

Tool geometry influence on the tensile load of the copper-AA1100 joint using two-stage refilled friction stir spot welding (TS-RFSSW)

Hikaru Trinita Salsabila^a, Ario Sunar Baskoro^{a,1}, Shafira Herdiyan Maritza Salsabila^a,
Gandjar Kiswanto^a, Syarif Junaidi^b

^aDepartemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Indonesia, Kampus UI Depok, Indonesia, 16424

^bDepartment of Mechanical and Nuclear Engineering, College of Engineering,

University of Sharjah, PO Box:27272, Sharjah, UAE

¹Email korespondensi: ario@eng.ui.ac.id

Abstract. Two-stage refilled friction stir spot welding (TS-RFSSW) is a method for eliminating keyholes formed during friction stir spot welding (FSSW). This study aims to investigate the effect of tool geometry on the tensile-shear loads in joints produced by the TS-RFSSW process. Copper and aluminum AA110 sheets, 0.42 mm thick, were joined using the TS-RFSSW process. The tools used in the first stage have taper and triangular pins. In the second stage, pinless tools with diameters of 5 mm and 6 mm were used to close the keyhole. Other process parameters used included a dwell time of 4 seconds, a plunge depth of 600 μm , and a tool tilt angle of 0°. The TS-RFSSW process successfully produced improved joint surfaces with minimal keyholes, thereby increasing tensile shear loads. The tool with a triangular pin produced joints with higher tensile-shear loads due to more intense material flow. On the other hand, increasing the pinless tool diameter in the second stage reduced the tensile-shear loads on the joints. The maximum tensile shear load achieved was 292.78 ± 34.72 N using a triangular pin tool for the first stage and a 5 mm pinless tool for the second stage.

Keywords: Two-stage refilled friction stir spot welding (TS-RFSSW), tool geometry, AA1100, copper, tensile load

Received: September 30, 2025; **Presented:** 9 October 2025; **Publication:** 9 March 2026

DOI: <https://doi.org/10.71452/hw8ka649>

PENDAHULUAN

Friction stir spot welding (FSSW) adalah salah satu teknik pengelasan *solid-state* di mana tidak terjadi peleburan atau pencairan material. Pada teknik ini sambungan dapat terbentuk dengan memanfaatkan tekanan, gesekan, dan/atau panas. Keunggulan dari FSSW salah satunya adalah tidak memerlukan *filler* dan gas inert sehingga lebih ramah lingkungan dan hemat energi. Temperatur kerja yang lebih rendah dari temperature material dasar menjadikan FSSW dapat menghasilkan sambungan las yang minim cacat seperti tegangan sisa, distorsi, dan porositas [1]. Akan tetapi, salah satu kekurangan FSSW adalah adanya *keyhole* setelah proses pengelasan yang dapat mengurangi kekuatan sambungan las [2].

Beberapa teknik telah dilakukan untuk mengatasi masalah ini. *Protrusion* FSSW menggunakan *probeless tool* dan sebuah *protrusion* yang diletakkan pada permukaan *anvil* mesin las dapat menghasilkan sambungan AA6061 dan tembaga yang hampir tidak memiliki *keyhole* [3]. Pelat magnesium AZ31 dan ZK60 tersambung dengan baik tanpa adanya *keyhole* karena aliran material yang kuat pada *double-sided* FSSW (DSFSSW) [4]. *Rotational speed* yang optimal pada *probeless* FSSW (P-FSSW) memungkinkan terbentuknya sambungan AA2024 dan AISI304, meningkatkan kekerasan permukaan, dan tidak terbentuknya senyawa intermetalik [5]. *Refill* FSSW (RFSSW) secara efektif menyambung dan

meningkatkan *static strength* sambungan AZ31B dan AA6061 karena tidak adanya *keyhole* [6].

