

Temperature behaviour advancing side and retreating side due to preheating in friction stir welding AL 6061

Sugiarto¹, Mega Nursasongko¹, Moch. Syamsul Ma'arif¹,
Muhammad Hariz D. S.¹, Ramadhe Rossy¹

¹Mechanical Engineering Department, Brawijaya University,
MT Haryono 167, Malang 65145, Indonesia

*Email: sugik_mlg@ub.ac.id

ABSTRACT

The retreating side and advancing side are nomenclatures to two opposing sides during the Friction Stir Welding (FSW) process. On the retreating side, heat generated by friction during the process tends to spread and transmit evenly to the surrounding material; hence, heat concentration on certain sides of the material does not occur. On the other hand, on the advancing side, heat concentration do occur mainly around the tool. It has an impact on increasing the temperature on the material in the vicinity of the tool. Preheating the material will alter the temperature characteristic, thermal cycle, and morphology of the advancing side and retreating side regions. This research uses aluminium Al 6061 6 mm thick. The preheating temperature was varied on T_{room} , 50 °C, 75 °C, 100 °C, and 125 °C. Dependent variables for the research are the thermal cycle on the retreating side and advancing side and the morphology of the weld joint. The other parameters are controlled such as type of joint of square butt joint, spindle speed of 921 rpm, feed rate of 24 mm/min, tool shoulder diameter of 12 mm, pin length of 5 mm, pin diameter of 6 mm, depth of plunge 0,2 mm, and weld angle of 0°. Temperature is measured at 40 mm from the start of the weld and 20 mm off the weld center. The results are the peak temperature of the weld on advancing side is higher than of the retreating side, higher preheating temperature make peak temperature to be faster to achieve and the cooling rate after welding becomes slower. The peak temperature trend is increase from T_{room} to 75 °C and then decreases on the temperature of 100 °C and 125 °C. Based on joint morphology in each temperature variation of preheating temperature, tunnel defect is observed on the advancing side.

Keywords: FSW, preheating, Al 6061, advancing side, retreating side, thermal cycle

Received 30 September 2023; **Presented** 5 October 2023; **Publication** 27 May 2024

PENDAHULUAN

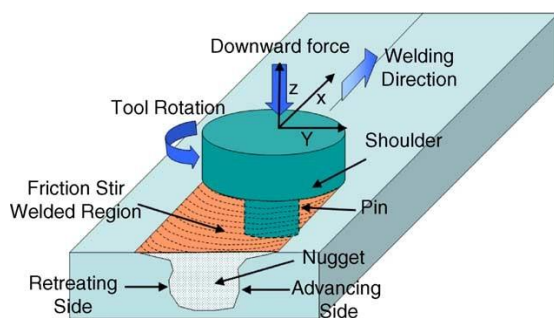
Aluminium paduan mempunyai sifat mampu las fusi yang rendah karena tingginya panas jenis dan daya hantar panas aluminium, sehingga sulit untuk memanaskan atau mencairkan sebagian kecil saja area pengelasan [22]. Pengelasan cair sulit diterapkan pada aluminium paduan, karena cenderung menghasilkan cacat porositas dan retak selama solidifikasi [5], [1]. *Friction stir welding* (FSW) menjadi salah satu alternatif solusi dalam penyambungan aluminium paduan. Pada *friction stir welding* tidak terjadi proses pencairan dan solidifikasi, sehingga tidak akan terjadi penyusutan atau retak panas [21]. Cook, G.E et al. (2002), dalam tulisannya menyatakan *Friction stir welding* memiliki banyak keunggulan dibandingkan teknik pengelasan fusi, karena suhu proses tetap di bawah titik lebur bahan yang dilas, tidak perlu pelindung gas, distorsi rendah dan tegangan sisa rendah. FSW merupakan proses hemat energi yang tidak menghasilkan asap, *arc flash*, ataupun *spatter*.

