

Pengaruh Parameter *Friction Welding* untuk Aluminium dan Tembaga: Tinjauan Literatur

Victor Yuardi Risonarta^{1*}, Muhammad Alfath Ziaul Haq¹

¹Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya
Jl. MT Haryono 167, Malang 65145, Indonesia

*Penulis korespondensi; E-mail: victor.risonarta@ub.ac.id

ABSTRAK

Friction welding merupakan metode pengelasan dalam fasa padat dimana penyambungan kedua logam yang dilas dihasilkan dari panas akibat gesekan dan tekanan. *Friction welding* terdiri dari beberapa metode yaitu *friction stir welding*, *linear friction welding* dan *continuous drive friction welding*. Tinjauan literatur ini membandingkan beberapa metode las gesek, cacad las yang dapat muncul diantara metode las gesek tersebut dan metode *friction welding* yang paling sesuai untuk penyambungan poros pompa yang berbahan Aluminium dan Tembaga dan memiliki penampang berbentuk lingkaran karena penyambungan antara Aluminium dan Tembaga tidak dapat dilakukan dengan menggunakan pengelasan fusi. Salah satu alasannya adalah karena perbedaan temperatur lebur yang jauh antara Aluminium dan Tembaga, sekitar 400 °C. Dari studi literatur didapatkan informasi bahwa hasil *friction welding* dapat dipengaruhi oleh kecepatan putar, durasi tekan, gaya aksial tekanan, dan karakteristik material yang digunakan. Dengan menggunakan studi kasus poros pompa, didapatkan bahwa *continuous drive friction welding* merupakan metode yang paling sesuai untuk menyambungkan material poros berbahan Aluminium dan Tembaga karena distribusi temperatur yang merata di seluruh permukaan sambungan las. Kondisi ini akan menghasilkan mikrostruktur dan kualitas sambungan las yang lebih homogen.

Kata Kunci : parameter las, logam tidak sejenis, cacad las, sambungan aluminium dan tembaga.

ABSTRACT

Friction welding is a solid phase welding method where the joining of the two metals being welded is produced from heat due to friction and pressure. Friction welding consists of several methods, i.e. friction stir welding, linear friction welding and continuous drive friction welding. This literature review compares several friction welding methods, welding defects that can appear between the friction welding methods and the most suitable friction welding method for joining pump shafts made of Aluminum and Copper and having a circular cross-section since the fusion welding cannot be used to join the Aluminum and Copper. One of the main reasons is due to the significant difference in melting temperature between Aluminum and Copper, i.e. app. 400 °C. From the literature study, the results of friction welding can be affected by rotational speed, pressure duration, axial pressure force, and characteristics of the material used. By using a case study of the pump shaft, it was found that the continuous drive friction method is the most suitable method to join Aluminum and Copper in pump shaft since the temperature distribution can be homogen across the entire surface of the weld joint. This circumstance will result in a more homogeneous microstructure and quality of the weld joint.

Keywords: *welding parameters, dissimilar metals, welding defects, aluminum and copper joint.*

PENDAHULUAN

Perkembangan industri dalam bidang manufaktur saat ini berkembang dengan pesat. Dalam bidang manufaktur salah satunya adalah proses pengelasan. *Friction welding* (FW) merupakan metode

pengelasan dalam fasa padat atau semi padat. FW memanfaatkan panas yang timbul akibat gesekan saat terjadi kontak fisik dari dua permukaan logam [1]. FW memiliki beberapa keunggulan dibandingkan proses pengelasan dalam fasa cair. FW lebih murah dalam segi biaya serta memiliki kemampuan las yang baik pada metal yang sama atau metal yang berbeda. Selain itu, FW tidak memerlukan bahan pengisi (*filler*). Penyusutan dan deformasi yang relatif rendah dapat timbul saat pengelasan FW sehingga dapat menghasilkan sifat mekanik yang baik [2,3]. Dengan adanya FW logam yang berbeda jenis dapat disambung, maka FW sangat cocok untuk diterapkan pada proses manufaktur atau proses perawatan untuk meningkatkan kehandalan peralatan industry [4,5].

Pengelasan logam yang berbeda jenis, contoh Aluminium dan Tembaga untuk poros pompa, merupakan salah satu keunggulan yang dimiliki FW. Aluminium dan Tembaga memiliki sifat fisik yang berbeda, keduanya namun memiliki keunggulan yang sama antara lain konduktor panas dan listrik yang baik, relative tahan korosi dan dapat diproduksi dengan mudah melalui proses pengecoran [6]. Ketahanan korosi yang tinggi inilah yang menjadi alasan penting dipilihnya Aluminium dan Tembaga sebagai material poros pompa. Studi kasus yang dibahas kali ini adalah poros pompa yang memiliki penampang berbentuk lingkaran. Dibandingkan Tembaga, Aluminium memiliki harga yang jauh lebih murah dan memiliki titik lebur jauh lebih rendah dibandingkan Tembaga. Selain itu, Aluminium banyak dibuat dari bahan bekas sehingga dapat secara ekonomis diproduksi di industri manufaktur [7]. Melihat kondisi demikian, diperlukan strategi pengelasan optimum untuk mendapatkan hasil penyambungan terbaik saat FW antara Aluminium dan Tembaga. Strategi pengelasan yang baik dapat membantu untuk mendapatkan hasil pengelasan terbaik sehingga dapat meningkatkan kualitas sambungan las. Kualitas sambungan las yang baik ini diharapkan dapat menunjang kebutuhan industri baik saat proses manufaktur produk maupun saat proses perawatan mesin-mesin industri. Salah satu metode untuk meningkatkan kualitas pengelasan adalah metode Taguchi. Di bidang manufaktur, metode Taguchi banyak diterapkan untuk memperbaiki kualitas produk, meminimalisir biaya dan membuat produk lebih tahan terhadap gangguan saat proses manufaktur [8].

