaktur. Pengelasan gesek (*friction welding*) antara material logam yang berbeda, telah dikembangkan dalam ruang lingkup manufaktur saat ini [2].

Penyambungan dua jenis logam yang berbeda dengan proses pengelasan,

memiliki berbagai tantangan dan kesulitan tersendiri, jika dibandingkan dengan proses pengelasan dua logam sejenis. Ini dikarenakan adanya perbedaan pada sifat-sifat fisika, sifat-sifat kimia, dan sifat-sifat metalurgi antara kedua jenis logam yang akan disambung [3]. Penggunaan proses pengelasan fusi untuk menyambungkan aluminium dengan baja, mendapatkan berbagai kesulitan keteknikan berkaitan dengan terbentuknya lapisan *intermetallic* yang keras dan getas (*brittle intermetallic phases*) pada daerah sambungan, yang akan menurunkan kekuatan sambungan itu. Lapisan *brittle intermetallic phases* ini seperti $FeAl$, $FeAl_2$, Fe_2Al_5 , $FeAl_3$ akan semakin mudah terbentuk pada temperatur yang semakin tinggi dalam durasi yang semakin lama [4]. Oleh karenanya, penerapan metode pengelasan dimana temperatur pengelasannya masih dibawah temperatur leleh logam induk (*solid state welding*) menjadi pilihan metode pengelasan untuk menyambungkan dua jenis logam tidak sejenis. Pengelasan gesek merupakan salah satu metode pada *solid state welding*.

Pengelasan gesek menjadi pilihan metode pengelasan yang dipilih untuk menyambungkan dua jenis logam berbeda, disebabkan oleh berbagai kelebihan metode ini dibandingkan dengan metode *solid state welding* yang lain seperti *cold work welding*, *explosive welding*, dll. Kelebihan dari pengelasan gesek antara lain memiliki reprodutifitas yang tinggi, waktu proses pengelasan yang singkat, energi *input* yang rendah, dan kemungkinan terbentuknya *intermetallic brittle compound* yang minim [3]. Ada berbagai tipe pengelasan gesek. Pengelasan gesek *continuous drive* merupakan metode pengelasan gesek yang digunakan untuk menyambungkan benda kerja berbentuk selinder dimana terjadi pembangkitan panas akibat gesekan pada permukaan kontak [5].

Tinjauan Pustaka

Penyambungan pada pengelasan gesek terjadi pada temperatur yang masih

dibawah temperatur lelehnya [1]. Panas dibangkitkan secara mekanis melalui gesekan antara kedua permukaan yang akan disambungkan, dimana yang satu diam dan yang lain ditekan sambil berputar pada kecepatan tertentu. Gesekan yang terjadi menyebabkan terjadi pembangkitan panas yang cepat pada daerah sambungan. Panas yang dibangkitkan, dan tekanan yang ada antara kedua permukaan menyebabkan terjadinya perubahan plastis pada material di daerah sambungan. Material yang mengalami perubahan plastis ini mengalir keluar dari daerah sambungan membentuk *flesh*. *Flesh* yang mengalir keluar dari daerah permukaan sambungan ini menghilangkan impuritas dan oksida-oksida logam pada permukaan sambungan. Dengan hilangnya impuritas, oksida-oksida logam, dan adanya kenaikan temperatur pada permukaan sambungan, mendorong terjadinya difusi antara kedua material di daerah permukaan sambungan, yang menghasilkan ikatan atau penyambungan antara kedua permukaan itu [4].

Pada pengelasan gesek *continuous drive*, terdapat variabel-variabel operasi utama seperti kecepatan putar (*rotation speed*), waktu gesek (*friction time*), tekanan gesek (*friction pressure*) tekanan tempa (*forging pressure*), dan waktu tempa (*forging time*) [4]. 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 kekesaran permukaan kontak [6].

Berbagai penelitian sebelumnya mendapatkan bahwa semakin lamanya waktu gesek, kekuatan tarik sambungan pengelasan gesek akan menguat dan kemudian kembali melemah. Penelitian ini diuji pada dua material yang berbeda yaitu pada penyambungan baja AISI 304 dengan aluminium [6].

