

Pengaruh parameter proses *friction stir welding* dengan material aluminium alloy AA6061-T651 terhadap distorsi dan uji kekerasan

Mulyadi^{1*}, Rachmat Firdaus², Iswanto³, Mochammad Nur Rizki⁴

^{1,2,3,4} Prodi Teknik Mesin, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Muhammadiyah
Sidoarjo

Jl. Raya Gelam No. 250 Kec. Candi Kab. Sidoarjo

*Corresponding author: mulyadi@umsida.ac.id

Abstract

Welding is a process of uniting two or more materials into a form of connection using heat energy. Friction Stir Welding (FSW) is a solid-state welding method that can produce high-quality welding joints for some materials with low weldability such as aluminum. The research objective was to determine the effect of process parameters on the distortion and resistance of aluminum AA6061-T651 material through the Brinell hardness test. The FSW tool used has a hexagonal pin geometry. The experimental design used the Taguchi method. This study uses 4 factors and each factor has 4 levels, the elements used are tool rotation speed, welding speed, tool tilt angle, and concave shoulder angle. The responses analyzed are distortion and hardness of the welded joint material. The effect of process parameters on the response was analyzed using ANOVA. The results of ANOVA on distortion obtained the value of Brinell hardness in the weld metal area, and in the TMAZ area. Specimen 13 with tool rotation speed parameters of 3022 rpm, welding speed of 43 mm/min, tool tilt angle of 3.5°, and concave shoulder angle of 2° with a distortion value of 0.117°. Then we get the results of the Brinell hardness of the weld metal which is close to the target of the base metal with the parameter tool rotation speed of 3022 rpm, welding speed of 90 mm/min, tool tilt angle of 2.5°, and concave shoulder angle of 8° with a Brinell hardness value of 75.7 BHN, and the Brinell hardness value at TMAZ with tool rotation speed parameters of 1208 rpm, welding speed of 65 mm/min, tool tilt angle of 2.5°, and concave shoulder angle of 2° with a Brinell hardness value of 74.7 BHN.

Keywords: *friction stir welding, AA6061-T651, distortion, hardness, taguchi ANOVA.*

Abstrak

Pengelasan adalah suatu proses menyatukan dua material atau lebih menjadi suatu bentuk sambungan dengan menggunakan energi panas. *Friction Stir Welding* (FSW) merupakan metode pengelasan *solid state* yang dapat menghasilkan sambungan pengelasan dengan kualitas tinggi untuk beberapa material yang memiliki kemampuan las rendah seperti aluminium. Tujuan penelitian untuk mengetahui pengaruh parameter proses terhadap distorsi dan ketahanan material aluminium AA6061-T651 melalui uji kekerasan brinell. Tool FSW yang digunakan bergeometri pin hexagonal. Desain eksperimen menggunakan metode Taguchi. Penelitian ini menggunakan 4 faktor dimana setiap faktor mempunyai 4 level, faktor yang digunakan adalah kecepatan rotasi *tool*, kecepatan pengelasan, sudut kemiringan *tool*, dan sudut bahu cekung. Respon yang dianalisa adalah distorsi dan kekerasan pada material sambungan las. Pengaruh parameter proses terhadap respon dianalisa menggunakan ANOVA. Hasil ANOVA terhadap distorsi didapatkan nilai kekerasan brinell daerah *weld metal*, dan daerah TMAZ. Spesimen 13 dengan parameter kecepatan rotasi *tool* 3022 rpm, kecepatan pengelasan 43 mm/min, sudut kemiringan *tool* 3,5°, dan sudut bahu cekung 2° dengan nilai distorsi sebesar 0,117°. Kemudian didapatkan hasil kekerasan brinell pada *weld metal* yang mendekati target dari *base metal* dengan parameter kecepatan rotasi *tool* 3022

rpm, kecepatan pengelasan 90 mm/min, sudut kemiringan *tool* 2,5°, dan sudut bahu cekung 8° dengan nilai kekerasan brinell sebesar 75,7 BHN, dan nilai kekerasan brinell pada TMAZ dengan parameter kecepatan rotasi *tool* 1208 rpm, kecepatan pengelasan 65 mm/min, sudut kemiringan *tool* 2,5°, dan sudut bahu cekung 2° dengan nilai kekerasan brinell sebesar 74,7 BHN.