RFSSW memakan waktu yang lebih singkat dibanding metode *refilling* lain namun membutuhkan peralatan dan khusus dan biaya yang tinggi [7]. Terdapat metode lain untuk RFSSW, yaitu *two-stage* RFSSW (TS-RFSSW). Metode ini berhasil menyambung AA1100 dengan peningkatan beban tarik maksimum seiring meningkatnya *dwell time* dan ukuran *tool* [8]. Di sisi lain, penyambungan AA1100 dan Brass CuZn30 dengan *dwell time* yang tinggi membentuk lapisan intermetalik tidak kontinu yang menurunkan kekuatan tarik [9]. Jika dibandingkan, TS-RFSSW memang membutuhkan waktu yang lebih lama karena adanya pergantian *tool*. Namun, metode ini memerlukan biaya yang lebih rendah dan proses yang lebih sederhana karena dapat dilakukan menggunakan mesin *milling* biasa.

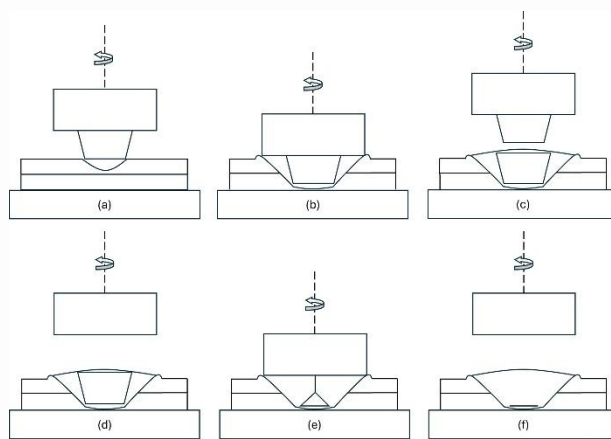
Berdasarkan penelitian sebelumnya, belum banyak penelitian mengenai pengaruh pengelasan TS-RFSSW terhadap kekuatan sambungan. Oleh karena itu, tujuan dari penelitian ini adalah mengetahui pengaruh geometri *tool* pada beban tarik sambungan hasil pengelasan TS-RFSSW dengan material tembaga dan AA1100. Penelitian ini diharapkan dapat menambah wawasan dan kontribusi terhadap proses pengelasan TS-RFSSW, khususnya untuk material berbeda.

Two-stage refilled friction stir spot welding (TS-RFSSW) merupakan metode turunan FSSW yang dikembangkan untuk mengisi kembali *keyhole* atau

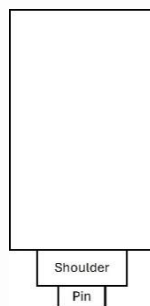
lubang probe [9]. Proses TS-RFSSW terdiri dari dua tahap dengan masing-masing *tool* seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Tahap pertama (a-c) yaitu melakukan FSSW konvensional dengan *tool* yang memiliki pin. Tahap kedua (d-f) yaitu melakukan FSSW kembali menggunakan *tool* tanpa pin (*pinless*), Tahap ini bertujuan untuk mengisi ulang *keyhole* setelah proses FSSW konvensional.

Tool FSSW secara umum terdiri dari *shoulder* dan pin seperti pada Gambar 2. Bagian *shoulder* memainkan peran dalam pembangkitan panas dan pola aliran material. Diameter *shoulder* yang lebih besar dapat menghasilkan sambungan las dengan kualitas lebih baik karena distribusi panas yang lebih terkontrol

[10]. Sedangkan bagian pin berperan untuk menembus benda kerja dan menghasilkan panas awal. Profil pin yang berbeda seperti *cylindrical*, *taper*, *thread*, dan *triangular* akan memengaruhi cara *tool* menghasilkan gesekan dan mencampur material. Pin berbentuk *taper* efektif dalam menciptakan ikatan yang lebih kuat karena aliran material yang lebih baik [11]. Di sisi lain, pin *triangular* dapat menghasilkan sambungan dengan kekuatan lebih tinggi dibanding pin *cylindrical* karena bentuknya yang tajam dapat memperdalam zona pengadukan [12]. Mengoptimalkan geometri *tool* dapat meningkatkan sifat mekanis sambungan dengan meningkatkan aliran material dan memastikan distribusi panas yang efektif selama proses pengelasan.



