

Evaluasi Laju Pengelasan terhadap Mikrostruktur Sambungan Aluminium 5052 dengan Menggunakan Metode *Friction Stir Welding*

Helmy Purwanto^{a*}, Nur Kholis^a, Sri Mulyo Bondan Respati^a, Ferriawan Yudhanto^b, Muhammad Aniq Furqon^a

^aJurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Wahid Hasyim, Jl. Menoreh Tengah X/22 Sampangan, Semarang 50236, Indonesia +62 24 8505680

^bProgram Studi Teknologi Rekayasa Otomotif, Program Vokasi, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, Jl. Brawijaya, Tamantirto, Kasihan, Bantul, Yogyakarta 55183, Indonesia
e-mail: helmypurwanto@unwahas.ac.id

Kata kunci:

laju pengelasan;
struktur mikro;
sambungan; cacat sambungan; las gesek aduk

ABSTRAK

Friction stir welding (FSW) adalah salah satu jenis pengelasan yang mampu menyambung bahan paduan aluminium. Pada penelitian sebelumnya telah dilakukan penyambungan aluminium 5052, tetapi hasil pengujian tarik memperlihatkan adanya penurunan kekuatan sambungan. Oleh karena itu, studi ini bertujuan mengevaluasi secara fokus mikrostruktur yang terbentuk pada sambungan pelat aluminium 5052 yang telah dilakukan FSW. Pelat aluminium dengan dimensi 150 x 75 mm dengan tebal 6 mm dilas dengan metode FSW, pahat pin berbentuk silinder pada kecepatan putar 1000 rpm dan laju pengelasan 20, 30 dan 40 mm/menit. Penampang hasil las diamati dengan menggunakan mikroskop *optic* dan *Scanning Electron Microscope* (SEM). Hasil pengamatan memperlihatkan adanya cacat makro dan perubahan struktur mikro pada sambungan. Cacat ini dipengaruhi desain pin yang tidak tepat sehingga daerah adukan tidak merata yang berakibat sambungan menjadi tidak sempurna.

Keyword:

welding rate;
microstructure; joints;
joint defects, friction stir welding

ABSTRACT

Friction stir welding (FSW) is one type of welding that is able to joining aluminium alloy. In previous studies, aluminium 5052 has been joined, but the results of the tensile test showed a decrease in the strength of the connection. Therefore, in this study the aim is to focus on evaluating the microstructure formed at the 5052 aluminium plate welding joint that has been carried out by FSW. Aluminium plates with dimensions of 150 x 75 mm with a thickness of 6 mm were welded by the FSW method, cylindrical pin chisel at a rotational speed of 1000 rpm and welding rates of 20, 30 and 40 mm/minute. The cross section of the weld was observed using an optical microscope and *Scanning Electron Microscope* (SEM). The results of the observations showed that there were macro defects and changes in the microstructure of the joints. This defect is influenced by the improper design of the pin so that the area of the mixture is uneven which results in an imperfect connection.

1. PENDAHULUAN

Aluminium merupakan salah satu logam yang paling banyak digunakan dalam konstruksi khususnya konstruksi teknik mesin utamanya pada industri otomotif dan dirgantara [1]. Aluminium mempunyai sifat tahan terhadap korosi, massa jenis yang rendah, penghantar listrik dan panas yang baik. Namun, aluminium dan paduannya sulit disambung dengan metode pengelasan konvensional. Karakter seperti terbentuknya aluminium oksida pada lelehan, kelarutan hidrogen, konduktivitas termal dan penyusutan selama pembekuan membuat aluminium paduan tidak dapat disambung menggunakan teknik pengelasan busur konvensional [2].

Alternatif pengelasan aluminium dan paduannya adalah dengan metode las gesek (*friction welding*). Pada komponen yang berbentuk pelat tebal maka proses las yang dapat digunakan adalah las gesek aduk (*Friction Stir Welding* = FSW). FSW adalah pengelasan dalam kondisi semi solid dengan cara memanaskan logam induk sampai ke zona plastis [3] melalui gesekan dan adukan dengan alat berbentuk

pin yang tidak habis pakai. Pin berputar dan bergesek dengan logam induk sehingga menghasilkan panas sampai suhu plastis sehingga dapat teraduk. Pembekuan kembali terjadi sehingga dua logam induk dapat tersambung. Metode ini pertama kali diperkenalkan oleh The Welding Institute (WI) di Cambridge, Inggris [3].