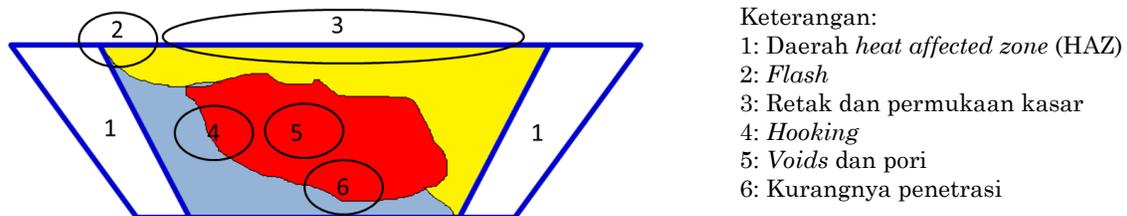
FRICION WELDING

Saat proses FW, Kedua permukaan logam yang bergesekan akan menghasilkan panas yang mendekati titik cair kedua logam dimana permukaan logam yang terdekat dengan lokasi gesekan akan mengalami kenaikan temperatur paling signifikan. FW tidak membutuhkan listrik atau sumber energi lain untuk menaikkan temperatur logam yang dilas. Kenaikan temperatur terjadi akibat dari gesekan kedua permukaan logam atau antara pin dan kedua permukaan logam [9]. Proses penyambungan menggunakan pengelasan fusi sulit dilakukan untuk logam yang memiliki temperatur lebur jauh berbeda, seperti antara Aluminium dan Tembaga. Oleh karena itu, FW sangat cocok digunakan untuk penyambungan Aluminium dan Tembaga karena proses penyambungan tidak terjadi dalam fasa cair. Karena pada FW kedua logam tidak mencapai fasa cair, maka deformasi dan penyusutan yang terjadi relatif rendah pada FW sehingga akan menghasilkan sifat mekanik yang baik pada hasil sambungan [10]. Pengelasan metode FW memiliki keunggulan lain yaitu tidak memerlukan logam pengisi (*filler*) dan gas ketika proses pengelasan. Kemungkinan terjadinya inklusi terak dan porositas pada FW dapat diminimalkan. FW juga memiliki kelebihan dari sisi lingkungan karena pada proses FW tidak menghasilkan asap atau gas berlebih. Selain itu pada FW dapat mengurangi kerja mesin serta biaya pemeliharaan serta dapat meningkatkan kapasitas dan mengurangi biaya perkakas. FW juga memiliki toleransi yang lebih akurat pada dimensi sambungan las [11]. Meskipun FW memiliki banyak kelebihan, FW juga memiliki kekurangan. Kekurangan dari metode FW yaitu harga mesin FW yang mahal meskipun biaya proses pengelasan rendah. Meskipun FW memiliki kontrol dimensi yang lebih akurat tetapi penentuan proses parameter lebih rumit karena harus mempertimbangkan waktu, kecepatan putar, *feed rate* serta gaya tekan. Kemampuan menyambungkan dua material yang berbeda dapat dilakukan dengan FW akan tetapi FW tidak dapat menyambung dua material yang memiliki perbedaan karakteristik yang terlalu jauh [12]. Pengelasan FW pada logam yang berbeda mempunyai tingkat kesulitan tersendiri karena terdapat perbedaan sifat metalurgi, termal, mekanik, dan fisik dari kedua jenis logam tersebut [13-15]. Dari sisi mobilitas, salah satu kelemahan mesin FW adalah sulit untuk dipindahkan atau dibawa.

Mengingat salah keunggulan FW adalah dapat melakukan penyambungan terhadap jenis logam yang berbeda maka keunggulan ini sangat berguna di industri manufaktur. Pengelasan metal yang berbeda merupakan salah satu solusi untuk mendapatkan karakteristik dari logam yang berbeda untuk mendapatkan fungsi yang berbeda, sehingga diharapkan mendapatkan kekuatan yang diinginkan [16,17]. Selain itu, proses desain dan manufaktur komponen dapat dilakukan dengan lebih ekonomis karena perpaduan logam yang mahal dan logam yang lebih murah dapat juga digunakan di komponen tersebut. Sebagai contoh adalah desain komponen poros pompa yang menggabungkan antara Tembaga yang relatif mahal dan Aluminium yang relatif murah. Selain itu, alat mesin FW juga relatif murah [18]. Meskipun FW memiliki banyak kelebihan karena dilakukan dalam kondisi padat atau semi padat, tapi beberapa cacad las dapat muncul antara lain [19-22]:

- *Wormholes, pores* dan *voids*: Cacad ini kemungkinan disebabkan oleh temperatur yang kurang tinggi dan fluiditas material yang rendah. Hal ini dapat terjadi pada dua logam yang memiliki temperatur lebur jauh berbeda dan dapat muncul saat penyambungan antara Aluminium dan Tembaga di kasus poros pompa
- Retak *kissing bond*: Disebabkan karena kurangnya proses perekatan secara kimia dan mekanik, terlebih jika kedua material memiliki jenis ikatan berbeda
- *Fusion laps* yang tidak sempurna: Disebabkan oleh kehadiran kotoran karena proses pembersihan permukaan sebelum proses las yang tidak baik
- *Flash*: Disebabkan oleh temperatur yang terlalu tinggi
- Penipisan material: Disebabkan oleh gaya aksial yang terlalu besar
- Retak: Disebabkan pemanasan berlebih dan pendinginan tidak seragam
- Penetrasi yang kurang: Disebabkan oleh gaya aksial yang terlalu rendah, temperatur yang kurang tinggi sehingga fluiditas metal rendah, atau perbedaan ketebalan yang terlalu besar diantara kedua logam.

Skematik lokasi beberapa cacad ini dapat dilihat di Gambar 1. Beberapa metode digunakan untuk meminimalkan cacad di sambungan las dengan menggunakan metode FW dan meningkatkan kualitas parameter pengelasan FW. Dari sekian banyak metode tersebut, metode Taguchi ternyata sudah diaplikasikan untuk meningkatkan kualitas FW [23,24]. Untuk proses optimalisasi FW, metode Taguchi ini digunakan untuk melakukan identifikasi mengenai sumber utama masalah yang dapat mempengaruhi kualitas sambungan las. Beberapa metode FW yaitu *friction stir welding* (FSW), *linear friction welding* (LFW) dan *continuous drive friction welding* (CDFW).

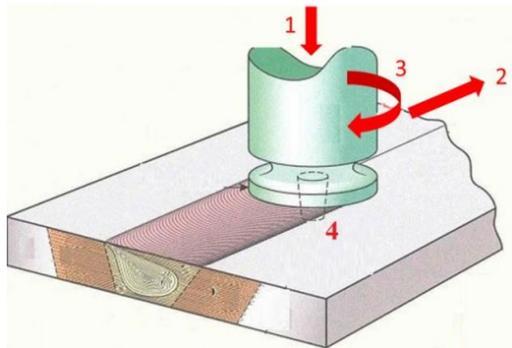


Gambar 1. Skematik Lokasi Sering Terjadinya Cacad pada Pengelasan Menggunakan Metode *Friction Welding*

FRICITION STIR WELDING

Seperti pada pengelasan FW umumnya, pengelasan logam yang berbeda jenis juga dapat dilakukan dengan metode *friction stir welding* (FSW). FSW memanfaatkan gesekan dari pin yang berputar terhadap material logam yang diam sehingga timbul panas dan terbentuk sambungan (Gambar 2) [4]. Kelebihan FSW adalah porositas dan retak dapat lebih sedikit. Mikrostruktur butir sambungan las FSW halus sehingga dapat menghasilkan sifat mekanik yang baik di sambungan las sesuai dengan persamaan Hall-Petch. Proses FSW efisien sehingga biaya yang dibutuhkan rendah dan dapat digunakan untuk mengelas banyak jenis logam [25]. Proses FSW dapat dilakukan dengan menggunakan alat pengelasan yang sederhana atau dapat memanfaatkan mesin frais vertikal yang memutar pin

las yang berfungsi sebagai penghasil energi panas gesekan [26]. Pin las FSW harus terbuat dari logam yang memiliki titik lebur yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan kedua logam yang akan dilas supaya selama proses pengelasan tidak terjadi pengotor dari logam pin yang terdeformasi [27].