Karena proses penyambungan logam terjadi tanpa pencairan (*solid state process*), maka hidrogen difusi menjadi rendah sehingga dapat meminimalkan terjadinya retak hydrogen [3]. Beberapa parameter gesekan pada FSW yang berperan dalam menaikkan panas las antara lain kecepatan putar (kecepatan *spindle*), *feed rate* (kecepatan transversal), tekanan *shoulder*, karakteristik material, dan dimensi pin dan *shoulder*.

Friction stir welding digunakan untuk penyambungan material plastis dengan cara yang berbeda. *Non-consumable tool holder* yang berputar ditekan ke material yang akan dilas. Di bagian tengah *tool holder* terdapat pin atau probe. Sambungan akan dihasilkan dari penyatuan material plastis karena panas yang dihasilkan dari gesekan antara *tool* dan *interface* dua bahan yang bersentuhan. *Tool holder* yang berputar akan bergerak di sepanjang garis sambungan (*weld line*). Salah satu kunci dalam FSW adalah besarnya panas yang tercipta akibat gesekan antara benda kerja dengan tool yang

berputar. Panas yang terbentuk harus cukup tinggi untuk membuat material melunak sehingga dapat diaduk oleh pin [19]. Temperatur optimal yang dihasilkan dalam pengelasan FSW adalah antara 80%-90% dari titik cair material yang akan dilas, sehingga cacat pengelasan dapat diminimalisir [2].

Prinsip kerja FSW terdiri dari beberapa tahapan yaitu seperti penyiapan dan pemasangan *tool* (pahat) pengelasan pada bahu pengecam. *Tool* yang digunakan dalam proses pengelasan ini dipilih material dengan titik lebur lebih tinggi dari



Gambar 1.1 Proses *Friction Stir Welding* [13]

Panas terbesar pada proses friction stir welding timbul dari gesekan permukaan antara bahu dan benda kerja. Sedangkan gesekan antara pin dan benda kerja tidak menghasilkan panas yang signifikan [13]. *Heat input* pengelasan FSW dipengaruhi oleh koefisien gesek, gaya tekan, diameter *pin* dan *shoulder* serta *rotational speed* sebagai berikut [14]:

$$Q = \frac{1}{2} \mu F_N (D_i + D_o) \omega$$

Keterangan:

Q = Heat input FSW (J/m)

μ = Koefisien gesek (Al sekitar 0,47)

F_N = Gaya tekan (N)

D_i = Diameter *pin* (m)

D_o = Diameter *shoulder* (m)

ω = *Rotational speed* (radian/det)

Dari rumus diatas dapat dilihat bahwa gaya tekan (F_N), diameter *pin* (D_i), diameter *shoulder* (D_o), dan *rotational speed* dari *spindle* (ω) memiliki hubungan yang berbanding lurus dengan masukan panas (Q). Saat nilai dari gaya tekan, diameter *pin*, diameter *shoulder*, dan *rotational speed* dari *spindle* dinaikkan, maka akan menyebabkan kenaikan heat input las dan begitu pula sebaliknya.

material sambungan dimana terdapat *shoulder* dan *pin*. Setelah *tool* dipasang pada bahu pengecam, selanjutnya berikan putaran yang tetap terhadap *tool*. *Tool* yang telah berputar lalu ditempatkan pada daerah yang akan dilakukan pengelasan (*weld line*). Tahap terakhir yaitu pengelasan, tahap ini dilakukan setelah terjadi panas yang cukup untuk mencapai suhu sekitar 0.8-0.9 T_c (suhu cair) logam induk dan selanjutnya *tool* atau benda kerjanya digerakan mengikuti garis las. Proses *friction stir welding* dapat dilihat pada Gambar 1.1 berikut

Memberikan *preheating* pada material selama proses FSW akan berdampak pada peningkatan suhu pengelasan. Karena akan terjadi akumulasi suhu akibat gesekan dan suhu *preheating*. Hal ini akan berdampak pada perubahan suhu pengelasan. Jika suhu terlalu tinggi mendekati suhu cair akan berdampak pada pelunakan sambungan yang berlebih sehingga menurunkan kualitas sambungan. Jika panas yang dihasilkan oleh gesekan dan deformasi plastik terlalu tinggi dapat menyebabkan sambungan las mengalami efek pelunakan termal, yang menyebabkan kekuatan HAZ lebih rendah dari logam dasar [6].