Kata kunci: *friction stir welding*, AA6061-T651, distorsi, kekerasan, taguchi ANOVA.

Pendahuluan

Pengelasan adalah suatu proses menyatukan dua material atau lebih menjadi suatu bentuk sambungan dengan menggunakan energi panas [1]. Metode pengelasan sebagai penyambungan logam sering ditemui dalam industri seperti pembuatan alat elektronik, alat transportasi hingga konstruksi bangunan [2]. *Friction Stir Welding* (FSW) pertama kali ditemukan oleh Wayne Thomas dari organisasi *The Welding Institute* (TWI) pada tahun 1991. FSW merupakan metode pengelasan *solid state* yang dapat menghasilkan sambungan pengelasan dengan kualitas tinggi untuk beberapa material yang memiliki kemampuan las rendah seperti aluminium [1].

Aluminium memiliki sifat yang mudah dibentuk, lentur, dan tahan korosi, itulah alasan Aluminium banyak digunakan untuk berbagai aspek industri manufaktur termasuk di bidang industri perkapalan kereta api, mobil, pesawat, dan bahan konstruksi bangunan. Akan tetapi untuk Aluminium murni memiliki kekuatan yang rendah [3]. Hal ini bisa ditingkatkan dengan pepaduan Aluminium dengan komposisi lainnya untuk peningkatan sifat dari Aluminium murni tersebut. Kekuatan tensil aluminium murni adalah 90 MPa, sedangkan aluminium paduan memiliki kekuatan tensil berkisar 200-600 MPa. Aluminium memiliki berat sekitar satu pertiga baja, mudah ditebuk, diperlakukan dengan mesin, dicor, ditarik (*drawing*), dan diekstrusi. Salah satu pepaduan Aluminium adalah pada seri AA 6061-T6 [4].

Paduan AA6061-T6 adalah paduan aluminium (Al), magnesium (Mg), dan silikon (Si) kekuatan tinggi yang

mengandung mangan (Mn) untuk meningkatkan keuletan dan ketangguhannya [5]. Untuk proses pengelasan aluminium biasanya menggunakan *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) atau *Gas Metal Arc Welding* (GMAW). Namun yang menjadi kendala dalam proses pengelasannya adalah aluminium merupakan penghantar panas yang baik, mempunyai titik lebur (*melting point*) yang rendah dan adanya lapisan oksida pada permukaan sehingga sangat sulit untuk memanaskan atau mencairkan hanya sebagian kecil dari aluminium [6].

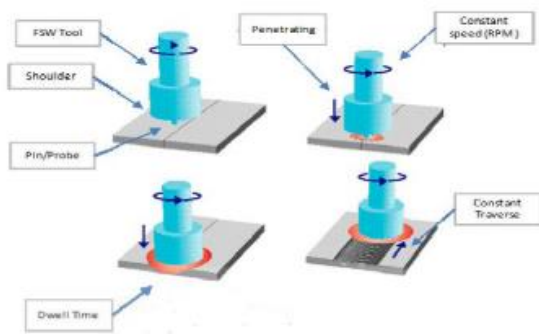
Beberapa parameter proses yang dipertimbangkan pada pengelasan FSW antara lain adalah kecepatan putaran *tool*, kecepatan pengelasan, kemiringan *tool*, sudut bahu cekung, geometri *tool*, dan material *tool* [7]. Dengan pemilihan parameter proses FSW yang tepat, maka akan didapatkan kekuatan sambungan akan meningkat dan cacat pengelasan dapat diminimalkan. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh parameter proses pengelasan FSW pada sambungan aluminium AA6061-T651 terhadap distorsi atau perubahan sifat fisik dan untuk mengetahui ketahanan material atau perubahan sifat mekanik melalui uji kekerasan brinell setelah dilakukan pengelasan FSW.

Tinjauan Pustaka

FSW adalah pengelasan dimana padanya terjadi perubahan energi mekanis menjadi panas dengan cara menggesekkan dua permukaan yang akan di las hingga mencapai temperatur tertentu [8].