Keterangan:

1. Gaya aksial ke bawah
2. Arah pengelasan
3. Indentor yang berputar
4. Pin

Gambar 2. Ilustrasi Proses *Friction Stir Welding* [4]

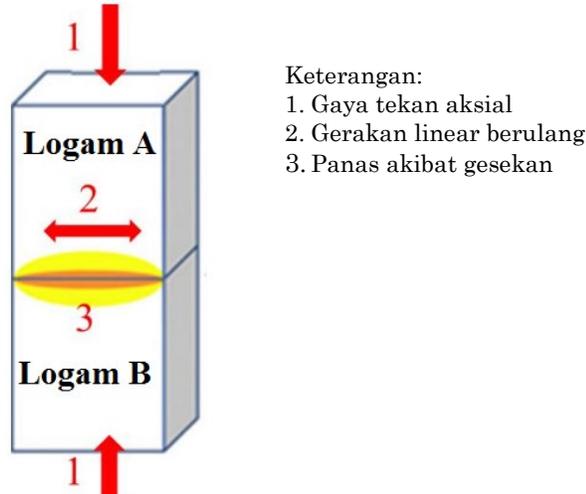
Bentuk pin pada FSW dapat mempengaruhi dari hasil pengelasan. Helmi dan Tarmizi [28] melaporkan bahwa bentuk pin yang berbeda dapat memberikan sifat mekanik dan struktur mikro yang berbeda. Kualitas sambungan pada FSW juga dipengaruhi oleh kecepatan putar pin [29]. Putaran pin FSW yang lebih tinggi akan menghasilkan panas yang lebih tinggi dan meningkatkan kekuatan tarik. Modulus elastisitas tertinggi sebesar 68,1 GPa terjadi pada putaran 3600 rpm. Sebaliknya, kenaikan kecepatan las malah menurunkan kekuatan tarik. Mohammed [30] melaporkan bahwa kedalaman penekanan pin pada FSW dapat mempengaruhi kekuatan tarik dari hasil pengelasan. Selain itu, didapatkan bahwa tegangan tarik terendah terjadi pada kedalaman pembedahan paling dangkal.

Saat pengelasan metode FSW dapat terjadi cacad pada lasan misalnya porositas yaitu rongga udara yang terperangkap dalam sambungan las yang dapat mengurangi kekuatan mekanik sambungan las [31]. Cacad *tunnel defect* muncul karena terbentuknya terowongan atau rongga di dalam sambungan las yang disebabkan oleh aliran material yang tidak sempurna. Cacad penetrasi yang kurang (*lack of penetration*) disebabkan oleh kurangnya penetrasi pin FSW ke dalam material dan cacad ini akan menurunkan kekuatan di sambungan. Cacad *kissing bond* muncul akibat gaya adhesi yang kurang memadai di kontak antara dua permukaan yang dilas. Cacad pembentukan *flash* terjadi oleh pembentukan material berlebih di sekitar sambungan las karena aliran material yang berlebihan akibat temperatur yang terlalu tinggi [32]. Pada kasus sambungan poros pompa menggunakan material Aluminium yang murah dan Tembaga yang mahal, metode FSW kurang cocok digunakan karena kenaikan temperatur hanya terjadi di permukaan benda kerja yang terkena gesekan dengan pin. Kondisi ini menyebabkan distribusi temperatur yang kurang merata di seluruh permukaan sambungan dan dikuatirkan akan menurunkan kekuatan sambungan.

LINEAR FRICTION WELDING

Linear friction welding (LFW) menggesekkan dua permukaan material logam secara linear dan berkecepatan tinggi [33-36]. Gaya aksial juga tetap diperlukan dalam proses LFW seperti diilustrasikan di Gambar 3 [4]. Sama seperti FW lainnya, metode LFW ini juga tidak memerlukan logam pengisi untuk pengelasan. LFW adalah proses yang sangat konsisten dan cepat, yang dapat menciptakan sambungan dalam waktu singkat. LFW memiliki beberapa keunggulan dibandingkan metode pengelasan FW lainnya. LFW memiliki kecepatan pengelasan yang lebih tinggi yang akan meningkatkan produktifitas dan kemampuan untuk menggabungkan komponen yang lebih panjang dan lebih tebal. Pengelasan dengan karakteristik material yang berbeda juga dapat dilakukan dengan metode pengelasan LFW. LFW dapat menghasilkan hasil lasan yang lebih presisi. Kualitas sambungan hasil

pengelasan metode LFW dipengaruhi kondisi permukaan benda kerja seperti kekasaran dan kebersihan [37]. Perbedaan karakteristik material yang berbeda juga dapat mempengaruhi dari hasil pengelasan. Liu dkk melaporkan bahwa kecepatan gesekan mempengaruhi kekerasan di sambungan [38]. Jika kecepatan gesek tinggi maka nilai kekerasan akan semakin tinggi. Sebaliknya, jika kecepatan putar rendah maka nilai kekerasannya akan rendah.



Gambar 3. Ilustrasi Proses *Linear Friction Welding* [4]