Gambar 1. Skema proses TS-RFSSW (a-c) Tahap pertama dan (d-f) Tahap kedua [7]



Gambar 2. *Tool* FSSW

METODE PENELITIAN

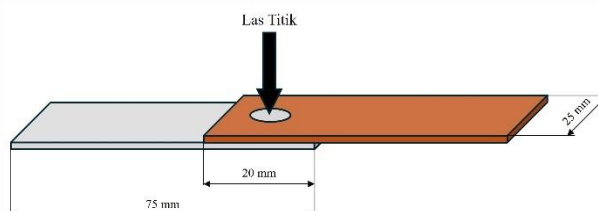
Penelitian ini menggunakan metode eksperimental. Tahapan pertama adalah persiapan spesimen las. Material yang digunakan yaitu pelat aluminium AA1100 dan tembaga dengan ketebalan 0,42 mm. Persiapan spesimen berupa pemotongan pelat menjadi spesimen dengan dimensi 75 mm × 25 mm. Setelah itu material dibersihkan menggunakan cairan aseton untuk menghilangkan sisa-sisa debu dan kotoran. Konfigurasi spesimen las yang dibuat yaitu tembaga sebagai lembar atas, sedangkan AA1100 sebagai lembar bawah dengan satu las titik seperti diperlihatkan pada Gambar 3.

Tahap berikutnya yaitu mempersiapkan *tool* atau pahat untuk pengelasan. Gambar 4 memperlihatkan variasi geometri *tool* yang digunakan pada penelitian. Seluruh *tool* dibuat dari material *High Speed Steel* SKH 9. Tool 1 memiliki pin berbentuk taper dengan ketinggian pin 0,6 mm. Tool 2 memiliki pin berbentuk segitiga dengan ketinggian 1,1 mm. Sedangkan Tool 3 dan Tool 4 tidak memiliki pin atau *pinless*, dengan diameter *shoulder* masing-masing sebesar 5 mm dan 6 mm.

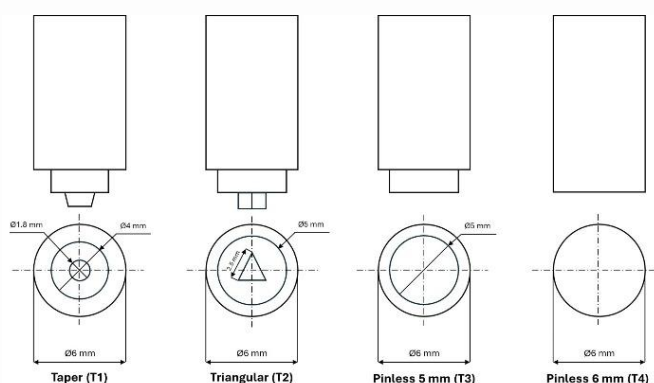
Proses pengelasan dilakukan menggunakan mesin EMCO CNC T.U. 3A dengan modifikasi *spindle* berupa bor Maktek MT912. Metode pengelasan yang dilakukan adalah FSSW konvensional dan TS-RFSSW

dengan total 6 variasi. Pada metode FSSW konvensional digunakan Tool 1 dan Tool 2. Sedangkan pada metode TS-RFSSW digunakan kombinasi berupa Tool 1 - Tool 3, Tool 1 - Tool 4, Tool 2 - Tool 3, dan Tool 2 - Tool 4. Parameter pengelasan lainnya dijaga konstan, yaitu *dwelt time* sebesar 4 detik, *plunge depth* sebesar 600 μm , dan *tool tilt angle* sebesar 0° . Untuk setiap variasi geometri, *tool* dibuat sebanyak 3

spesimen las. Pengujian kekuatan tarik sambungan yang dilakukan pada penelitian ini adalah *tensile shear test*. Pembebanan diberikan secara aksial pada sambungan. Pengujian ini menggunakan mesin uji tarik Tensilon A&D RTF-2350 dengan kecepatan tarik sebesar 1 mm/menit. Pengamatan visual dilakukan pada spesimen pascauji tarik untuk menganalisis jenis kegagalan (*failure mode*) yang terjadi.