Pengujian pada penyambungan material Ti6Al4V dengan SUS321 dengan kecepatan putar 1900 rpm, tekanan gesek 184 MPa, tekanan tempa 330 MPa, dan

waktu gesek sebagai variabel bebas dan bervariasi mulai dari 1 detik, 2 detik, 3 detik dan 4 detik. Pada penelitian ini didapati kekuatan tarik sambungan semakin kuat dengan semakin lama waktu gesek. Kekuatan tarik sambungan maksimum didapat pada lama waktu gesek 4 detik [7].

Pengujian penyambungan AA1050 aluminium dengan AIS I304 menggunakan proses pengelasan gesek *continuous drive* dengan menggunakan parameter kecepatan putar *spindle* 3200 RPM, variasi tekanan gesek 2,1 MPa, 7, 17 detik, 32 detik. waktu tempa bervariasi 1 detik dan 2 detik, dengan tekanan tempa yang rendah, yaitu 1,4 MPa dan 2,1 MPa. Hasil pengujian ini didapati bahwa kekuatan sambungan tertinggi pada tekanan gesek 2,1 MPa selama 32 detik dengan tekanan tempa 1,4 MPa selama 2 detik [4].

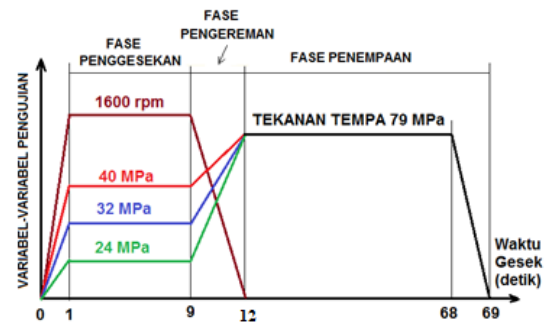
Metode Penelitian

Variabel-variabel dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a) Variabel tekanan gesek: 24 MPa, 32 MPa, 40 MPa
- b) Variabel terikat adalah kekuatan tarik *ultimate* sambungan.
- c) Material benda kerja 1 adalah AA6061 dan benda kerja 2 adalah baja karbon sedang dengan kadar karbon 0,16 %.
- d) Variabel terkontrol:
 - Waktu gesek pada permukaan kontak: 9 detik
 - 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 pengelasan sebesar 13 mm.

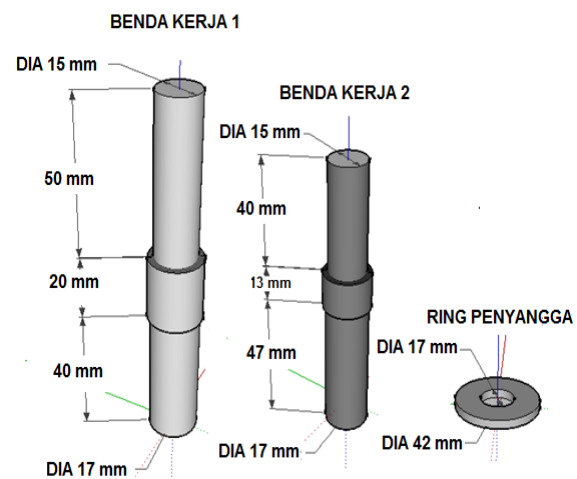
Pada penelitian ini, digunakan 7 benda uji untuk setiap variasi pengujian. Pada setiap variasi pengujian, nilai hasil

pengujian didapat dari rata-rata nilai pengujian untuk setiap variasi uji.