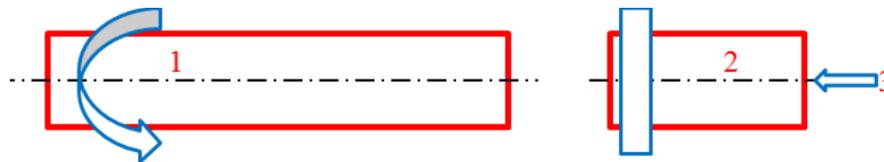
CONTINUOUS DRIVE FRICTION WELDING

Continuous drive friction welding (CDFW) dilakukan dengan menggesekkan material logam yang berputar terhadap logam yang diam seperti diilustrasikan di Gambar 4 [4]. Gesekan yang dihasilkan oleh gerakan rotasi kontinyu dari salah satu benda kerja terhadap yang lain dapat menghasilkan panas [39]. Material dengan temperatur tinggi akan mengalami deformasi plastis, regangan yang besar, dan laju regangan yang besar dalam kondisi tekanan aksial yang tinggi. Pengelasan model ini banyak dilakukan menggunakan material yang berbentuk silinder seperti poros pompa. Seperti pada LFW, CDFW juga tidak memerlukan logam pengisi atau fluks. Hasil pengelasan metode CDFW dipengaruhi oleh tekanan gesek dan durasi gesek (Tabel 1) [40]. Semakin lama durasi gesekan akan menghasilkan kekuatan tarik sambungan yang maksimum dan kemudian menurun jika durasi gesekan terlalu tinggi karena penyerapan panas berlebih pada durasi gesekan yang berlebih tersebut. Kondisi ini akan memperluas daerah *heat affected zone* (HAZ). Kekuatan penekanan pada saat pengelasan juga mempengaruhi hasil dari lasan. Semakin besar kekuatan penekanan maka nilai *ultimate tensile strength* (UTS) akan mengalami kenaikan. Kekuatan penekanan sebesar 24 MPa hanya menghasilkan UTS maksimum sebesar 116 MPa. Kekuatan penekanan sebesar 32 MPa menghasilkan UTS maksimum 162 MPa. Kekuatan penekanan sebesar 40 MPa menghasilkan UTS maksimum 186 MPa.

Pada metode pengelasan CDFW juga muncul beberapa cacad pada hasil lasan. Rongga atau lubang terbentuk karena kondisi pengelasan yang tidak sesuai. *Excessive flash* merupakan *flash* berlebih akibat tekanan atau temperatur yang terlalu tinggi. Retakan mikro terjadi karena kecepatan alat yang tidak sesuai atau adanya presipitasi elemen. *Fusion laps* yang tidak sempurna terjadi karena adanya kotoran pada permukaan atau tepi benda kerja [41]. Untuk menghindari cacad tersebut, penting untuk mengatur parameter pengelasan dengan tepat. Jika pada kasus penyambungan Aluminium dan Tembaga untuk poros pompa, maka penyambungan menggunakan metode CDFW paling tepat digunakan karena kenaikan temperatur dapat merata di seluruh permukaan sambungan. Selanjutnya tentu diperlukan proses permesinan lebih lanjut, misalnya menggunakan mesin bubut, untuk menyeragamkan diameter di sisi kedua metal dan juga mensimetriskan titik pusat penampang lingkaran poros pompa tersebut.

Tabel 1. Pengaruh tekanan dan durasi gesek terhadap nilai kekuatan tarik UTS dan regangan di daerah sambungan pada pengelasan *continuous drive friction welding* [40]

Tekanan gesek [MPa]	Durasi gesek [detik]	UTS [MPa]	Regangan [%]
24	5	90	0,19
	7	93	0,21
	9	116	0,22
	11	68	0,18
32	5	122	0,24
	7	138	0,47
	9	162	0,54
	11	128	0,22
40	5	160	0,40
	7	186	0,70
	9	167	0,44
	11	144	0,31



Keterangan:
 1 Logam yang berputar secara kontinyu
 2 Logam yang diam
 3 Gaya tekan

Gambar 4. Ilustrasi Proses *Continuous Drive Friction Welding* [4]

FRICITION WELDING PADA SAMBUNGAN ALUMINIUM DAN TEMBAGA

Dua metal Aluminium dan Tembaga sulit disambungkan melalui proses pengelasan fusi karena terdapat perbedaan signifikan dalam komposisi kimia dan sifat fisik kedua logam. Permasalahan muncul karena titik lebur kedua logam tersebut sangat jauh. Tembaga murni memiliki temperatur lebur di sekitar 1.080 °C sedangkan aluminium murni memiliki temperatur lebur sekitar 670 °C [42]. Dengan demikian, FW menjadi alternatif untuk menyambungkan Aluminium dan Tembaga, contoh pada sambungan poros dari bahan Aluminium dan Tembaga. Kedua logam tersebut memiliki keunggulan yang mirip antara lain konduktifitas panas dan listrik yang baik dan relatif tahan korosi sehingga cocok diaplikasikan sebagai poros pompa yang akan mengalami beban korosi. Aluminium memiliki sifat mekanik dan fisika yang baik antara lain memiliki densitas sekitar 2.700 kg/cm³, konduktor listrik dan thermal yang baik, relatif tahan korosi dan dapat didaur ulang dengan mudah [43],[44]. Namun demikian, perbedaan temperatur lebur antara Aluminium dan Tembaga sekitar 400 °C akan berpengaruh signifikan dalam proses FW karena proses FW harus dilakukan dalam kondisi padat atau semi padat. Perbedaan sifat kedua logam ini perlu dikaji sangat mendalam untuk mendapatkan hasil pengelasan yang baik. Sebagai contoh, riset harus dilakukan untuk perlu mengetahui durasi penekanan, besar gaya penekanan, dan kecepatan putar yang optimal. Beberapa penelitian telah dilakukan untuk menentukan parameter yang tepat untuk mendapatkan kualitas sambungan terbaik pada pengelasan metode FW untuk logam Tembaga dan Aluminium.

Haq dkk [4] menyampaikan bahwa poros pada pompa dapat dibuat menggunakan material Aluminium dan Tembaga yang disambungkan dengan metode FW. Priyanto dkk [45] meneliti pembentukan komposit Aluminium dan Tembaga dengan komposisi yang berbeda di daerah sambungan las. Struktur kristal yang terbentuk pada sisi atas sambungan menentukan kekerasan dan kekuatan tarik pada daerah pengelasan. Zhou dkk [46] mendapatkan hasil kekuatan tarik pada sambungan

FSW logam Aluminium dan Tembaga mencapai 203,4 MPa yang setara dengan 71,3% kekuatan logam dasar Tembaga. Dilaporkan juga bahwa sambungan FSW Aluminium dan Tembaga mengalami kegagalan pada HAZ sisi Aluminium dan permukaan rekahan menunjukkan karakteristik rekahan yang ulet. Neupane [34] melaporkan bahwa saat kekerasan diukur pada interval 20 μ pada sisi Aluminium dan Tembaga, terjadi peningkatan kekerasan rata-rata. Kekerasan sambungan di sisi Aluminium mencapai sekitar 111-114 HV dibandingkan dengan Aluminium murni sekitar 94 HV yang setara dengan kenaikan sekitar 20% dibandingkan dengan kekerasan Aluminium murni. Demikian juga, kekerasan sambungan di sisi Tembaga mencapai 135-140 HV dibandingkan dengan Tembaga murni sekitar 126 HV atau meningkat 10% dari kekerasan Tembaga murni. Kekerasan di sambungan las meningkat secara signifikan pada kedua kasus dengan *interlayer* dan tanpa *interlayer* akibat terbentuknya fasa intermetalik Al_xCu_y . Kekerasan maksimum pada sambungan tanpa *interlayer* sekitar 180 HV dan kekerasan maksimum pada sambungan dengan *interlayer* sekitar 159 HV. Hasil kekerasan dalam penelitian tersebut sedikit lebih besar dari kekerasan yang diukur oleh Ratkovic dkk [47]. Mereka melaporkan bahwa kekerasan di dekat sambungan adalah 130 HV ke arah sisi Tembaga.