Gambar 3. Konfigurasi spesimen pengelasan



Gambar 4. Tool pengelasan TS-RFSSW

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengelasan kemudian terlebih dahulu diukur diameter *nugget* las menggunakan mikroskop digital Dino-Lite Edge Plus. Selain mengukur diameter, langkah ini juga dilakukan untuk memastikan tidak ada cacat berupa retakan atau lubang pada *nugget* las. Contoh spesimen pengelasan ditunjukkan pada Gambar 5. Contoh pengukuran diameter *nugget* pada spesimen yang dibuat menggunakan Tool 2 terlihat pada Gambar 6.

Gambar 6 menunjukkan perbedaan *nugget* las yang dibuat dengan metode konvensional dan two-stage secara visual. Dengan menggunakan metode *two-stage*, terjadi penutupan *keyhole* karena adanya aliran material pelat atas yang mengisi *keyhole* tersebut. Hasil ini sejalan dengan tujuan penggunaan metode *two-stage*, yaitu mengeliminasi *keyhole* yang merupakan karakteristik pengelasan FSSW sehingga didapatkan hasil akhir permukaan las yang lebih baik.

Hasil uji tarik sambungan menggunakan Tool 1 ditunjukkan dalam bentuk grafik pada Gambar 7. Grafik pada Gambar 7 menunjukkan adanya peningkatan kekuatan sambungan ketika menggunakan metode *two-stage* dibandingkan dengan metode FSSW konvensional. Beban tarik sambungan

tertinggi dicapai ketika menggunakan Tool 3 sebagai pahat pada tahap *refilling*, yaitu sebesar 232.53 ± 38.87 N. Penggunaan Tool 4 sebagai pahat *refilling* mencapai beban tarik sambungan sebesar 198.84 ± 29.33 N. Sedangkan FSSW konvensional dengan Tool 1 mencapai beban tarik terendah, sebesar 162.27 ± 33.61 N.

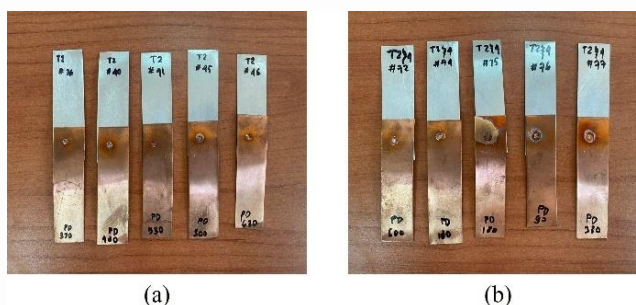
Gambar 8 menunjukkan grafik hasil uji tarik sambungan menggunakan Tool 2. Hasil uji tarik menunjukkan tren yang sama dengan sambungan menggunakan Tool 1. Beban tarik tertinggi diperoleh saat menggunakan Tool 3 sebagai pahat *refilling*, yaitu sebesar 292.78 ± 34.72 N. Ketika menggunakan Tool 4 sebagai pahat *refilling*, didapat beban tarik sambungan sebesar 224.88 ± 4.91 N. Sambungan paling lemah dihasilkan melalui FSSW konvensional, yaitu dengan beban tarik sebesar 205.95 ± 19.84 N.