Dengan FSW, *tool* pengelasan dengan atau tanpa profil berputar dan bergerak dengan kecepatan konstan di

sepanjang alur sambungan antara dua bahan yang akan disambung [9]. Benda kerja harus dijepit dengan kuat di jig atau ragam untuk mempertahankan posisinya karena gaya yang terlibat dalam pengelasan. Panjang *probe* harus lebih pendek dari ketebalan benda kerja, dan *shoulder* harus bersentuhan dengan permukaan benda kerja untuk menghasilkan panas [6].



Gambar 1. Proses FSW [6]

Tabel 1. Sifat Mekanis Aluminium AA6061 -T6

| Property | Value |
|------------------------|------------------------------|
| Density | 2.70 g/cm ³ |
| Melting Point | 650°C |
| Thermal Expansion | 23.4 x10 ⁻⁶ |
| Modulus of Elasticity | 70 GPa |
| Thermal Conductivity | 166 W/m.K |
| Electrical Resistivity | 0.040 x10 ⁻⁶ Ω .m |
| Proof Stress | 240 Min MPa |
| Tensile Strength | 260 Min MPa |
| Hardness Brinell | 95 HB |

Aluminium AA6061-T6 adalah aluminium paduan silikon dan magnesium (seri 6000 atau 6xxx). Aluminium AA6061-T6 memiliki kekuatan tertinggi kedua dan memiliki keuletan terendah kedua dibandingkan dengan varian yang lain [10]. Secara umum material ini banyak diaplikasikan pada industri transportasi seperti struktur profil pada pesawat, kereta api dan bus [4]. Berikut adalah sifat dari material AA6061-T6 menurut [11] yang menjelaskan kandungan sifat mekanis material AA6061-T6 pada tabel 1.

Metode Penelitian

Metode penelitian digunakan untuk menyelesaikan permasalahan dan

mengetahui bagaimana pengaruh parameter proses FSW dengan material *aluminium alloy* AA6061-T651 terhadap distorsi dan uji kekerasan. Berikut langkah-langkah proses penelitian dapat dilihat pada gambar 2.



Gambar 2. Diagram alir penelitian

Metode taguchi ANOVA (*Analisis of variance*) [12] dilakukan menggunakan *software* Minitab 18 dengan karakteristik performa yang digunakan adalah *smaller is better* untuk pengujian distorsi dan *nominal is best* untuk uji kekerasan brinell pada daerah *weld metal* dan *thermomechanically affected zone* dengan target kekerasan dari *base metal* aluminium alloy AA6061-T651 yaitu sebesar 95 BHN, Setelah diketahui parameter atau masing-masing faktor yang signifikan. Kemudian mencari Persen kontribusi untuk mengetahui besar kontribusi masing-masing faktor terhadap respon. Berikut adalah desain eksperimen taguchi orthogonal array L₁₆ untuk parameter proses pengelasan dapat dilihat pada tabel 2.

Tabel 2. Desain Eksperimen L16

| Spc | Kecepatan rotasi <i>tool</i> (rpm) | Kecepatan Pengelasan (mm/m) | Tilt Angle ($^{\circ}$) | Sudut bahu cekung ($^{\circ}$) |
|-----|------------------------------------|-----------------------------|---------------------------|----------------------------------|
| 1 | 765 | 24 | 2 | 2 |
| 2 | 765 | 43 | 2.5 | 5 |
| 3 | 765 | 65 | 3 | 8 |
| 4 | 765 | 90 | 3 | 11 |
| 5 | 1208 | 65 | 2.5 | 2 |
| 6 | 1208 | 90 | 2 | 5 |
| 7 | 1208 | 24 | 3.5 | 8 |
| 8 | 1208 | 43 | 3 | 11 |
| 9 | 1907 | 90 | 3 | 2 |
| 10 | 1907 | 65 | 3.5 | 5 |
| 11 | 1907 | 43 | 2 | 8 |
| 12 | 1907 | 24 | 2.5 | 11 |
| 13 | 3022 | 43 | 3.5 | 2 |
| 14 | 3022 | 24 | 3 | 5 |
| 15 | 3022 | 90 | 2.5 | 8 |
| 16 | 3022 | 65 | 2 | 11 |