Dalam *friction stir welding*, panas pengelasan digunakan untuk menaikkan suhu logam dari kondisi awal menuju ke suhu *solid state*. Energi yang dibutuhkan dalam pengelasan FSW sebesar $E = \mu \cdot F_N (D_i + D_o) \omega \times L$ seharusnya sebanding dengan panas sensibel logam yaitu $E = m \cdot C_p \cdot dT$ dengan $dT = (T_{solid\ state} - T_0)$. Jika material diberi *preheating* yang berarti (T_0) dinaikan, maka panas sensibel akan turun, yang berarti panas yang dihasilkan dari proses gesekan seharusnya diturunkan dengan mengurangi besaran parameter gesekan. Namun jika parameter gesekan tetap, sementara T_0 dinaikan jauh di atas T_{ruang} , maka dapat berakibat panas pengelasan berlebih yang berdampak pada pelunakan berlebih. Menaikkan temperatur benda kerja pada proses *rotary friction welding* di atas temperatur ruang akan mempercepat benda kerja mencapai kondisi *solid state* yang berarti akan menurunkan kebutuhan energi las [18].

Pada *friction stir welding* dikenal istilah *retreating side* dan *advancing side*. *Retreating side* dan *advancing side* merupakan dua sisi yang terbentuk selama proses pengelasan FSW. Sisi *advancing side* merupakan daerah dimana gerakan material yang diaduk *tool* searah dengan arah pengelasannya sedangkan *retreating side* sebaliknya [20]. Gerakan tool akan bergerak dan mendeformasi daerah *advancing side* secara

intens dan material akan terdeformasi plastis lalu mengalir di sisi *retreating side* dengan berlawanan arah. *Retreating side* adalah sisi dimana *tool* FSW telah melewati area pengelasan dan bergerak menjauhi arah pengelasan, sementara *advancing side* adalah sisi dimana *tool* FSW memasuki area pengelasan dan bergerak menuju arah pengelasan. Ketika *tool* FSW bergerak melalui material pada *advancing side*, terjadi pembentukan sumber panas akibat gesekan dan deformasi plastik akibat proses tekanan *tool* dan pengadukan pin pada material [13].

Efek pengadukan akan berdampak pada perpindahan material panas dari *retreating side* ke *advancing side* dan material dingin dari *advancing side* ke *retreating side*. Pada *retreating side*, panas yang dihasilkan oleh proses gesekan cenderung tersebar dan merambat ke seluruh material sekitar, sehingga tidak terjadi konsentrasi panas yang signifikan. Sebaliknya, pada *advancing side*, terdapat konsentrasi panas yang tinggi di sekitar *tool* FSW, yang berdampak pada peningkatan suhu pada material di sekitarnya [9]. Pemberian *preheating* pada material las akan berdampak pada perubahan karakteristik suhu, siklus termal dan morfologi daerah *advancing side* dan *retreating side*.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan aluminium Al 6061 tebal 6 mm. Suhu *preheating* divariasikan sebesar T_{ruang} (30°C), 50 °C, 75 °C, 100 °C dan 125 °C. Variabel terikat dalam penelitian ini adalah siklus termal las pada *retreating side* dan *advancing side* dan morfologi sambungan. Parameter lain dikendalikan seperti jenis sambungan *square butt joint*, kecepatan putaran *spindle* 921 rpm, *feed rate* 24 mm/min, diameter *tool shoulder* 12 mm, kedalaman las *pin* 5 mm, diameter *pin* 6 mm, *depth of plunge* 0,2 mm, dan sudut las 0°. Proses FSW menggunakan Mesin Milling Machine X6328B dan untuk mengukur suhu pengelasan menggunakan termokopel tipe-K. Suhu *preheating* diatur menggunakan pelat pemanas yang ditempelkan di bagian bawah benda kerja. Titik ukur suhu berjarak 40 mm dari awal las dan 20 mm dari pusat las masing-masing 1 titik pada *retreating side* dan *advancing side*. Dimensi masing-masing benda kerja yang akan disambung adalah 200 mm x 100 mm x 6 mm.