Selama proses FSW akan terbentuk *heat affected zone* (HAZ), *thermomechanical affected zone* (TMAZ), dan daerah adukan las (*weld nugget*) [4]. Temperatur yang terjadi pada proses FSW berada di bawah temperatur leleh logam induk sehingga temperatur rekristalisasi akan berbeda dengan pengelasan konvensional [5]–[7]. HAZ yang terbentuk pada FSW mirip dengan las konvensional karena zona ini tidak mengalami deformasi. Proses FSW memunculkan TMAZ dengan kondisi material pada zona ini mengalami deformasi plastis akibat proses pengadukan selain induksi panas sehingga mengalami perubahan mikrostruktur. Di area pengelasan, panas dan deformasi terjadi paling tinggi, logam induk dalam kondisi semi solid teraduk dan mengalami penyempurnaan butir yang signifikan [8].

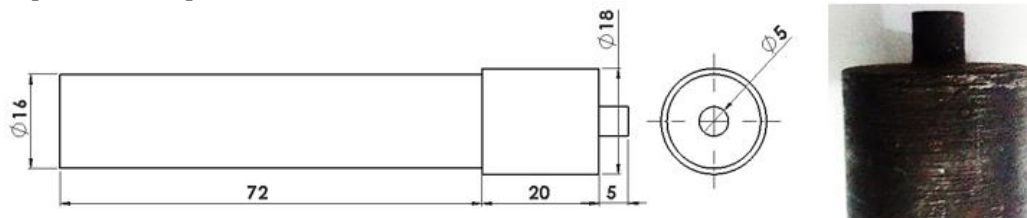
Rata-rata kekuatan tarik sambungan FSW lebih rendah dibandingkan dengan logam induk [9], [10]. Semakin besar laju umpan pahat FSW, kekuatan tarik semakin turun walaupun regangan tarik meningkat [11]. Penumpukan bahan dasar dengan pahat mengakibatkan cacat las dan mengurangi kekuatan sambungan [12]. Faktor-faktor utama yang memengaruhi sifat sambungan FSW adalah kecepatan rotasi pahat, kecepatan pemakanan, dan tekanan tempa [13]. Laju pengelasan lebih berpengaruh dibandingkan dengan kecepatan putar pahat terhadap *properties* hasil pengelasan [14]. Namun, faktor lainnya adalah desain pahat karena ini akan berkaitan dengan homogenitas pengelasan dan sifat aliran plastik dari material [15], sudut kemiringan dan gaya aksial pahat. Selain itu, bahan yang dilas juga berpengaruh terhadap hasil pengelasan [16]. Adanya zona - zona las karena pemanasan dan proses pencampuran mekanis selama proses FSW menyebabkan penurunan kekerasan dan hilangnya kekuatan [10]. Semakin tinggi laju pengelasan, kekuatan tarik sambungan 90° semakin rendah [17].

Kekuatan tarik sambungan FSW masih rendah dibandingkan kekuatan tarik logam induknya. Kekuatan sambungan FSW pada aluminium 5052 lebih rendah dibandingkan dengan logam induk. Kekuatan tarik maksimal pada laju pengelasan 20, 30 dan 40 mm/menit adalah masing-masing 100.40; 82.19 dan 70.41 MPa, sedangkan kekuatan tarik logam induk adalah 123.43 MPa [9].

Kekuatan tarik sambungan yang rendah dibandingkan kekuatan tarik logam induk dapat berpengaruh terhadap kekuatan konstruksi. Minimal kekuatan tarik sambungan adalah sama dengan kekuatan tarik logam induk. Turunnya kekuatan tarik dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor sehingga tujuan dari studi ini adalah untuk mengetahui cacat mikroskopis antarmuka sambungan FSW pada pelat aluminium 5052 dengan variasi laju pengelasan yang menyebabkan turunnya kekuatan tarik.