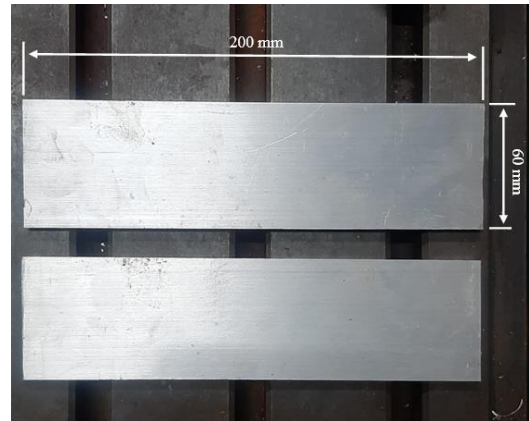
Spesifikasi proses FSW pada eksperimen ini menggunakan mesin frais universal 3 axis dengan parameter proses kecepatan putaran *tool* 765, 1208, 1907, 3022 rpm, tilt angle 2°, 2,5°, 3°, 3,5°, dan kecepatan pengelasan 24, 43, 65, 90 mm/min.



Gambar 3. Mesin Frais Universal

(Sumber : LAB Teknik Mesin UMSIDA)

Material yang digunakan adalah plat aluminium alloy AA6061-T651 dengan dimensi 200mm x 60mm x 6mm



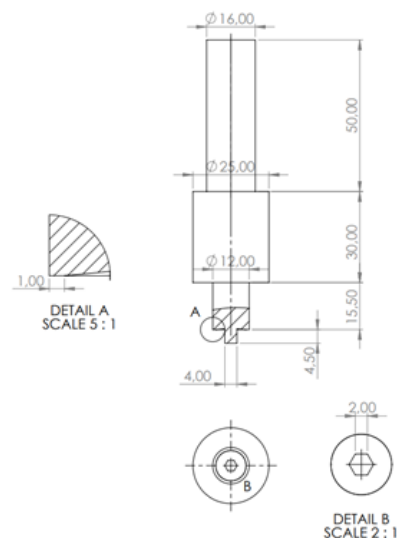
Gambar 4. Material FSW

Material *tool* FSW pada penelitian ini menggunakan *Hot work tool steel* H13, dengan geometri pin *hexagonal* dan memiliki sudut bahu cekung 2°, 5°, 8°, 11°.



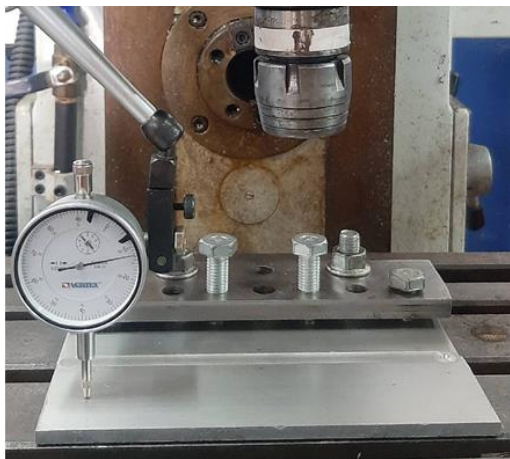
Gambar 5. Tool FSW

Adapun detail dimensi *tool* yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar 6 [2].



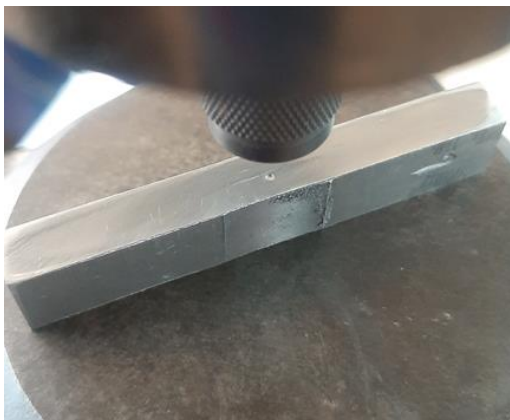
Gambar 6. Detail 2D Tool FSW [2]

Proses pengujian distorsi dilakukan di Laboratorium Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Sidoarjo. Pengujian dilakukan dengan menggunakan alat *dial indicator* dengan akurasi ketelitian 0,01 mm.