Li dkk [48] menyampaikan bahwa sambungan Aluminium dan Tembaga dapat dilakukan dengan menggunakan proses pengelasan CDFW dan kekuatan tarik pengelasan Aluminium dan Tembaga mencapai maksimum pada 35 MPa. Kondisi ini dicapai pada kondisi tekanan gesek 12 MPa dan durasi gesek 12 detik. Penerapan *interlayer* Aluminium sangat penting untuk mendapatkan sambungan Aluminium dan Tembaga yang baik. Dalam penelitian tersebut, ketebalan optimal dari *interlayer* Aluminium adalah sekitar 0,47 mm. Milašinović dkk [49] melaporkan bahwa kekerasan di daerah sambungan sisi Aluminium lebih tinggi sekitar 5-10% dibandingkan di daerah Aluminium murni. Sementara itu, kekerasan di daerah sambungan sisi Tembaga lebih tinggi sekitar 10-20% dibandingkan di daerah Tembaga murni. Sementara itu, konduktifitas listrik di sambungan Aluminium dan Tembaga berada di tengah-tengah antara konduktifitas listrik Aluminium dan Tembaga.

Purnomo [50] melaporkan bahwa kecepatan putar dan waktu sangat berpengaruh terhadap struktur mikro di sambungan las. Sementara itu, Setiawan dkk [51] menyampaikan bahwa kekuatan tarik yang didapatkan oleh sambungan las Aluminium dan Tembaga cenderung menurun dengan kenaikan kecepatan putar. Selain itu, Ikhsan dkk [52] melaporkan bahwa bentuk bentuk pin juga mempengaruhi kekuatan tarik dari pengelasan Aluminium dan Tembaga. Chapke dkk [53] melaporkan bahwa kekuatan tarik hasil pengelasan FW Aluminium tipe AA6063 dengan Tembaga dapat mencapai 222,88 MPa menggunakan tekanan gesek 48 kg/mm² dan tekanan aksial 97 kg/mm² pada durasi gesek selama 1 detik dan durasi tekan selama 3 detik. Untuk mendapatkan hasil tersebut, pin terbuat dari baja tahan karat dengan kecepatan rotasi 1800 rpm.

Sementara itu, Akinlabi dan Akinlabi [54] melaporkan bahwa efisiensi sambungan tertinggi untuk pengelasan Aluminium dan Tembaga menggunakan metode FSW adalah 79% yang dicapai saat kecepatan rotasi 600 rpm dan *feed rate* 300 rpm (Tabel 2). Dilaporkan pula bahwa patahan pada nilai UTS maksimal ini terjadi di daerah *thermo-mechanically affected zone* (TMAZ) sisi Aluminium. Saat *feed rate* 50 dan 150 mm/menit, fase intermetalik AlCu muncul. Di sisi lain, fasa intermetalik Al₂Cu muncul saat *feed rate* 300 mm/menit karena *feed rate* yang tinggi akan mengurangi asupan panas pada daerah sambungan. Kah dkk [55] melaporkan bahwa pembentukan fasa intermetalik yang bersifat getas dan pengaruhnya terhadap sifat las terutama dipengaruhi oleh kecepatan pengelasan, asupan panas, sifat termal logam dasar dan sambungan serta fluiditas logam dasar dan pada logam sambungan. Kumar [56] melaporkan bahwa fasa intermetalik saat pengelasan Aluminium dan Tembaga ditemukan di daerah lasan. Sementara itu, Shirlyay dkk [57] melaporkan bahwa kekerasan sambungan las lebih tinggi jika menggunakan pin berbentuk segitiga tetapi kenaikan temperatur lebih tinggi jika menggunakan pin berbentuk silinder.

Tabrizi dkk [58] melakukan riset proses pengelasan FSW untuk Aluminium AA1050 dan Tembaga murni. Didapatkan bahwa nilai kekuatan tarik UTS tertinggi adalah 160 MPa yang didapat dengan menggunakan pin berbentuk kerucut dengan *feed rate* 12 mm/menit dan kecepatan rotasi 1200 rpm. Pada penelitiannya, Pravala dan Kiran [59] menggunakan mesin bor vertikal untuk melakukan

penyambungan Aluminium AA6061 dan Tembaga murni menggunakan metode FSW. Mereka mendapatkan kekuatan tarik UTS tertinggi adalah 76.8 MPa saat kecepatan rotasi 1120 rpm dengan *feed rate* 15-30 mm/menit (Tabel 3).

Tabel 2. Pengaruh *feed rate* terhadap nilai kekuatan tarik UTS pada pengelasan *friction stir welding* antara Aluminium dan Tembaga murni [54]

Kecepatan rotasi pin [rpm]	<i>Feed rate</i> [mm/menit]	UTS rerata [MPa]	Efisiensi sambungan [%]	Lokasi patahan
600	50	134	55	TMAZ sisi Cu
	150	177	73	TMAZ sisi Cu
	300	192	79	TMAZ sisi Al

Tabel 3. Pengaruh kecepatan rotasi terhadap nilai kekuatan tarik UTS dan kekerasan sambungan pada pengelasan *friction stir welding* antara Aluminium AA6061 dan Tembaga murni [59]

Kecepatan rotasi [rpm]	UTS [MPa]	Kekerasan [HV]
710	37.7	372
900	55.9	400
1120	76.8	460

KESIMPULAN DAN SARAN

Studi literatur diatas tentang pengaruh sambungan FW untuk logam berbeda jenis misalnya pada Aluminium dan Tembaga. Kualitas sambungan pengelasan gesek dipengaruhi oleh kecepatan putar, durasi tekan, bentuk pin, beban tekan, *feed rate* dan karakteristik material yang digunakan. Oleh karena itu pengelasan metode FW perlu menentukan kecepatan, durasi gesek, dan beban tekan yang tepat. Pengelasan metode *frition welding* dapat diaplikasikan untuk industri, baik untuk proses manufaktur atau untuk proses perawatan, karena hasil pengelasan yang lebih presisi dan murah dalam segi biaya serta waktu yang dibutuhkan lebih singkat. Untuk kasus penyambungan dua logam Aluminium dan Tembaga yang akan digunakan sebagai poros pompa, metode CDFW dinilai paling sesuai untuk digunakan karena distribusi temperatur yang dihasilkan di seluruh permukaan dapat merata. Hal ini akan menghasilkan sifat mekanik yang merata di seluruh permukaan sambungan.