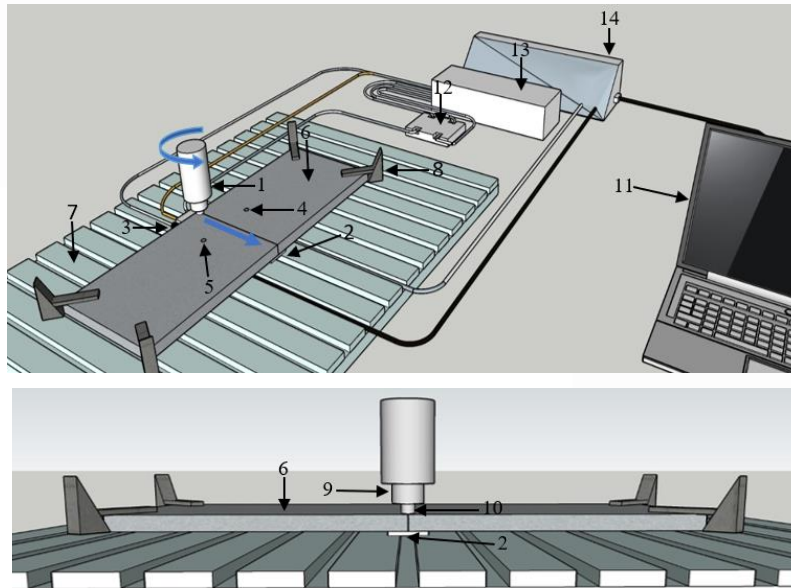
HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambar 3.1 dan 3.2 menunjukkan siklus termal pada *Advancing Side* (AS) dan *Retreating Side* (RS) dengan jarak pengukuran 40 mm dari awal las dan 20 mm dari pusat las pada variasi perubahan suhu *preheating*. Secara umum suhu pada AS lebih tinggi dibanding RS. Temperatur tertinggi didapatkan pada *Advancing Side*. Suhu puncak tertinggi didapatkan pada suhu *preheating* 75°C sedangkan suhu puncak terendah diperoleh pada suhu *preheating* 100°C. Turunnya suhu puncak dari suhu *preheating* 75°C ke suhu *preheating* 100°C dan 125°C dikarenakan material pada suhu 100°C atau lebih sudah mengalami rekristalisasi yang berarti telah mengalami pelunakan. Dampaknya adalah panas yang diakibatkan oleh gesekan *tool* terhadap benda kerja berkurang atau turun sehingga suhu puncak las juga turun.

Kenaikan suhu *preheating* juga berpengaruh terhadap waktu pencapaian suhu puncak las. Dari gambar 3.1 dan 3.2 nampak bahwa suhu puncak las yang diperoleh benda kerja tanpa *preheating* dan suhu *preheating* 50°C dicapai pada waktu sekitar 175 detik. Waktu pencapaian suhu puncak las semakin menurun dengan naiknya suhu *preheating* 75°C, 100°C dan 125°C. Hal ini menunjukkan bahwa suhu *preheating* berpengaruh pada peningkatan kecepatan pengelasan. Dengan kata lain meningkatkan suhu *preheating* menyebabkan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai suhu puncak pengelasan semakin singkat.

Dari gambar 3.3. Nampak bahwa suhu *preheating* berpengaruh terhadap laju pendinginan setelah suhu puncak. Laju pendinginan yang cepat ditandai oleh slop atau kemiringan grafik pendinginan yang semakin curam. Semakin tinggi suhu *preheating*, maka kemiringan grafik semakin landai. Hal tersebut menunjukkan bahwa semakin tinggi suhu *preheating* menyebabkan laju pendinginan semakin lambat dan terjadi waktu pencapaian suhu puncak yang semakin cepat.