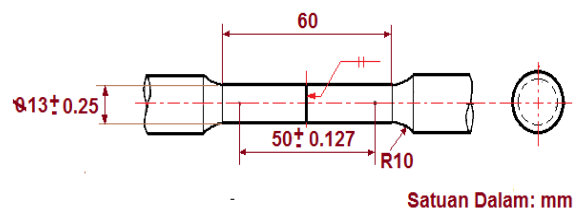


Gambar 1. Variabel putaran, tekanan gesek dan waktu tempa, waktu gesek 9 detik

Grafik pada Gambar 1 menunjukkan variabel pengujian pada waktu gesek 9 detik. Untuk setiap variabel bebas yang lain, yaitu tekanan gesek 24 MPa, 32 MPa, dan 40 MPa, variabel-variabel yang lain tidak berubah. Dimensi benda kerja pada proses pengelasan seperti pada Gambar 2, dimana benda kerja 1 adalah baja karbon, dan benda kerja 2 adalah aluminium paduan AA6061. Dimensi benda uji pada pengujian tarik sesuai standar AWS B4.0-98 seperti pada Gambar 3.



Gambar 2. Dimensi benda kerja



Gambar 3. Dimensi benda uji pada pengujian tarik

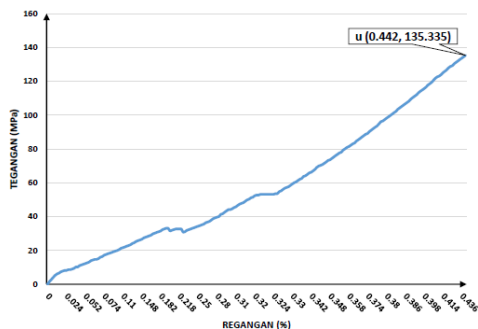
Benda kerja hasil pengelasan, kemudian dibubut untuk mendapatkan ukuran benda uji standar untuk pengujian tarik hasil penyambungan dengan pengelasan. Dari uji tarik didapat grafik uji tarik yang kemudian dianalisa lanjut untuk mendapatkan kekuatan tarik *ultimate* dari semua pengujian yang ada [8-15].

Hasil dan Pembahasan

Dari hasil pengujian tarik untuk masing-masing kombinasi variabel tekanan gesek 24 MPa, 32 MPa, 40 MPa, didapat rata-rata kekuatan tarik sambungan terhadap variasi waktu gesek seperti pada Tabel 2. Foto benda uji sebelum dan sesudah pengelasan, dan benda uji untuk pengujian tarik seperti pada Gambar 4. Salah satu grafik tegangan-regangan pada waktu gesek 9 detik dengan tekanan gesek 32 MPa seperti pada Gambar 5.



Gambar 4. Benda uji sebelum dan sesudah pengelasan



Gambar 5. Grafik tegangan-regangan benda uji tekanan gesek 32 MPa

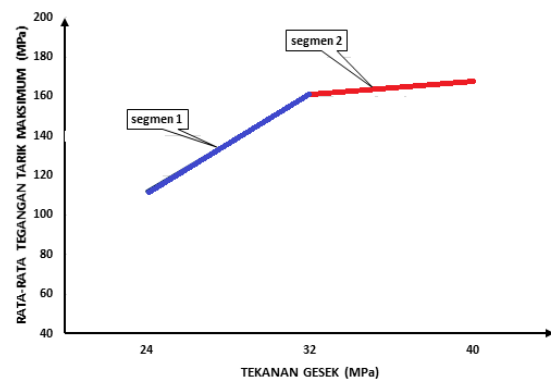
Pada grafik tegangan-regangan pada Gambar 5 menunjukkan bahwa tegangan luluh yang jauh lebih rendah dari tegangan *ultimate* dan tegangan maksimumnya sama dengan tegangan putus.

Tabel 1. Data kekuatan tarik rata-rata sambungan pengelasan pada variasi tekanan gesek

Benda uji ke	$P_{f1} = 24 \text{ MPa}$	$P_{f2} = 24 \text{ MPa}$	$P_{f3} = 32 \text{ MPa}$	
1	112,027	161,907	167,054	
2	112,849	159,894	167,634	
3	112,382	161,500	168,455	
4	Kekuatan Tarik Ultimate (MPa)	111,779	161,352	167,655
5	112,230	161,342	167,088	
6	112,027	160,957	166,809	
7	112,027	161,155	167,250	
Rata-Rata	111,682	161,158	167,421	

Variabel Terkontrol:
 $s = 1600 \text{ rpm}$ $P_u = 79 \text{ MPa}$ $t_u = 60 \text{ detik}$ $D_k = 15 \text{ mm}$
 $t_f = 9 \text{ detik}$

Data dari **Error! Reference source not found.** yang digambarkan pada grafik yang menyatakan rata-rata kekuatan tarik *ultimate* sambungan pengelasan akibat dari perubahan tekanan gesek, dapat dilihat pada grafik di Gambar 6.