Seperti yang dapat dilihat dari hasil uji tarik, kekuatan sambungan untuk semua spesimen TS-RFSSW lebih tinggi dibandingkan dengan spesimen yang dilas secara konvensional. Hal ini berkaitan dengan proses *refilling* yang menutup *keyhole* sehingga meningkatkan kontinuitas sambungan. Eliminasi *keyhole* juga menghasilkan permukaan las yang lebih rata. Permukaan akhir yang lebih baik memungkinkan konsentrasi tegangan yang lebih

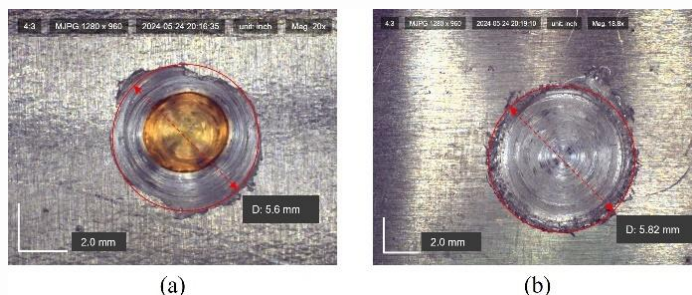
rendah dan perpindahan beban yang lebih seragam pada sambungan, sehingga terjadi peningkatan sifat mekanis.

Geometri *tool* juga berpengaruh terhadap kekuatan sambungan. Penggunaan *Tool 4* sebagai pahat *refilling* pada metode TS-RSFSSW menghasilkan kekuatan yang lebih rendah dibandingkan dengan *Tool 3*. Diameter *shoulder* yang lebih besar memang menghasilkan zona aduk yang lebih besar, namun hal ini juga berpotensi menyebabkan terbentuknya butiran yang lebih kasar sehingga menurunkan kekuatan

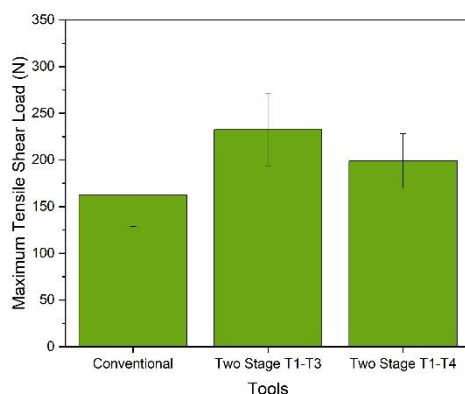
sambungan. Di sisi lain, *Tool 2* dengan pin segitiga membentuk aliran material yang lebih intensif akibat bentuknya yang tajam. Dibandingkan dengan pin taper yang hanya mengaduk di sekitar poros, pada pin segitiga pencampuran terjadi pada arah radial sehingga memungkinkan terbentuknya ukuran butir yang lebih halus dan zona aduk yang lebih dalam. Pengaruh geometri *tool* ini dapat dianalisis lebih lanjut dengan melakukan uji metalografi untuk mempelajari struktur makro dan mikro sambungan.



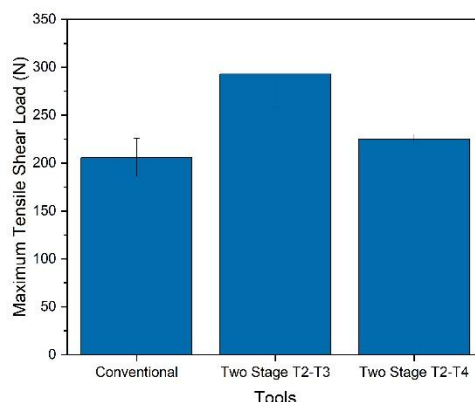
Gambar 5. Spesimen pengelasan (a) Konvensional - *Tool 2* (b) *Two stage* - *Tool 2* dan *Tool 4*



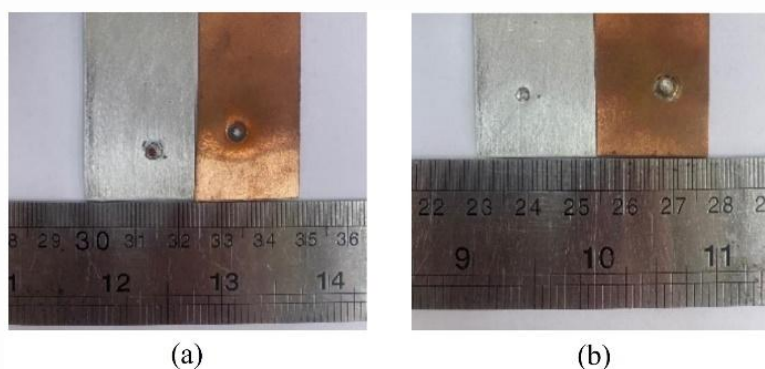
Gambar 6. Pengukuran diameter *nugget* spesimen las (a) Konvensional - *Tool 2* (b) *Two stage* - *Tool 2* dan *Tool 4*