Nampak pada gambar 3.4, bahwa permukaan las membentuk rigi-rigi (*ripples*) dan *keyhole* yang ditinggalkan oleh *tool*. Tampak atas adanya jejak setengah lingkaran yang ditinggalkan oleh *shoulder* pada permukaan sambungan semakin halus dengan meningkatkan suhu *preheating*. Pada semua variasi suhu *preheating* terdapat *flash defect*, yang umumnya diakibatkan oleh input panas yang berlebihan. Cacat jenis ini biasanya muncul saat kecepatan putaran jauh lebih tinggi dari kecepatan gerak maju (*feed rate*).

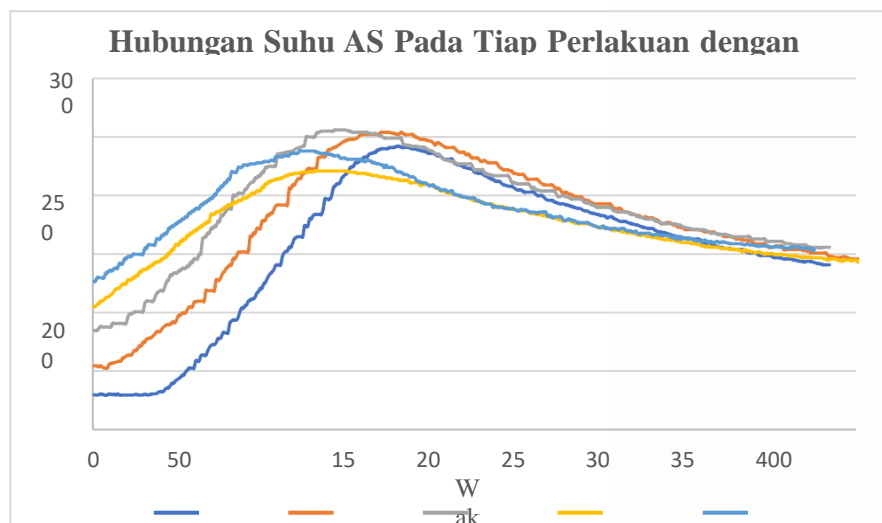


Gambar 2.1. Instalasi penelitian *Friction Stir Welding*

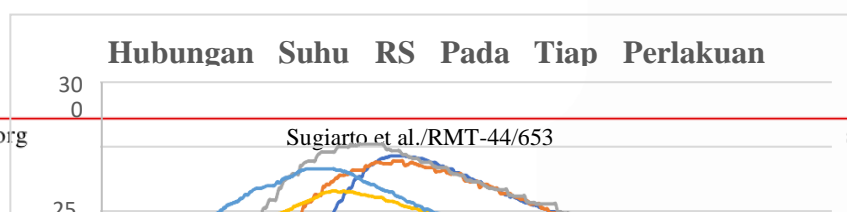
Keterangan:

1. Tool, terdiri dari pin dan shoulder
2. Plat pemanas
3. Termokopel untuk mengukur suhu *preheating*
4. dan 5. Termokopel tipe K
6. Benda Kerja Aluminium 6061
7. Milling table, sebagai dudukan benda kerja
8. Penjepit
9. *Shoulder*
10. Pin
11. Komputer, untuk merekam data suhu
12. SSR 40A, sistem dari *temperature controller*
13. Temperatur controller, untuk mengatur suhu *preheating*.
14. Data logger