2. MATERIAL DAN METODE

Pelat aluminium 5052 masing-masing dengan dimensi 150 x 75 mm dengan tebal 6 mm dilas menggunakan metode FSW. Pin las berbentuk silinder dari *tool steel* yang dikeraskan dengan diameter 5 mm panjang 5 mm seperti yang diperlihatkan pada Gambar 1. Pin diputar pada kecepatan 1000 rpm dengan laju pengelasan di-*setting* pada variabel 20, 30 dan 40 mm/menit. Komposisi kimia aluminium seri 5052 seperti terlihat pada Tabel 1.

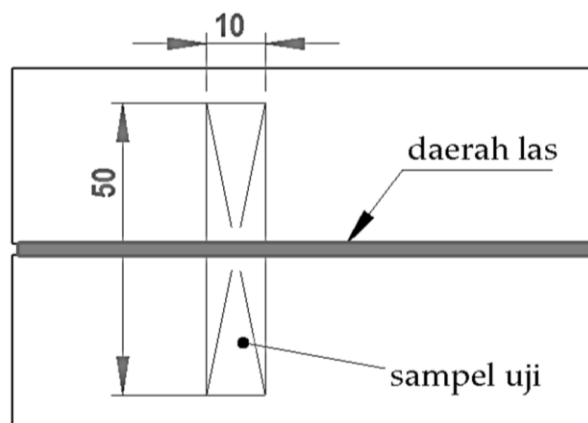


Gambar 1. Desain pin dan pin

Tabel 1 Komposisi kimia paduan aluminium 5052

| Paduan | Mg | Cr | Cu | Fe | Mn | Si | Zn | Ti | Al |
|---------|------|-------|-------|-------|------|-------|-------|------|------|
| Al 5052 | 2.42 | 0.210 | 0.089 | 0.382 | 0.03 | 0.175 | 0.007 | 0.03 | Bal. |

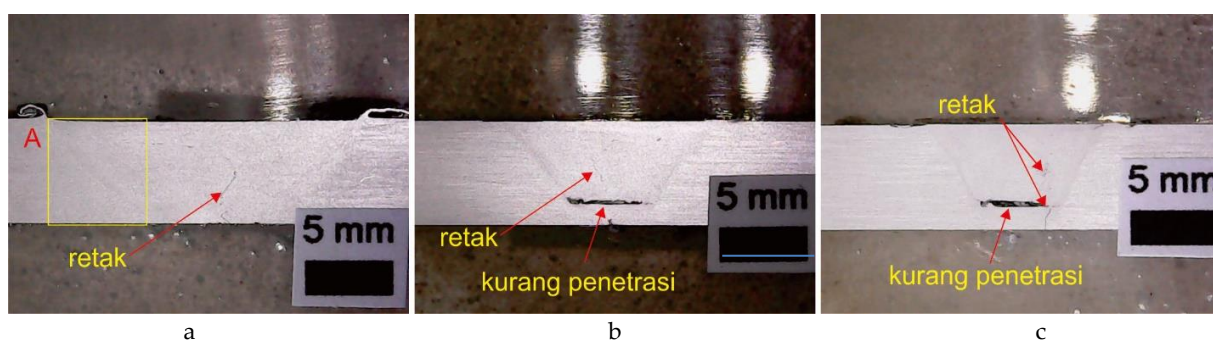
Hasil pengelasan dipotong seperti yang terlihat pada Gambar 2 diamati pada sisi melintang dengan menggunakan mikroskop optik dan *Scanning Electron Microscope* (SEM) Phenom ProX® Thermo Scientific generasi ke-6.



Gambar 2. Pengambilan sampel dari hasil pengelasan

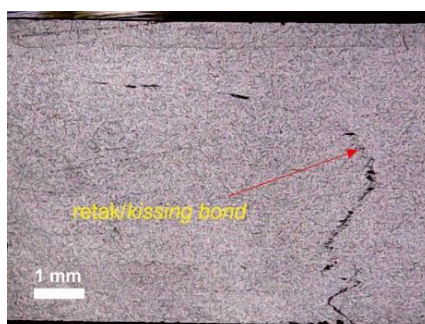
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengamatan sambungan metode FSW pada pelat aluminium dengan seperti disajikan pada Gambar 3.