Gambar 7. Proses Pengujian Distorsi (Sumber : LAB Teknik Mesin UMSIDA)

Pengujian kekerasan metode brinell menggunakan alat uji kekerasan *universal* dengan diameter indentor bola baja 2,5 mm, beban 613 N, waktu indentasi 15 detik, dan perbesaran *microscop* 5x. Indentasi dilakukan pada daerah *weld metal* dan TMAZ FSW.



Gambar 8 Indentasi pada Spesimen Uji

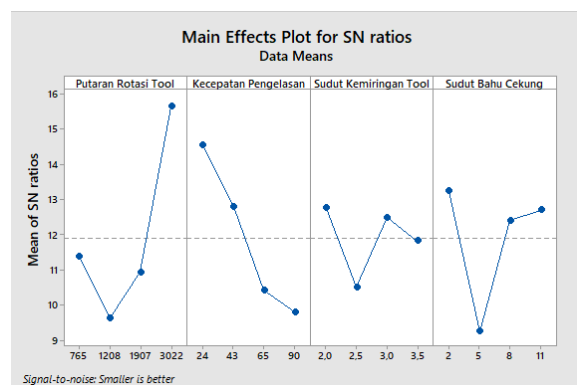
Hasil dan Pembahasan

Berikut adalah nilai rata-rata hasil perhitungan distorsi FSW dan uji kekerasan brinell pada daerah *weld metal* dan *thermomechanically affected zone* dengan target kekerasan dari base metal aluminium alloy AA6061-T651 yaitu 95 BHN dapat dilihat pada tabel 3.

Tabel 3. Nilai Rata-rata Hasil Pengujian

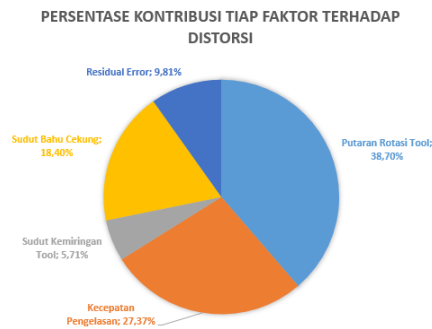
| SPC | Nilai Distorsi (°) | Nilai Kekerasan (BHN) | | |
|-----|--------------------|-----------------------|------|----|
| | | WM | TMAZ | BM |
| 1 | 0,186 | 67,1 | 63 | 95 |
| 2 | 0,410 | 48,8 | 72 | 95 |
| 3 | 0,257 | 59,8 | 71,3 | 95 |
| 4 | 0,272 | 57,9 | 68,2 | 95 |
| 5 | 0,339 | 46,3 | 74,7 | 95 |
| 6 | 0,471 | 73,5 | 70,2 | 95 |
| 7 | 0,244 | 56,3 | 65,8 | 95 |
| 8 | 0,306 | 57,3 | 69,5 | 95 |
| 9 | 0,306 | 68,2 | 71 | 95 |
| 10 | 0,555 | 59,2 | 69,5 | 95 |
| 11 | 0,188 | 63,6 | 63,3 | 95 |
| 12 | 0,204 | 60,1 | 62,4 | 95 |
| 13 | 0,117 | 60,1 | 64,6 | 95 |
| 14 | 0,132 | 58,4 | 60,6 | 95 |
| 15 | 0,280 | 75,7 | 65,5 | 95 |
| 16 | 0,171 | 74,3 | 63 | 95 |

Hasil optimasi untuk distorsi menunjukkan 3 faktor yang dinilai signifikan.