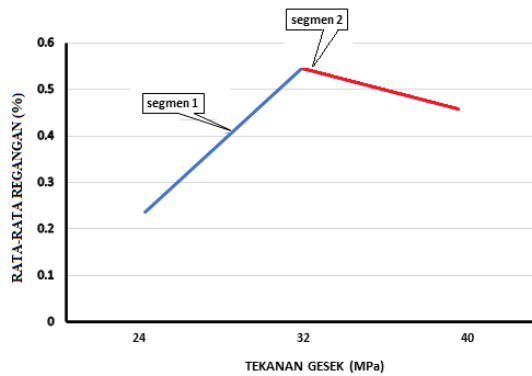
Gambar 6. Grafik tekanan gesek terhadap rata-rata kekuatan tarik ultimate sambungan

Rata-rata regangan pada sambungan dapat dilihat pada Tabel 2. Grafik rata-rata regangan akibat dari perubahan tekanan gesek seperti Gambar 7.

Tabel 2. Rata-rata regangan pada sambungan

Tekanan Gesek	Rata-Rata Regangan
24 MPa	0.237 %
32 MPa	0.545 %
40 MPa	0,457 %

Variabel Terkontrol
 $ss = 1600 \text{ rpm}$ $P_u = 79 \text{ MPa}$ $t_u = 60 \text{ detik}$ $D_k = 15 \text{ mm}$ $t_f = 9 \text{ detik}$



Gambar 7. Grafik rata-rata regangan

Data rata-rata temperatur maksimum pada daerah sambungan seperti pada Tabel 3, dan grafik rata-rata temperatur maksimum seperti pada Gambar 8. Seberapa besar material logam induk yang berubah menjadi *flash* dapat diketahui dari perpendekan kedua spesimen setelah proses pengelasan gesek atau *burn of length* (BOL). Data rata-rata BOL akibat perubahan tekanan gesek dan grafiknya dapat dilihat pada

dan grafik pada **Error! Reference source not found.**

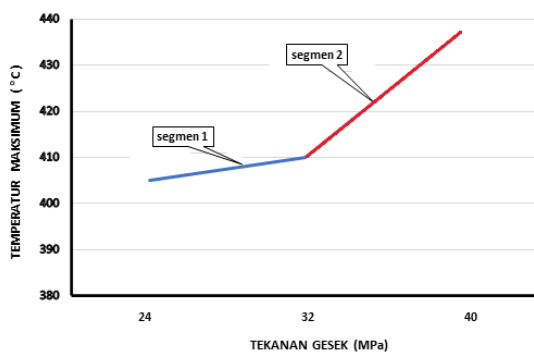
Tabel 3. Rata-Rata temperatur maksimum pengelasan

Tekanan Gesek	Rata-Rata Temperatur Maksimum
24 MPa	405°C
32 MPa	410°C
40 MPa	437°C