3.1. Siklus Termal dan Suhu Puncak Las Pada *Advancing Side* dan *Retreating Side*

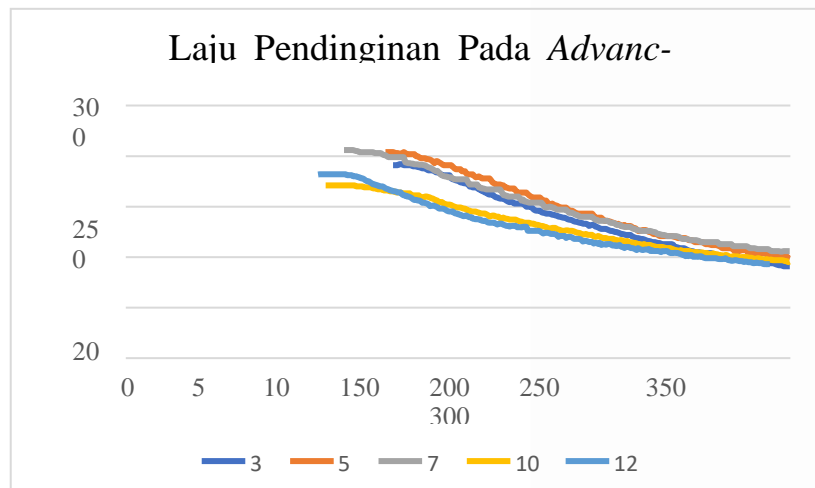


Gambar 3.1 Siklus termal pada *Advancing Side* dengan variasi suhu *preheating*

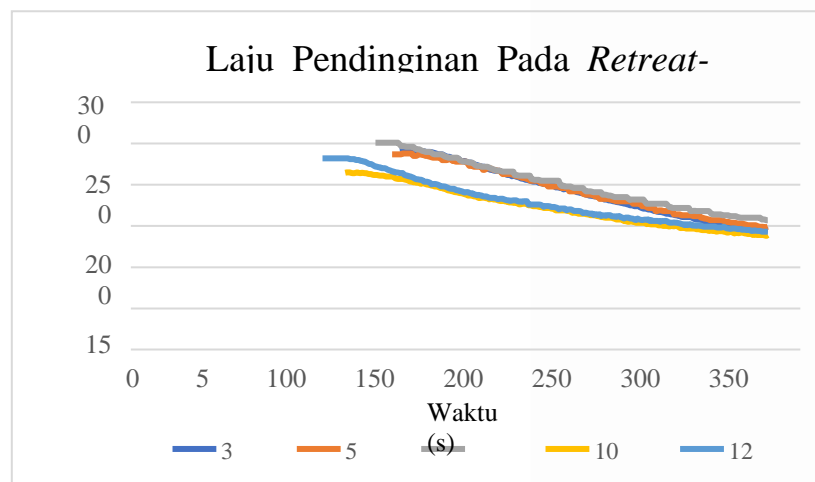


Gambar 3.2. Siklus termal pada *Retreating Side* dengan variasi suhu *preheating*

3.2. Laju Pendinginan Pada *Advancing Side* dan *Retreating Side*



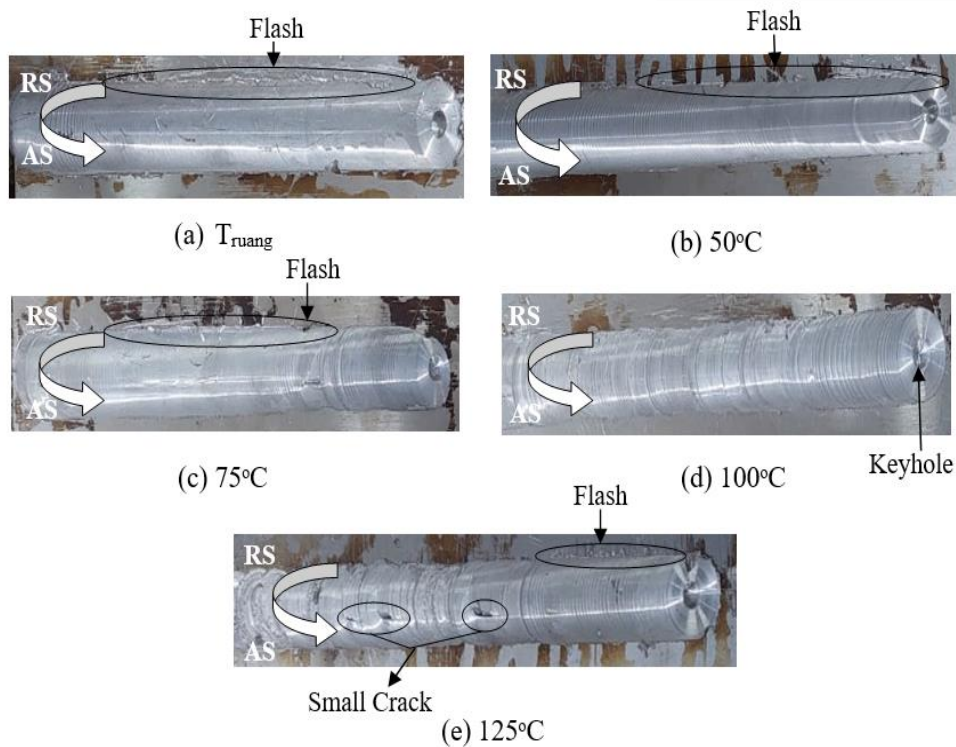
Gambar 3.3 Grafik laju pendinginan pada *Advancing Side*