Gambar 9. SN Ratio untuk Distorsi

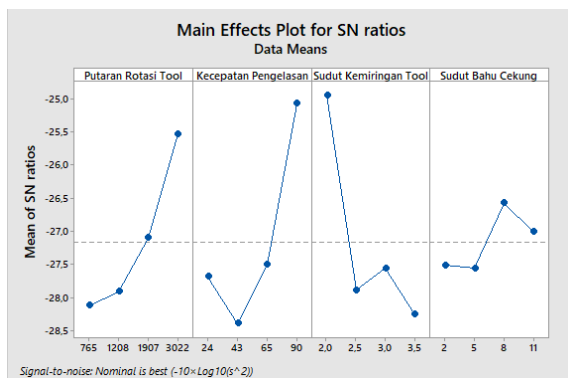
Faktor tersebut adalah kecepatan rotasi *tool*, kecepatan pengelasan, dan sudut bahu cekung. parameter optimum yang paling berpengaruh ada pada kecepatan rotasi 3022 rpm, kecepatan pengelasan 24 mm/mnt, *tilt angle* 2°, dan sudut bahu cekung 2°, dan pada penelitian kali ini didapatkan hasil distorsi paling rendah ada pada spesimen 13 dengan parameter kecepatan rotasi *tool* 3022 rpm, kecepatan pengelasan 43 mm/min, sudut kemiringan *tool* 3,5°, dan sudut bahu cekung 2° dengan nilai distorsi sebesar 0,117°.



Gambar 10. Persentase Kontribusi Distorsi

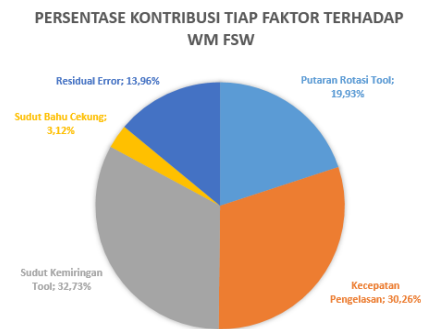
Persentase kontribusi masing-masing faktor yang berpengaruh yakni kecepatan putaran *tool* sebesar 38,70%, kecepatan pengelasan sebesar 27,37%, sudut kemiringan *tool* sebesar 5,71%, sudut bahu cekung 18,40% terhadap distorsi.

Untuk uji kekerasan brinell pada daerah *Welding Metal* didapat bahwa ada 3 faktor yang signifikan dapat dilihat pada gambar 11.



Gambar 11. SN Ratio untuk WN FSW

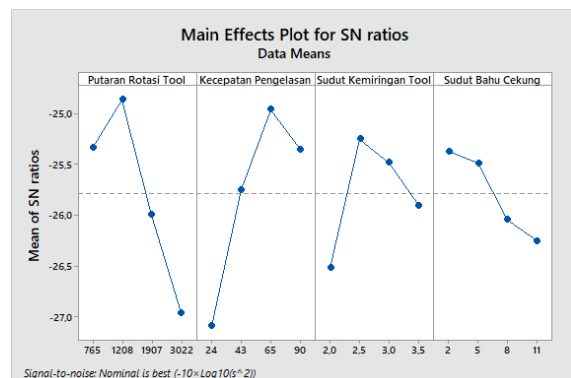
Faktor tersebut adalah kecepatan rotasi *tool*, kecepatan pengelasan, dan sudut kemiringan *tool*. parameter optimum didapat pada kecepatan rotasi *tool* 3022 rpm, kecepatan pengelasan 90 mm/mnt, *tilt angle* 2°, dan sudut bahu cekung 8°, dan pada penelitian kali ini didapatkan hasil kekerasan brinell daerah *weld metal* yang mendekati target dari *base metal* ada pada spesimen 15 dengan parameter kecepatan rotasi *tool* 3022 rpm, kecepatan pengelasan 90 mm/min, sudut kemiringan *tool* 2,5°, dan sudut bahu cekung 8° dengan nilai kekerasan brinell sebesar 75,7 BHN.



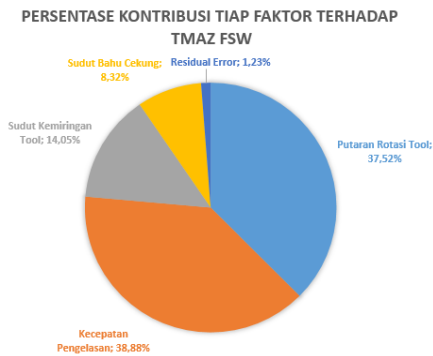
Gambar 12. Persentase Kontribusi WM FSW

Diketahui persentase kontribusi masing-masing faktor yang berpengaruh yakni kecepatan putaran *tool* sebesar 19,93%, kecepatan pengelasan sebesar 30,26%, sudut kemiringan *tool* sebesar 32,73%, sudut bahu cekung 3,12% terhadap daerah WM FSW.