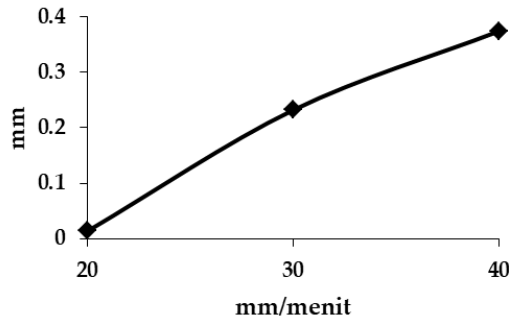
Gambar 3. Penampang melintang hasil sambungan metode FSW a). laju pengelasan 20 mm/menit, b). 30 mm/menit dan c). 40 mm/menit

Pada Gambar 3, terlihat bahwa secara makro sambungan tidak terjadi secara sempurna dan terlihat cacat makro. Pada variasi 20 mm/menit, terlihat cacat retak mulai dari dasar pelat hingga hampir permukaan pelat. Cacat ini disebabkan oleh adukan tidak terjadi secara sempurna akibat fase plastis logam yang tidak merata. Hal ini disebabkan oleh putaran rpm pin yang terlalu rendah. Putaran pin yang rendah menyebabkan masukan panas pada logam kurang sehingga kondisi semi solid logam belum sempurna. Pada pengelasan khususnya FSW, pencampuran logam sangat penting untuk menciptakan kelancaran aliran material sehingga dapat tercampur secara merata pada sekitar pin [18]–[20]. Hal ini juga dapat terjadi karena proses pengadukan tidak merata sehingga antar muka sambungan tidak terjadi cacat ini disebut *kissing bond* [21], [22]. Cacat makro retak atau disebut *kissing bond* diperlihatkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Cacat *kissing bond*

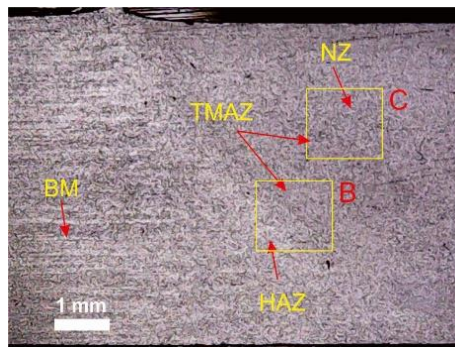
Variasi laju pengelasan 30 mm/menit (Gambar 3b) dan 40 mm/menit (Gambar 3c) terlihat cacat retak dan kurang penetrasi. Cacat ini juga disebabkan oleh kurangnya masukan panas. Semakin cepat laju pengelasan, masukan panas semakin berkurang karena pahat pin lebih cepat bergeser sebelum memberikan panas yang cukup pada daerah yang dilas. Oleh karena itu, semakin besar laju pengelasan, cacat kurang penetrasi terlihat semakin besar (Gambar 3 c). Hasil pengukuran menggunakan mikroskop seperti disajikan pada Gambar 4.



Gambar 5. Jarak celah kurang penetrasi pada variabel laju pengelasan 20, 30 dan 40 mm/menit

Jarak celah cacat penetrasi pada variasi 20, 30 dan 40 mm/menit masing-masing adalah 0.014; 0.232 dan 0.374 mm. Pada kasus ini, cacat yang terlihat kemungkinan juga disebabkan oleh desain pin yang kurang tepat. Adanya rongga di bawah pin mengindikasikan logam di bawah pin tidak mengalami pengadukan karena desain pin juga berpengaruh terhadap adukan dan cacat yang ditinggalkan [23]. Ramana dkk. [13] melaporkan bahwa pengerasan regangan dingin pada logam induk dan proses pengadukan dipengaruhi oleh desain pin.