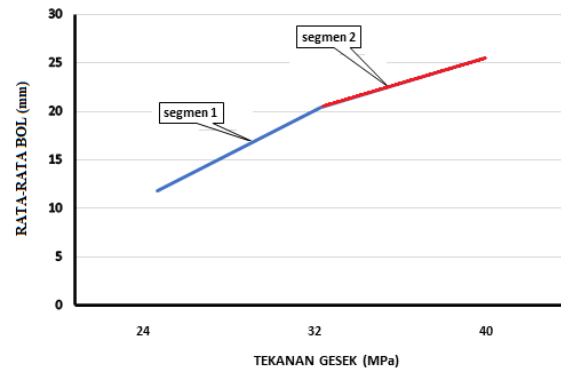
Variabel Terkontrol

$$ss = 1600 \text{ rpm} \quad P_u = 79 \text{ MPa}$$

$$t_u = 60 \text{ detik} \quad D_k = 15 \text{ mm} \quad t_f = 9 \text{ detik}$$



Gambar 8. Grafik tekanan gesek terhadap rata-rata temperatur maksimum



Gambar 9. BOL pada Perubahan Tekanan Gesek

Pada tekanan gesek yang diperbesar dari 24 MPa, 32 MPa, 40 MPa, kekuatan tarik sambungan semakin menguat. Pada saat penerapan tekanan gesek, selama waktu gesek 9 detik, panas yang dibangkitkan pada permukaan kontak, terjadi dengan cepat, akibat dari gesekan antara permukaan kontak. Panas ini menyebabkan pelunakan material disekitar permukaan kontak. Tekanan penggesekan dan panas yang terbangkitkan itu, akan menimbulkan *flesh* yang kemudian mengalir keluar dari daerah permukaan sambungan. Hal ini mengurangi impuritas dan oksida-oksida logam pada permukaan sambungan. Dengan berkurangnya impuritas, tersingkirnya berbagai oksida logam, dimana oksida-oksida logam ini menjadi suatu penghalang proses difusi. Dengan berkurangnya impuritas dan oksida-oksida logam, dan juga dengan terbangkitkannya panas yang tinggi, menyebabkan luas kontak antara permukaan meningkat, sehingga terbentuk suatu kondisi untuk proses difusi dapat terjadi. Pada proses difusi antara permukaan ini, atom-atom *interstitial* berpindah melewati batas-batas butiran disekitar permukaan sambungan dan juga terjadi pergeseran batas butir di daerah sambungan. Ini mengakibatkan terjadi sambungan antara permukaan kontak.

Pada penerapan tekanan gesek yang lebih tinggi yaitu 30 MPa, pada waktu gesek yang sama, yaitu 9 detik, maka pembangkitan panas yang terjadi akan semakin cepat dan mencapai temperatur yang lebih tinggi dari temperatur yang dicapai pada tekanan gesek 24 MPa. Proses

difusi akan terjadi semakin dalam dan meluas pada permukaan kontak, dengan semakin tingginya temperatur pada permukaan kontak itu, dan menyebabkan pengikatan antara permukaan kontak yang semakin kuat, yang terkonfirmasi dengan meningkatnya kekuatan tarik sambungan. Peningkatan tekanan gesek yang lebih tinggi lagi yaitu pada 40 MPa, akan semakin mempercepat kenaikan temperatur dan juga temperatur maksimum yang dicapai akan semakin tinggi. Dengan demikian proses difusi akan terjadi semakin dalam dan meluas pada permukaan kontak, mengakibatkan kekuatan sambungan yang lebih kuat seperti terlihat pada grafik pada Gambar 1.

Dari Gambar 1, terlihat bahwa laju kenaikan kekuatan sambungan pada saat tekanan gesek 24 MPa sampai 32 MPa (segmen 1 pada grafik Gambar 1), memiliki kemiringan yang lebih besar jika dibandingkan dengan laju kenaikan kekuatan sambungan, pada saat tekanan gesek dinaikan dari 32 MPa sampai 40 MPa (segmen 2 pada grafik Gambar 1). Kenaikan kekuatan sambungan tidak linier. Ini terjadi karena pada saat tekanan penggesekan diperbesar, dan bersamaan dengan itu temperatur akan semakin tinggi (grafik pada Gambar 2), terjadi dua proses secara bersamaan yaitu *strain hardening* akibat tekanan yang diperbesar dan *thermal softening* akibat kenaikan temperatur. Walaupun temperatur maksimum proses meningkat tajam pada peningkatan tekanan gesek 32 MPa sampai 40 MPa, tetapi juga terjadi peningkatan kekerasan akibat *strain hardening* akibat peningkatan tekanan ini, pada permukaan sambungan. Peningkatan kekerasan ini mengurangi laju proses difusi antar permukaan. Akibatnya, laju peningkatan kekuatan sambungan menjadi lebih landai pada peningkatan tekanan gesek 32 MPa sampai 40 MPa.