Terdapat 4 faktor yang berpengaruh signifikan terhadap TMAZ FSW. Faktor tersebut adalah kecepatan rotasi *tool*, kecepatan pengelasan, sudut kemiringan *tool*, dan sudut bahu cekung. parameter optimum untuk kekerasan pada daerah TMAZ dengan menggunakan parameter kecepatan rotasi 1208 rpm, kecepatan pengelasan 65 mm/mnt, *tilt angle* 2,5° dan sudut bahu cekung 2°, dan pada penelitian kali ini didapatkan hasil kekerasan brinell TMAZ yang mendekati target dari *base metal* ada pada spesimen 5 dengan parameter kecepatan rotasi *tool* 1208 rpm, kecepatan pengelasan 65 mm/min, sudut kemiringan *tool* 2,5°, dan sudut bahu cekung 2° dengan nilai kekerasan brinell sebesar 74,7 BHN.



Gambar 13. SN Ratio TMAZ FSW



Gambar 14 Persentase Kontribusi TMAZ FSW

Persentase kontribusi masing-masing faktor yang berpengaruh yakni kecepatan putaran *tool* sebesar 37,52%, kecepatan pengelasan sebesar 38,88%, kemiringan *tool* sebesar 14,05%, sudut bahu cekung 8,32% terhadap daerah TMAZ FSW.

Kesimpulan

Dari hasil ANOVA analisa taguchi, didapatkan parameter yang optimum terhadap distorsi pada metode pengelasan FSW, faktor yang signifikan adalah kecepatan rotasi *tool* 3022 rpm, kecepatan pengelasan 24 mm/min, sudut kemiringan *tool* 2°, dan sudut bahu cekung 2°. Pada penelitian kali ini didapatkan hasil distorsi paling rendah ada pada spesimen 13 dengan parameter kecepatan rotasi *tool* 3022 rpm, kecepatan pengelasan 43 mm/min, sudut kemiringan *tool* 3,5°, dan sudut bahu cekung 2° dengan nilai distorsi sebesar 0,117°.

Untuk nilai kekerasan brinell (BHN) pada daerah *Weld Metal* didapatkan faktor yang signifikan yakni kecepatan rotasi *tool* 3022 rpm, kecepatan pengelasan 90 mm/min, sudut kemiringan *tool* 2°. Pada penelitian kali ini didapatkan hasil kekerasan brinell WM yang mendekati target dari *base metal* ada pada spesimen 15 dengan parameter kecepatan rotasi *tool* 3022 rpm, kecepatan pengelasan 90 mm/min, sudut kemiringan *tool* 2,5°, dan sudut bahu cekung 8° dengan nilai kekerasan brinell sebesar 75,7 BHN.

Pada daerah *Thermo Mechanically Affected Zone* didapatkan faktor yang paling signifikan ada pada parameter proses

friction stir welding dengan putaran rotasi *tool* 1208 rpm, kecepatan pengelasan 65 mm/min, sudut kemiringan *tool* 2,5°, dan sudut bahu cekung 2°. Pada penelitian kali ini didapatkan hasil kekerasan brinell TMAZ yang mendekati target dari *base metal* ada pada spesimen 5 dengan parameter kecepatan rotasi *tool* 1208 rpm, kecepatan pengelasan 65 mm/min, sudut kemiringan *tool* 2,5°, dan sudut bahu cekung 2° dengan nilai kekerasan brinell sebesar 74,7 BHN.

Ucapan terimakasih

Ucapan terima kasih penulis sampaikan khususnya kepada seluruh pihak terkait yang memberikan pengetahuan serta dukungan hingga selesainya penelitian ini. Semoga hasil dari penelitian ini dapat memenuhi tujuan yang diharapkan dan bermanfaat bagi yang membutuhkan, khususnya bagi industri manufaktur fabrikasi yang menggunakan metode pengelasan FSW, dan semoga segala urusan kita dilancarkan, menjadi berkah, dan amal ibadah. Aamiin.