Seperti pada pengelasan fusi, pengelasan FSW juga terjadi ketidakhomogenan struktur akibat panas gesekan sehingga diperlukan pendinginan yang tepat [24]. Efek negatif FSW walaupun panas yang diterima rendah struktur menjadi lebih kasar karena siklus termal gesekan [8] [25]. Struktur yang terbentuk pada FSW diperlihatkan pada Gambar 6.

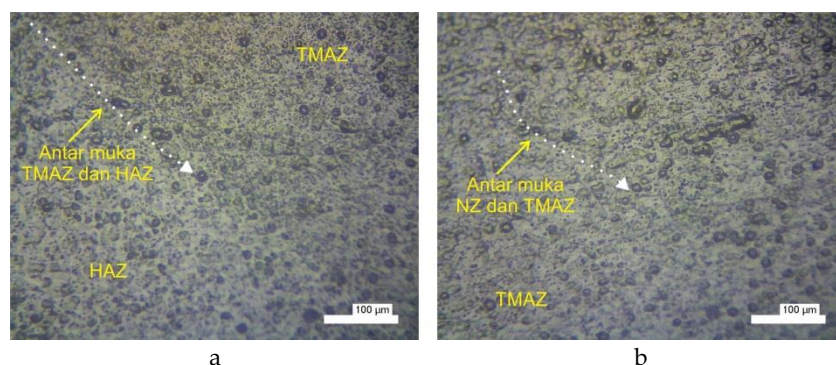


Gambar 6. Desain struktur pada daerah sambungan (detail A)

Daerah sambungan FSW terbagi menjadi daerah adukan atau *nugget zone* (NZ), daerah terpengaruh termomekanikal atau *thermo-mechanically affected zone* (TMAZ), daerah terpengaruh panas atau *heat affected zone* (HAZ) dan daerah yang tidak mengalami perubahan struktur atau *base metal* (BM). Daerah adukan adalah daerah logam terkena putaran pin, kedua ujung logam yang akan disambung menjadi fase semi solid dan teraduk oleh pin. Selanjutnya, pembekuan berlangsung sehingga kedua logam akan tersambung. TMAZ adalah daerah yang terkena panas langsung akibat gesekan antara pin dengan logam. Panas ini mampu merekristalisasi logam sehingga strukturnya berubah. Daerah adukan, putaran pahat menghasilkan rotasi makroskopik logam dan memberikan efek dominan pada perubahan struktur TMAZ dan daerah adukan [8]. Begitu juga dengan HAZ, daerah ini tidak langsung terkena pin, tetapi suhu yang diterima memungkinkan terjadinya rekristalisasi dan perubahan struktur pada logam. Kenaikan suhu terjadi karena kontak antara pahat dan logam memungkinkan terjadinya dislokasi dan

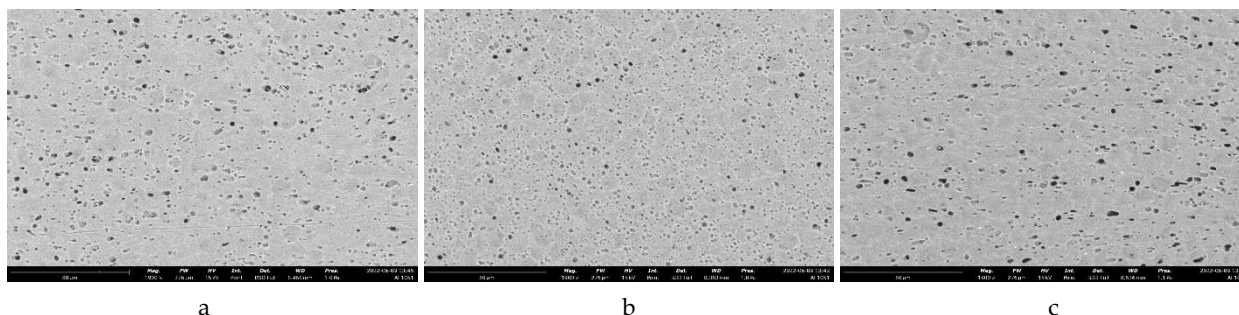
rekristalisasi [26], butiran halus terlihat pada mikrostruktur [27], sedangkan BM adalah logam yang tidak berubah strukturnya dari logam semula atau kondisinya masih sama seperti logam awal sebelum pengelasan. Walaupun FSW merupakan pengelasan dengan input panas yang rendah, tetapi panas ini masih mampu menyebabkan terjadinya rekristalisasi sehingga pengaturan panas perlu dikendalikan [28]. Pengendalian panas dapat dilakukan dengan proses pemanasan pendahuluan (*pre-heat*) sebelum dilakukan pengelasan gesek [29].