Gambar 7. Grafik hasil uji tarik spesimen dengan *Tool 1*



Gambar 8. Grafik hasil uji tarik spesimen dengan *Tool 2*



Gambar 9. Mode kegagalan (a) *Pull-out failure* (b) *Interfacial failure*

Mode kegagalan dapat dilihat dari Gambar 9 yang menunjukkan spesimen pasca uji tarik. Secara keseluruhan, mode kegagalan yang dominan adalah *pull-out failure*. Ikatan yang lemah pada antarmuka *base metal* menyebabkan *nugget* las terlepas saat diberikan beban tarik. Sedangkan *interfacial failure* ditemukan pada beberapa spesimen TS-RFSSW menggunakan *Tool 2*. Ikatan yang kurang sempurna pada antarmuka las menghasilkan titik-titik yang rentan mengalami retak saat dilakukan pengujian tarik.

KESIMPULAN

Kesimpulan yang didapat dari penelitian ini adalah:

1. Metode TS-RFSSW menghasilkan kekuatan tarik sambungan las yang lebih tinggi dibandingkan dengan FSSW konvensional. Proses pengelasan dua tahap yang mengeliminasi *keyhole* menghasilkan permukaan las yang lebih rata, memungkinkan berkurangnya konsentrasi tegangan, sehingga meningkatkan sifat mekanis sambungan.
2. Geometri *tool* memiliki pengaruh terhadap kekuatan tarik sambungan las. Sambungan dengan beban tarik tertinggi yaitu pada TS-RSFFW dengan kombinasi *Tool 2* dan *Tool 3*, sebesar 292.78 ± 34.72 N. *Tool 3* dengan diameter

shoulder 5 mm menunjukkan hasil yang lebih optimal dalam meningkatkan kekuatan tarik, sehingga lebih cocok digunakan sebagai pahat *refilling*.

3. Penggunaan *Tool 4* dengan diameter *shoulder* 6 mm cenderung menghasilkan kekuatan tarik lebih rendah, karena adanya potensi panas berlebih yang berisiko mengubah struktur mikro material.
4. *Tool* dengan pin segitiga menghasilkan pencampuran dan pengadukan material yang lebih baik karena memiliki tepi yang tajam, sehingga menghasilkan sambungan dengan kekuatan tarik yang lebih tinggi.
5. Mode kegagalan yang dominan terjadi adalah *pull-out failure*, yang disebabkan oleh lemahnya ikatan pada antarmuka *base metal*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains, dan Teknologi Republik Indonesia melalui pendanaan riset PMDSU tahun 2025 dengan nomor kontrak PKS-560/UN2.RST/HKP.05.00/2025 dan seluruh pihak yang telah membantu dan memberikan support untuk penelitian ini.

KONTRIBUSI PENULIS

Hikaru Trinita Salsabila: bertanggung jawab atas konseptualisasi penelitian, analisis data, dan penulisan draf artikel ilmiah. Ario Sunar Baskoro: berperan dalam supervisi selama proses penelitian, mencari pendanaan riset, dan melakukan review dan editing artikel ilmiah. Shafira Herdiyan Maritza Salsabila: berkontribusi dalam penyusunan konseptualisasi dan metode eksperimen, pengumpulan data, serta analisis

data. Gandjar Kiswanto dan Syarif Junaidi: berperan dalam supervisi selama proses penelitian.