Laju peningkatan kekuatan sambungan yang semakin landai ini, akibat adanya *strain hardening*, akibat dari peningkatan tekanan gesek 32 MPa sampai 40 MPa juga terkonfirmasi pada laju

pembentukan *flash* yang semakin kecil (grafik pada Gambar 3). Pada grafik BOL akibat kenaikan tekanan gesek, pada segmen 2 yang memiliki kemiringan garis yang lebih kecil dari segmen 1. Pelunakan akibat *thermal softening*, mulai diimbangi oleh peningkatan kekerasan akibat *strain hardening*. Pada saat terjadi ekuilibrium antara *thermal softening* dan *strain hardening*, maka BOL tidak lagi terjadi. Peningkatan tekanan gesek yang semakin besar akan mengakibatkan *strain hardening* meningkat dengan semakin besar pada permukaan kontak, yang akan menghalang proses difusi antar permukaan. Proses difusi antara permukaan yang terhalang akan menurunkan kekuatan sambungan antara permukaan ini.

Pada grafik pada Gambar 1 dan Grafik pada Gambar 2, menunjukkan bahwa pada saat tekanan gesek meningkat dari tekanan 32 MPa sampai 40 MPa (segmen 2 pada grafik), terjadi peningkatan kekuatan sambungan yang dihasilkan, walaupun dengan laju yang lebih kecil dari pada laju pertambahan kekuatan sambungan saat perubahan tekanan gesek 24 MPa ke 32 MPa (segmen 1 pada grafik). Disaat yang sama, pada saat tekanan gesek meningkat dari 24 MPa ke 32 MPa, regangan pada sambungan juga meningkat (segmen 1 pada grafik gambar 2). Pada saat tekanan gesek 32 MPa sampai 40 MPa, regangan pada sambungan justru menurun (segmen 1 pada grafik gambar 2), walaupun kekuatan tarik sambungan tetap meningkat. Sambungan yang terjadi pada saat tekanan gesek 32 MPa sampai 40 MPa semakin bersifat getas. Meningkatnya kegetasan sambungan mengindikasikan kemungkinan terbentuknya lapisan *intermetallic brittle compound* pada daerah sambungan. Kemungkinan terbentuknya lapisan *intermetallic brittle compound*, disebabkan terjadinya temperatur yang semakin tinggi dengan meningkatnya tekanan gesek. Lapisan *intermetallic brittle compound* ini berperan juga dalam menghambat proses difusi pada permukaan sambungan, sehingga laju kenaikan kekuatan

sambungannya semakin kecil, dan sambungan bersifat semakin getas.

Pengujian lebih lanjut dengan memperbanyak variasi tekanan gesek diatas 40 MPa diperlukan untuk mendapatkan tekanan gesek yang menghasilkan kekuatan tarik sambungan tertinggi, sebelum kekuatan sambungan ini menurun, dengan menggunakan waktu gesek yang sama yaitu 9 detik. Kemudian dapat juga dilakukan penelitian lanjutan dengan menggunakan tekanan gesek yang menghasilkan kekuatan sambungan tertinggi, pada berbagai variasi waktu gesek. Pengujian lain juga diperlukan untuk mengkonfirmasi senyawa *intermetallic brittle compound* yang terbentuk, dan juga ketebalannya. Pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM) juga diperlukan untuk mengetahui pergeseran batas butir yang terjadi, ukuran butiran disekitar sambungan dan berbagai hal lain yang belum dilakukan pada pengujian ini.

Kesimpulan

Kekuatan tarik sambungan aluminium paduan AA6061 dan baja karbon pada pengelasan gesek *continuous drive*, meningkat dengan meningkatnya tekanan gesek pada waktu gesek yang tetap yaitu 9 detik. Dengan membesarnya tekanan gesek, peningkatan kekuatan tarik sambungan yang terjadi tidak linier, dimana laju pertambahan kekuatan tarik sambungannya, akan semakin mengecil setelah tekanan gesek melewati 32 MPa. Pada saat laju pertambahan kekuatan tarik sambungannya mulai mengecil, sambungannya akan semakin bersifat getas. Kekuatan tarik maksimum sambungan pada penelitian ini adalah sebesar 167,421 MPa pada saat tekanan gesek 40 MPa.