Metode pengelasan FW dalam kondisi padat atau semi padat memiliki banyak keunggulan meskipun juga memiliki kekurangan. Dalam segi biaya oprasional las gesek memang lebih murah, akan tetapi harga dari mesin FW lebih mahal. Untuk penelitian sebelum melakukan pengujian pada logam berbeda jenis dapat dilakukan pengujian yang sejenis agar bisa mengetahui perbandingan dari kekuatan logam yang sejenis dan tidak sejenis. Untuk membandingkan sifat mekanik, pegujian sifat mekanik saat pengelasan FW antara Aluminium dan Tembaga dapat dibandingkan untuk kasus pengelasan FW dilakukan pada lasan Aluminium dan Aluminium atau untuk kasus pengelasan FW antara Tembaga dan Tembaga. Penelitian juga perlu dilakukan untuk logam yang memiliki temperatur lebur rendah dan juga material non logam seperti polimer. Sebagai contoh, timah putih murni memiliki temperatur berkisar 217 °C, jauh lebih rendah dari aluminium murni sekitar 670 °C [60]. Proses penyambungan polimer dan logam untuk aplikasi industri, contoh untuk *conveyor belt*, masih banyak dilakukan dengan proses polimerisasi, menggunakan lem atau menggunakan baut, sehingga perlu diteliti mengenai proses penyambungan polimer dan logam dengan menggunakan metode FW [61]. Pada pengelasan logam tidak sejenis rawan muncul korosi galvanik. Dengan demikian perlu dilakukan penelitian sistem anti korosi yang baik, misalnya penggunaan *sacrified anode*. Selain itu, Aluminium yang digunakan pada sistem Aluminium dan Tembaga juga harus memiliki ketahanan korosi tinggi misalnya dengan penambahan elemen Nickel di paduan Aluminium tersebut [6]. Dengan demikian perlu dilakukan penelitian mengenai pengaruh kandungan Nickel yang tinggi di Aluminium terhadap kualitas sambungan las.

PENGAKUAN

Penulis menyampaikan terima kasih atas bimbingan dan dorongan yang diberikan oleh para dosen di Departemen Teknik Mesin Universitas Brawijaya - Indonesia, sehingga penulis dapat menyelesaikan karya ilmiah ini dengan sebaik-baiknya. Karya ilmiah ini dibuat tanpa bantuan *artificial intelligent* (AI) dalam bentuk apapun. Karena tinjauan literatur ini bersifat independen dan tidak mendapatkan bantuan dana dari pihak manapun, maka dengan ini penulis dapat mendeklarasikan bebas konflik kepentingan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] I. Sofwan & E. Erwanto, "Fenomena las gesek (*Friction Welding*) dengan variasi waktu gesek pada material AISI 1040 dengan kuningan", *Jurnal Inovasi Teknologi Terapan*, vol. 1, no. 2, pp. 374-382, 2023, doi: <https://doi.org/10.33504/jitt.v1i2.45>
- [2] B. Margono, H.I. Atmaja, J. Wibowo, A. Alfayed, R.F. Rananto, "Effect of pressure and welding time on physical and mechanical properties of dissimilar metal AISI 316 austenitic stainless steel and AISI 4140 alloy steel joints using friction welding", *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1517, pp. 012018, 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1517/1/012018
- [3] R. Selvaraj, K. Shanmugam, P. Selvaraj, B. Prasanna-Nagasai, V. Balasubramanian, "Optimization of process parameters of rotary friction welding of low alloy steel tubes using response surface methodology", *Forces in Mechanics*, vol. 10, 2023, doi: 10.1016/j.finmec.2023.100175
- [4] M.A.Z. Haq, A.S. Widodo, H. Saputra, "Application of friction welding for pump design and manufacturing: a comprehensive review", *Mechta*, vol. 5, no. 1, pp. 30-37, 2024, doi: 10.21776/MECHTA.2024.005.01.4
- [5] V.Y. Risonarta & A.K. Wardhani, "Increasing profitability of a manufacturing company by using the total productive maintenance approach: a review", *Mechta*, vol. 4, no. 1, pp. 39-50, 2023, doi: 10.21776/MECHTA.2023.004.01.5
- [6] W. Suprpto, V.Y. Risonarta, A.S. Widodo, "Investigation of microstructure and corrosion resistance of silumin after nickel and copper addition", *Eureka: Physics and Engineering*, vol. 3, no. 2, 2024, pp. 137-147, doi: 10.21303/2461-4262.2024.003086
- [7] V.Y. Risonarta, J. Anggono, S. Nugrowibowo, A. Kristoforus, "The influence of flux type and scrap size on recycling yield of al drink cans", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 1034, 2021, doi: 10.1088/1757-899X/1034/1/012179
- [8] D. Pradeep & M.B. Sorte, "Optimization of welding parameters using taguchi method for submerged arc welding on spiral pipes", *International Journal of Recent Technology and Engineering*, vol. 3, no. 5, pp.50-54, 2013
- [9] P.E. Setyawan, Y.S. Irawan, W. Suprpto, "Kekuatan tarik dan porositas hasil sambungan las gesek aluminium 6061 dengan berbagai suhu aging", *Jurnal Rekayasa Mesin*, vol. 5, no. 2, pp. 141-148, 2014
- [10] E. Nugroho, E. Budiyanto, E.B. Suseno, "Experimental evaluation of mechanical properties of friction welded mild steel", *Turbo*, vol. 10, no. 1, pp. 136-141, 2021, doi: 10.24127/trb.v10i1.1598
- [11] M. Maalekian, "Friction welding - critical assessment on literature", *Science and Technology of Welding & Joining*, vol. 12, no. 8, pp. 738-759, 2007, doi: 10.1179/174329307X249333
- [12] A. Ojetoye, A. Samson, O. Oludare, "Friction welding processes: a review", *FUOYE Journal of Engineering and Technology*, vol. 9, no. 1, pp. 103-110, 2024, doi:10.4314/fuoyejet.v9i1.16
- [13] Y. Wei, J. Li, J. Xiong, F. Huang, F. Zhang, S.H. Raza, "Joining aluminum to titanium alloy by friction stir lap welding with cutting pin", *Materials Characterization*, vol. 71, pp. 1-5, 2012, doi: 10.1016/j.matchar.2012.05.013
- [14] J. Chatha & A. Handa, "Rotary friction welding of dissimilar materials", *International Journal of Recent Technology and Engineering*, vol. 8, no. 4, pp. 10361-10369, 2019, doi: 10.35940/ijrte.D7456.118419
- [15] C. Shanjeevi, J.J. Arputhabalan, R. Dutta, P. Pradeep, "Investigation on the effect of friction welding parameters on impact strength in dissimilar joints", *IOP Conf. Series: Materials Science*