Struktur mikro daerah HAZ, TMAZ dan NZ seperti diperlihatkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Struktur mikro a). daerah HAZ dan TMAZ (detail B) dan b). daerah TMAZ dan NZ (detail C)

Terlihat struktur yang lebih rapat pada daerah TMAZ dibandingkan dengan HAZ (Gambar 7.a). Panas yang diterima TMAZ lebih tinggi dibandingkan dengan HAZ. Begitu juga terlihat sedikit perbedaan antara HAZ dengan daerah aduk (NZ) (Gambar 7.b). Pada daerah aduk struktur terlihat sedikit lebih oval. Sahu dan Pal [30] melaporkan bahwa struktur di zona las lebih halus daripada zona termo-mekanis. Mikroskopis dengan menggunakan SEM diperlihatkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Struktur mikro a). HAZ b). TMAZ dan c) daerah adukan (NZ)

Dengan menggunakan SEM tampak lebih jelas perbedaan struktur antara daerah HAZ (Gambar 8.a), daerah TMAZ yang terlihat lebih halus dan rapat strukturnya (Gambar 8.b) dan daerah adukan dengan struktur yang terlihat cenderung oval (Gambar 8.c).

Secara makroskopik dan mikroskopik pada daerah las terlihat cacat (Gambar 3 dan Gambar 4) dan perubahan struktur mikro (Gambar 6 dan Gambar 7). Cacat terjadi karena ketidaksempurnaan adukan sedangkan perubahan struktur terjadi akibat perubahan panas. Patah pada uji tarik terjadi di zona nugget karena terjadi konsentrasi deformasi. Deformasi ini karena zona las diaduk, ditempa dan diekstrusi secara ekstensif, dan mereka berada di bawah tegangan tekan [26] sedangkan material di HAZ berada di bawah tegangan tarik karena termal ekspansi [31].

4. KESIMPULAN

Berdasarkan evaluasi laju pengelasan terhadap mikrostruktur sambungan pelat aluminium 5052 dengan menggunakan metode *Friction Stir Welding* (FSW) dapat disimpulkan:

1. Secara makroskopik sambungan tidak sempurna, terlihat cacat retak atau disebut *kissing bond* dan kurang penetrasi pada daerah adukan.

2. Terjadi perubahan struktur mikro karena masukan panas dan konsentrasi deformasi yang diakibatkan oleh adukan pin.

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan teima kasih disampaikan kepada semua pihak yang telah membantu jalannya penelitian, terutama kepala dan laboran di Laboratorium Material Teknik Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Wahid Hasyim dan Laboratorium Material Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Surakarta.