Referensi

[1] Pachal, A. and Bagesar, A., 2013. Taguchi Optimization of Process Parameters in Friction Welding of 6061 Aluminum Alloy and 304 steel: A Review. *International Journal of Emerging Technology and*

Advanced Engineering. 3, no. 4, pp. 229–233.

[2] Sardana, G. And Kumar, A., 2013. To Study the Mechanical Behavior of Friction Welding of HSS M 33 & SS 316. *International Journal of Engineering Science and Advanced Engineering*, 3, no. 4, pp. 131–124.

[3] Song, Y. et al., 2008. Strength distribution at interface of rotary-friction-welded aluminum to nodular cast iron. *Transaction of Nonferrous Metal Society of China*. 18, no. 1, pp. 14–18.

[4] Alves, E. P. et al, 2010. Welding of AA1050 aluminum with AISI 304 stainless steel by rotary friction welding process. *J. Aerosp Technol Manag*. 2, no. 3, pp. 301–306.

[5] Pah, J . C. A. et al. 2018. Pengaruh Waktu Dan Tekanan Gesek Terhadap Kekuatan Tarik Sambungan Paduan Aluminium Dan Baja Karbon Pada Pengelasan Gesek Continuous Drive. *Jurnal Rekayasa Mesin*. 9, no. 1, pp. 51–59.

[6] Taban, E. et al. 2010. Dissimilar friction welding of 6061-T6 aluminum and AISI 1018 steel: Properties and microstructural characterization. *Materials and Design*. 31, no. 5, pp. 2305–2311.

[7] Li, Peng. et al. 2014. Effect of friction time on mechanical and metallurgical properties of continuous drive friction welded Ti6Al4V/SUS321 joints. *Materials and Design*. 56, pp. 649–656.

[8] Nugroho, E., Budiyanto, E., & Suseno, E. B. (2021). Experimental evaluation of mechanical properties of friction welded mild steel. *Turbo: Jurnal Program Studi Teknik Mesin*, 10(1).

[9] Murugan, S. S., Sathiya, P., & Haq, A. N. (2021). Rotary Friction Welding and Dissimilar Metal Joining of Aluminium and Stainless Steel Alloys. *Annals of “Dunarea de Jos” University of Galati. Fascicle*

- XII, Welding Equipment and Technology*, 32, 85-92.
- [10] Bakkiyaraj, M., Lakshminarayanan, A., Yuvaraj, S. & Nagarajan, P. (2021). Effect of friction time on tensile strength and metallurgical properties of friction welded dissimilar aluminum alloy joints. *Materials Testing*, 63(12), 1097-1103. <https://doi.org/10.1515/mt-2021-0049>
- [11] Kumar, R., Upadhyay, V., & Sharma, C. (2022). Effect of pre-weld tempers on mechanical and microstructural behavior of dissimilar friction stir welds of AA2014 and AA7075. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences (IJEMS)*, 28(6), 574-582.
- [12] Singh, T. (2021). Processing of friction stir welded AA6061-T6 joints reinforced with nanoparticles. *Results in Materials*, 12, 100210.
- [13] Unnikrishnan, M. A., Dhas, R., & Edwin, J. (2021). Multi Response Optimization of Process Parameters using Taguchi based Grey Relational Method in FSW of AZ91B Magnesium Alloy. *International Journal of Vehicle Structures & Systems (IJVSS)*, 13(4).
- [14] Bakkiyaraj, M., Lakshminarayanan, A., Yuvaraj, S. & Nagarajan, P. (2021). Effect of friction time on tensile strength and metallurgical properties of friction welded dissimilar aluminum alloy joints. *Materials Testing*, 63(12), 1097-1103. <https://doi.org/10.1515/mt-2021-0049>
- [15] Muthurasu, P., & Kathiresan, M. (2021). Optimization and analysis of microstructural friction stir welded AA5083 grade aluminium alloy. *Journal of ceramic processing research*, 22(6), 697-704.