- and Engineering*, vol. 197, 2017, doi:10.1088/1757-899X/197/1/012069
- [16] D.P. Rajak, D. Pagar, P.L. Menezes, A. Eyvazian, “Friction-based welding processes: friction welding and friction stir welding”, *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 34, no. 1, pp. 1-25, 2020, doi:10.1080/01694243.2020.1780716
- [17] M. Sahin, H.E. Akata, “Joining with friction welding of plastically deformed steel”, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 142, no. 1, pp. 239-246, 2023, doi: 10.1016/S0924-0136(03)00589-2
- [18] M.A. Bozorgzadeh & M.H. Idris, “Friction stir welding”, *International Journal of Review in Life Sciences*, vol. 5, no. 3, pp. 72-75, 2015
- [19] M. Al-Moussawi & A.J. Smith, “Defects in friction stir welding of steel”, *Metallography, Microstructure, and Analysis*, vol. 7, pp. 194–202, 2018, doi: 10.1007/s13632-018-0438-1
- [20] R. Ruzek & M. Kadlec, “Friction stir welded structures: kissing bond defects”, *International Journal of Terraspace Science and Engineering*, vol. 6, no. 2, pp. 77–83, 2014
- [21] S. Ryan, A. Toumpis, A. Galloway, “Defect tolerance of friction stir welds in DH36 steel”, *Materials & Design*, vol. 87, no. 15, pp. 701–711, 2015, doi: 10.1016/j.matdes.2015.08.064
- [22] Y. Morisada, T. Imaizumi, H. Fujii, “Clarification of material flow and defect formation during friction stir welding”, *Science and Technology of Welding & Joining*, vol. 20, no. 2, pp. 130–137, 2015, doi: 10.1179/1362171814Y.0000000266
- [23] M.K. Bilici, “Application of taguchi approach to optimize friction stir spot welding parameters of polypropylene”, *Materials & Design*, vol. 35, pp. 113-119, 2012, doi: 10.1016/j.matdes.2011.08.033
- [24] C. Shanjeevi, C. Satishkumar, P. Sathiya, P. Jose, “Optimization of friction welding in dissimilar materials through taguchi based grey relational analysis”, *Applied Mechanics and Materials*, vol. 766, pp. 884-889, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.766-767.884
- [25] D. Handoko, T. Prihantono, A. Setiawan, “Analisa variasi putaran friction welding terhadap kekerasan logam aluminium paduan seri 1100-H18”, *Accurate: Journal of Mechanical Engineering and Science*, vol. 3, no. 2, pp. 15-20, 2022, doi: 10.35970/accurate.v3i2.1494
- [26] I. Sukmana & A. Sustiono, “Pengaruh kecepatan putar indenter las gesek puntir (*Friction stir welding*) terhadap kualitas hasil pengelasan aluminium 1100-H18”, *Mechanical*, vol. 7, no. 1, 2016, 10.23960/mech.v7.i1.201603
- [27] M.B. Waluyo & V.D. Waas, “Pengaruh laju pengelasan terhadap kekuatan tarik pengelasan friction stir welding material aluminium”, *Journal Teknik Mesin Elektro Informatika Kelautan dan Sains*, vol. 2, no. 1, pp. 51-55, 2022, 10.30598/metiks.2022.2.1.51-55
- [28] I. Helmi & T. Tarmizi, “Pengaruh bentuk pin terhadap sifat mekanik aluminium 5083–H112 hasil proses friction stir welding”, *Indonesian Journal of Industrial Research*, vol. 11, pp. 31-42, 2017.
- [29] M.B.N., Rahman, A.W. Nugroho, B.S. Wardhana, “Pengaruh *feed rate* dan kecepatan putar pin tool Friction Stir Welding (FSW) terhadap kekuatan tarik dan kekerasan aluminium 5052”, *Jurnal Material dan Proses Manufaktur*, vol. 2, no. 2, pp. 83-95, 2018, doi: 10.18196/jmpm.2224
- [30] A.A. Mohammed, “Effect of friction stir welding pressure on the microstructure and mechanical properties of weld joints”, *International Journal of Scientific and Engineering Research*, vol. 2, no. 12, pp. 1-5, 2011
- [31] M. Al-Moussawi & A.J. Smith, “Defects in friction stir welding of steel”, *Metallography, Microstructure, and Analysis*, vol. 7, pp. 194-202, 2018, doi: 10.1007/s13632-018-0438-1
- [32] P. Kah, R. Rajan, J. Martikainen, R. Suoranta, “Investigation of weld defects in friction-stir welding and fusion welding of aluminium alloys”, *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, vol. 10, no. 1, pp. 1-10, 2015, doi:10.1186/s40712-015-0053-8
- [33] G. Buffa, M. Cammalleri, D. Campanella, L. Fratini, “Effective linear friction welding machine redesign through process analysis”, *Key Engineering Materials*, vol. 622-623, pp. 484-491, 2015, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.622-623.484
- [34] S. Neupane, “Analysis of linear friction welding of dissimilar metals: aluminum and copper with zinc interlayer”, *PhD Dissertation*, Youngstown State University, USA, 2023.
- [35] A. Vairis & M. Frost, “On the extrusion stage of linear friction welding of Ti 6Al 4V”, *Material Science Engineering A*, vol. 271, pp. 477–484, 1999, doi: 10.1016/S0921-5093(99)00449-9
- [36] A. Vairis & M. Frost, “Modelling the linear friction welding of titanium blocks”, *Material Science Engineering A*, vol. 292, pp. 8–17, 2000, doi: 10.1016/S0921-5093(00)01036-4