REFERENSI

- [1] C.-H. Ng, S. N. . Yahaya, and A. A. . Majid, "Reviews on aluminum alloy series and its applications," *Acad. J. Sci. Res.*, vol. 5, no. 12, pp. 708–716, 2017, doi: 10.15413/ajsr.2017.0724.
- [2] I. Kwee, W. De Waele, and K. Faes, "Weldability of high-strength aluminium alloy EN AW-7475-T761 sheets for aerospace applications, using refill friction stir spot welding," *Weld. World*, vol. 63, no. 4, pp. 1001–1011, 2019, doi: 10.1007/s40194-019-00732-1.
- [3] J. Kumar, S. Majumder, A. Kumar, and R. Kumar, "In fl uence of rotation speed , transverse speed , and pin length during underwater friction stir welding (UW-FSW) on aluminum AA6063 : A novel criterion for parametric control," *Int. J. Light. Mater. Manuf.*, vol. 5, no. 3, pp. 295–305, 2022, doi: 10.1016/j.ijlmm.2022.03.001.
- [4] N. D. Ghetiya and K. M. Patel, "Welding speed effect on joint properties in air and immersed friction stir welding of AA2014," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, vol. 231, no. 5, pp. 897–909, Feb. 2017, doi: 10.1177/0954405417690555.
- [5] Z. Su, Z. Zhu, Y. Zhang, H. Zhang, and Q. Xiao, "Recrystallization Behavior of a Pure Cu Connection Interface with Ultrasonic Welding," *Metals* , vol. 11, no. 1. 2021. doi: 10.3390/met11010061.
- [6] M. Song and R. Kovacevic, "Numerical and experimental study of the heat transfer process in friction stir welding," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, vol. 217, no. 1, pp. 73–85, Jan. 2003, doi: 10.1243/095440503762502297.
- [7] H. Zhang, J. H. Huang, S. B. Lin, L. Wu, and J. G. Zhang, "Temperature simulation of the preheating period in friction stir welding based on the finite element method," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, vol. 220, no. 7, pp. 1097–1106, Jul. 2006, doi: 10.1243/09544054JEM425.
- [8] R. W. Fonda and J. F. Bingert, "Microstructural evolution in the heat-affected zone of a friction stir weld," *Metall. Mater. Trans. A*, vol. 35, no. 5, pp. 1487–1499, 2004, doi: 10.1007/s11661-004-0257-7.
- [9] M. A. Furqon, "Analisis Sifat Mekanik pada Pengelasan Friction Stir Welding Alumunium 5052 dengan Parameter Kecepatan Laju Las.," Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Wahid Hasyim, 2022.
- [10] G. Çam, S. Güçlüer, A. Çakan, and H. T. Serinda, "Mechanical properties of friction stir butt-welded Al-5086 H32 plate," vol. 30, no. 2, pp. 151–156, 2008.
- [11] M. Budi Nur Rahman, A. Widyo Nugroho, and B. Satriya Wardhana, "Pengaruh Feed Rate dan Kecepatan Putar Pin Tool Friction Stir Welding (FSW) terhadap Kekuatan Tarik dan Kekerasan Aluminium 5052," *JMPM (Jurnal Mater. dan Proses Manufaktur)*, vol. 2, no. 2, pp. 83–95, 2018, doi: 10.18196/jmpm.2224.
- [12] S. Leon, J. Leon, G. Bharathiraja, and J. Vijayarangan, "A review on Friction Stir Welding in Aluminium Alloys A review on Friction Stir Welding in Aluminium Alloys A review on Friction Stir Welding in Aluminium Alloys," no. October, 2020, doi: 10.1088/1757-899X/954/1/012007.
- [13] G. Venkat Ramana, B. Yelamasetti, and T. Vishnu Vardhan, "Effect of FSW process parameters and tool profile on mechanical properties of AA 5082 and AA 6061 welds," *Mater. Today Proc.*, vol. 46, pp. 826–830, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.801>.
- [14] A. Muthumanickam, P. Gandham, and S. Dhenuvakonda, "Effect of Friction Stir Welding Parameters on Mechanical Properties and Microstructure of AA2195 Al–Li Alloy Welds," *Trans. Indian Inst. Met.*, vol. 72, no. 6, pp. 1557–1561, 2019, doi: 10.1007/s12666-019-01570-x.
- [15] V. Devuri, N. Mandal, M. Mahapatra, and HARSH, "Tool design effects for FSW of AA7039,"