Referensi

- [1] S. Wiryolukito dan J. P. Wijaya, "Result analysis of friction stir welding of aluminum 5083-H112 using taper threaded cylinder pin with variation in rotational and translational speed," *AIP Conf. Proc.*, vol. 2262, 2020, doi: 10.1063/5.0016148.
- [2] N. A. Pontjonoto, "Optimasi Proses Friction Stir Welding pada 4 Geometri Pin dari Tool dengan Parameter Proses dan Sudut Bahu Cekung dalam Penyambungan Aluminium Alloy 6005A-T6," 2021.
- [3] R. I. Rodriguez, J. B. Jordon, P. G. Allison, T. Rushing, dan L. Garcia, "Microstructure and mechanical properties of dissimilar friction stir welding of 6061-to-7050 aluminum alloys," *Mater. Des.*, vol. 83, hal. 60–65, 2015, doi:

- 10.1016/j.matdes.2015.05.074.
- [4] U. B. Aji Nurhafid, Sarjito Jokosisworo, “Analisa Pengaruh Perbedaan Feed Rate Terhadap Kekuatan Tarik Dan Impak Aluminium 6061 Metode Pengelasan Friction Stir Welding,” *J. Tek. Perkapalan*, vol. 5, no. 2, hal. 473–481, 2017.
- [5] M. Bahemmat dan M. Farahbakhsh, “Effects of electrokinetic remediation technique on soil microbial population in a heavy metals contaminated soil,” no. June 2010, 2020.
- [6] I. Helmi, T. Balai, B. Logam, M. Bandung, dan A. Disetujui, “Pengaruh Bentuk Pin Terhadap Sifat Mekanik Aluminium 5083 – H112 Hasil Proses Friction Stir WELDING,” *Ris. Teknol. Ind.*, vol. 11, no. 1, hal. 31–42, 2017.
- [7] M. Arsyad Suyuti, . A., M. Iswar, dan R. Nur, “Investigasi sifat mekanis sambungan Dissimilar Friction Stir welding (DFSW) Aluminium Alloys (AA5052 to AA6061),” *J. Energi Dan Manufaktur*, vol. 13, no. 2, hal. 49, 2020, doi: 10.24843/jem.2020.v13.i02.p01.
- [8] M. R. Riyadi1), S. Jokosisworo1), dan Ahmad Fauzan Zakki), “Pengaruh RPM dan Diameter Pin Tool Terhadap Kekuatan Tarik, Impak, dan Mikrografi Hasil Pengelasan Friction Stir Welding (FSW) Single Side Pada Aluminium 5083,” *Tek. Perkapalan*, vol. 7, no. 4, hal. 168–175, 2019, [Daring]. Tersedia pada: <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/naval/article/view/24792>.
- [9] A. Sudrajat dan J. Rotor, “Analisis Sifat Mekanik Hasil Pengelasan Aluminium Aa 1100 Dengan Metode Friction Stir Welding (FSW) Angger Sudrajat F.P. 1 , Sumarji 2 , Mahros Darsin 3,” vol. 5, hal. 8–17, 2012.
- [10] A. N. Abood, A. H. Saleh, dan Z. W. Abdullah, “Effect of Heat Treatment on Strain Life of Aluminum Alloy AA 6061,” *J. Mater. Sci. Res.*, vol. 2, no. 2, hal. 51–59, 2013, doi: 10.5539/jmsr.v2n2p51.
- [11] T. Types, S. Forms, G. P. Properties, M. Properties, dan C. Composition, “6061 - T6 Extrusions,” hal. 6–7.
- [12] M. Nalbant, H. Gökkaya, dan G. Sur, “Application of Taguchi method in the optimization of cutting parameters for surface roughness in turning,” *Mater. Des.*, vol. 28, no. 4, hal. 1379–1385, 2007, doi: 10.1016/j.matdes.2006.01.008.
- [13] Budiyanto, E., Nugroho, E., & Masruri, A. (2017). Pengaruh diameter filler dan arus pada pengelasan TIG terhadap kekuatan tarik dan struktur mikro pada baja karbon rendah. *Turbo: Jurnal Program Studi Teknik Mesin*, 6(1).
- [14] Budiyanto, E. (2020). *Pengujian Material*. Laduny Alifatama.
- [15] 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).