DANA PENELITIAN

Penelitian ini memperoleh dukungan pendanaan dari Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains, dan Teknologi Republik Indonesia melalui skema riset PMDSU tahun 2025, berdasarkan kontrak nomor PKS-560/UN2.RST/HKP.05.00/2025

DAFTAR PUSTAKA

- [1] P. Rupajati, K. G. Clarissa, A. S. Baskoro, G. Kiswanto, and W. Winarto, "Characteristics of Mechanical Properties and Microstructure of Micro Friction Stir Spot Welding of AA1100 and Brass," *International Journal of Technology*, vol. 12, no. 6, 2021, doi: 10.14716/ijtech.v12i6.5214.
- [2] M. Enami, M. Farahani, and M. Farhang, "Novel study on keyhole less friction stir spot welding of Al 2024 reinforced with alumina nanopowder," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 101, no. 9-12, pp. 3093-3106, 2018, doi: 10.1007/s00170-018-3142-z.
- [3] A. Shahrabadi, H. Ezatpour, and M. Paidar, "Protrusion friction stir spot welding of dissimilar joints of 6061 aluminum alloy/Copper sheets with Zn interlayer," *Materials Letters*, vol. 328, 2022, doi: 10.1016/j.matlet.2022.133107.
- [4] W. C. Ke *et al.*, "Thermal process and material flow during dissimilar double-sided friction stir spot welding of AZ31/ZK60 magnesium alloys," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 17, pp. 1942-1954, 2022, doi: 10.1016/j.jmrt.2022.01.097.
- [5] M. Rashkovets, N. Contuzzi, and G. Casalino, "Modeling of Probeless Friction Stir Spot Welding of AA2024/AISI304 Steel Lap Joint," *Materials (Basel)*, vol. 15, no. 22, Nov 18 2022, doi: 10.3390/ma15228205.
- [6] V. Sarila, H. P. Koneru, M. Cheepu, B. K. Chigilipalli, V. C. Kantumuchu, and M. Shanmugam, "Microstructural and Mechanical Properties of AZ31B to AA6061 Dissimilar Joints Fabricated by Refill Friction Stir Spot Welding," *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, vol. 6, no. 5, 2022, doi: 10.3390/jmmp6050095.
- [7] M. Sajed, "Parametric study of two-stage refilled friction stir spot welding," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 24, pp. 307-317, 2016, doi: 10.1016/j.jmapro.2016.09.011.
- [8] M. Anis, A. Sunar Baskoro, M. Azwar Amat, M. Andre Widiyanto, and B. Munir, "Effect of Tools Geometry and Dwell Time on Mechanical Properties and Macrograph of Two-Stage Refilled Friction Stir Spot Micro Weld," *MATEC Web of Conferences*, vol. 269, 2019, doi: 10.1051/mateconf/201926902002.
- [9] P. Rupajati, A. S. Baskoro, L. D. Pramudito, L. A. Safitri, M. A. Amat, and G. Kiswanto, "Identification of the influence of micro two-stage refilled friction stir spot welding with variation dwell time on dissimilar brass CuZn30-aluminum AA1100," *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 3, no. 12 (123), pp. 6-14, 2023, doi: 10.15587/1729-4061.2023.276484.
- [10] S. H. Lee, D. M. Lee, and K. S. Lee, "Process optimisation and microstructural evolution of friction stir spot-welded Al6061 joints," *Materials Science and Technology*, vol. 33, no. 6, pp. 719-730, 2017/04/01 2017, doi: 10.1080/02670836.2016.1230661.
- [11] J. M. Piccini and H. G. Svoboda, "Tool geometry optimization in friction stir spot welding of Al-steel joints," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 26, pp. 142-154, 2017/04/01/ 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.02.004>.
- [12] H. Kamal, A. Khuder, and M. Sattar, "Effects of Rotational Speeds and Tool Pin Geometry on Microstructure and Mechanical Properties of Refilled Friction Stir Spot Welds of Similar AA2024-T3 Aluminum Alloy Sheets," *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, vol. Vol. 6, p. 937, 04/01 2017.