- Weld. J.*, vol. 92, pp. 41s-47s, 2013.
- [16] G. Reddy, M. P., C. Murthy, M. Thondapi, and N. Viswanathan, "Microstructure, Residual Stress Distribution and Mechanical Properties of Friction-Stir AA 6061 Aluminium Alloy Weldments," 2006.
- [17] W. Setiawan, D. B. Darmadi, W. Suprpto, and R. Soenoko, "The position of the joints with angle of 90° at friction stir welding (FSW)," *MM Sci. J.*, vol. 2018, no. March, pp. 2128–2135, 2018, doi: 10.17973/MMSJ.2018_03_201717.
- [18] K. P. Mehta and V. J. Badheka, "A Review on Dissimilar Friction Stir Welding of Copper to Aluminum: Process, Properties, and Variants," *Mater. Manuf. Process.*, vol. 31, no. 3, pp. 233–254, Feb. 2016, doi: 10.1080/10426914.2015.1025971.
- [19] N. Soni and C. Sangam, *Defects Formation during Friction Stir Welding: A Review*. 2016. doi: 10.13140/RG.2.2.19381.93921.
- [20] A. I. Albannai, "Review The Common Defects In Friction Stir Welding," *Int. J. Sci. Technol. Res.*, vol. 9, no. 11, pp. 318–329, 2020, [Online]. Available: www.ijstr.org
- [21] Y. Z. Guoqing Wang Yunfei Hao, "Friction stir welding of high-strength aerospace aluminum alloy and application in rocket tank manufacturing," *Journal of Materials Sciences and Technology*, vol. 34, no. 1. pp. 73–91.
- [22] X. Cao and M. Jahazi, "Effect of tool rotational speed and probe length on lap joint quality of a friction stir welded magnesium alloy," *Mater. Des.*, vol. 32, pp. 1–11, Jan. 2011, doi: 10.1016/j.matdes.2010.06.048.
- [23] K. P. Mehta and V. J. Badheka, "Influence of tool pin design on properties of dissimilar copper to aluminum friction stir welding," *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, vol. 27, no. 1, pp. 36–54, 2017, doi: [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(17\)60005-0](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(17)60005-0).
- [24] H. Liu, H. Zhang, and L. Yu, "Homogeneity of Mechanical Properties of Underwater Friction Stir Welded 2219-T6 Aluminum Alloy," *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 20, pp. 1419–1422, Nov. 2010, doi: 10.1007/s11665-010-9787-x.
- [25] O. Barooni, M. Abbasi, M. Givi, and B. Bagheri, "New method to improve the microstructure and mechanical properties of joint obtained using FSW," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 93, no. 9, pp. 4371–4378, 2017, doi: 10.1007/s00170-017-0810-3.
- [26] B. Bagheri, M. Abbasi, and A. Abdollahzadeh, "Microstructure and mechanical characteristics of AA6061-T6 joints produced by friction stir welding, friction stir vibration welding and tungsten inert gas welding: A comparative study," *Int. J. Miner. Metall. Mater.*, vol. 28, no. 3, pp. 450–461, 2021, doi: 10.1007/s12613-020-2085-1.
- [27] J.-Q. Su, T. W. Nelson, and C. J. Sterling, "Microstructure evolution during FSW/FSP of high strength aluminum alloys," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 405, no. 1, pp. 277–286, 2005, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.06.009>.
- [28] D. Sejani, W. Li, and V. Patel, "Stationary shoulder friction stir welding – low heat input joining technique: a review in comparison with conventional FSW and bobbin tool FSW," *Crit. Rev. Solid State Mater. Sci.*, pp. 1–50, Jul. 2021, doi: 10.1080/10408436.2021.1935724.
- [29] R. T. Rahman, A. W. Nugroho, and T. Suwanda, "Disain dan Pembuatan Alat Preheat Induksi pada Pengelasan Gesek Logam Dissimilar," *JMPM (Jurnal Mater. dan Proses Manufaktur)*, vol. 3, no. 2, pp. 75–82, 2019, doi: 10.18196/jmpm.3240.
- [30] P. K. Sahu and S. Pal, "Effect of FSW parameters on microstructure and mechanical properties of AM20 welds," *Mater. Manuf. Process.*, vol. 33, no. 3, pp. 288–298, Feb. 2018, doi: 10.1080/10426914.2017.1279295.
- [31] Z. Y. Ma, A. H. Feng, D. L. Chen, and J. Shen, "Recent Advances in Friction Stir Welding/Processing of Aluminum Alloys: Microstructural Evolution and Mechanical Properties," *Crit. Rev. Solid State Mater. Sci.*, vol. 43, no. 4, pp. 269–333, Jul. 2018, doi: 10.1080/10408436.2017.1358145.