- [37] M.R. Kelly, S.R. Schmid, D.C. Adams, J. Fletcher, R. Heard, "Experimental investigation of linear friction welding of AISI 1020 steel with pre-heating", *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 39, pp. 26-39, 2019, doi: 10.1016/j.jmapro.2019.01.038
- [38] C. Liu, Y. Gao, X. Li, W. Li, K. Gan, "Study on microstructure and mechanical property of linear friction welding on 9cr reduced activation ferrite/martensite steel", *Journal of Nuclear Materials*, vol. 531, 2020, doi: 10.1016/j.jnucmat.2020.152011
- [39] H. Zhang, Z. Zhu, "Research and engineering application of continuous-drive friction welding", *Chinese Journal of Engineering*, vol. 44, no. 6, pp. 1002-1013, 2022, doi:10.13374/j.issn2095-9389.2021.03.13.001
- [40] J.C. Pah, Y.S. Irawan, W. Suprpto, "Pengaruh waktu dan tekanan gesek terhadap kekuatan tarik sambungan paduan aluminium dan baja karbon pada pengelasan gesek continuous drive", *Jurnal Rekayasa Mesin*, vol. 9, no. 1, pp. 51-59, 2018, doi: 10.21776/ub.jrm.2018.009.01.8.
- [41] S. Kumari, R. Jain, U. Kumar, I. Yadav, N. Ranjan, K. Kumari, D. Chakravarty, "Defect identification in friction stir welding using continuous wavelet transform", *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 30, pp. 483-494, 2019, doi: 10.1007/s10845-016-1259-1
- [42] G. Gaustad, E. Olivetti, R. Kirchain, "Improving aluminum recycling: a survey of sorting and impurity removal technologies", *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 58, pp. 79-87, 2012, doi: 10.1016/j.resconrec.2011.10.010
- [43] S.C.F. Rosa, L.M. Kipper, J.A. Moraes, A.L. Silva, "Aluminum recycling, innovations and future perspectives: a systematic literature review", *International Journal of Development Research*, vol. 12, no. 2, pp. 54035-54039, 2022, doi: 10.37118/ijdr.23955.02.2022
- [44] V.Y. Risonarta, J. Anggono, Y.M. Suhendra, S. Nugrowibowo, Y. Jani, "Strategy to improve recycling yield of aluminium cans", *E3S Web of Conferences*, vol. 130, pp. 1-8, 2019, doi: 10.1051/e3sconf/201913001033
- [45] T.H. Priyanto, B. Bharoto, H. Mugirahardjo, M.R. Muslih, "Analysis of crystal structure of the welds with friction-stir welding method on the retreating side for bimetallic dissimilar Aa6061-Cu using neutron diffraction technique", *Jurnal Sains Materi Indonesia*, vol. 14, no. 3, pp. 188-192, 2013, doi: 10.17146/jsmi.2013.14.3.4409
- [46] J. Zhou, D. He, R. Zhang, "Effect of pin offset on interface evolution and fracture behavior of aluminum/copper dissimilar friction stir welded", *Materials Today Communications*, vol. 37, no. 4, pp. 38-49, 2023, doi: 10.1016/j.mtcomm.2023.107585
- [47] N.R. Ratković, D.W. Arsić, V.N. Lazić, R.R. Nikolić, B. Hadzima, P. Palček, A.S. Sedmak, "Influence of friction welding parameters on properties of the al-cu joint", *FME Transactions*, vol. 45, no. 1, pp. 165-171, 2017, doi: 10.5937/fmet1701165R
- [48] P. Li, J. Li, H. Dong, C. Ji, "Metallurgical and mechanical properties of continuous drive friction welded copper/alumina dissimilar joints", *Materials & Design*, vol. 127, pp. 311-319, 2017, doi: 10.1016/j.matdes.2017.04.093
- [49] V. Milasinovic, A. Alil, M. Milasinovic, A. Vencl, M. Hatala, S. Dikic, B. Gligprojevic, "Continuous drive friction welded al/cu joints produced using short welding time, elevated rotational speed, and high welding pressures", *Materials*, vol. 17, pp. 1-29, 2024, doi: 10.3390/ma17133284
- [50] A. Purnomo, "Struktur mikro sambungan friction welding antara bahan paduan tembaga dan paduan aluminium akibat waktu tekanan berbeda", *Jurnal Rekayasa Mesin*, vol. 10, no. 3, pp. 95-102, 2016, doi: 10.32497/rm.v10i3.205.
- [51] I. Setiawan, S. Sunardi, R. Lusiani, S. Suryana, "Karakteristik sifat mekanik hasil pengelasan gesek aluminium dengan tembaga menggunakan variasi kecepatan putar dan kekasaran permukaan kontak", *Malikussaleh Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 6, no. 3, pp. 28-33, 2023, doi: 10.29103/mjmst.v6i3.10301.
- [52] M. Ikhsan, B. Siswandi, Z. Zulkarnain, "Analisis pegujian tarik pada penyambungan aluminium-tembaga dengan proses *Friction Stir Welding*", *Jurnal Inovtek Polbeng*, vol. 12, no. 1, pp. 75-81, 2022, doi: 10.35314/ip.v12i1.2476
- [53] Y. Chapke, D. Kamble, S.M.S. Shaikh, "Friction Welding of aluminium alloy 6063 with copper", *E3S Web of Conferences*, vol. 170, 2020, doi: 10.1051/ conf/202017002004
- [54] E.T. Akinlabi & S.A. Akinlabi, "Friction Stir Welding of aluminium and copper: fracture surface characterizations", *Proceedings of the World Congress on Engineering 2014 Vol II*, London, U.K, 2014

- [55] P. Kah, C. Vimalraj, J. Martikainen, R. Suoranta, "Factors influencing Al-cu weld properties by intermetallic compound formation", *Journal of Materials Science: Materials in Engineering*, vol. 10, no. 10, pp. 1-13, 2015, doi: 10.1186/s40712-015-0037-8
- [56] E.R. Kumar, "Intermetallic formation in friction welded aluminum to copper with nickel interlayer", *International Journal of Engineering Science Invention*, vol. 7, no. 4, pp 44-50, 2018
- [57] M. Shirlyay, M. Shamanian, M.R. Toroghinejad, M.A. Jazani, "The influence of tool geometry on the mechanical behaviour of FSSWed Al/Cu ARBed composite", *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 1017, doi:10.1007/s12666-017-1044-7
- [58] M.T. Tabrizi, A.J. Mostahsan, M. Sedighi, "Effects of process parameters on tensile strength of friction stir welded Al-Cu double-layer sheets", *Mechanics & Industry*, vol. 21, no. 503, pp. 1-11, 2020, doi: 10.1051/meca/2020059
- [59] E.K. Pravala & A.U. Kiran, "Weldability of friction stir welding using aluminium alloy with pure copper", *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, vol. 4, no. 10, pp.56-57, 2017, doi: 10.22161/ijaers.4.10.9
- [60] A. Wibowo, J. Anggono, V.Y. Risonarta, "Modifikasi dimensi desain runner dan sprue well pada gravity die casting timah putih untuk mengurangi waste material dan porositas", *Skripsi Sarjana*, Jurusan Teknik Mesin, Surabaya, Universitas Kristen Petra, Indonesia, 2017
- [61] L.P. Alviari, M.F. Anggamawarti, Y. Sanjiwani, V.Y. Risonarta, "Classification of impact damage on a rubber-textile conveyor belt: a review", *Mechta*, vol. 1, no. 1, pp. 21-27, 2020, doi: 10.21776/mechta.2020.001.01.4