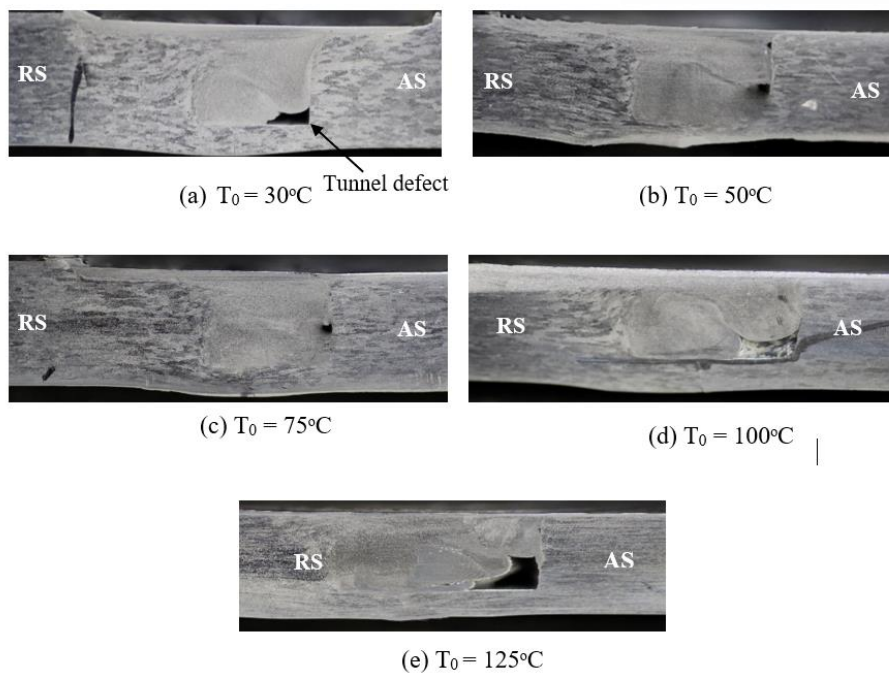
Gambar 3.3 Grafik laju pendinginan pada *Retreating Side*

Ketika benda kerja dalam kondisi panas yang berlebih maka akan terjadi pelunakan yang berlebih yang diikuti oleh deformasi berupa material yang keluar zona las dalam bentuk *flash* sebagai akibat dari tekanan *shoulder*

yang tinggi [15]. Pada suhu preheating 125°C terdapat beberapa retakan kecil pada sebagian sambungan las. Retakan ini terbentuk karena panas yang berlebihan selama proses pengelasan.



Gambar 3.4 Morfologi permukaan lasan dilihat dari penampang atas



Gambar 3.5 Morfologi penampang melintang sambungan FSW pada variasi suhu preheating

Daerah sambungan *Friction Stir Welding* (FSW) umumnya dibagi menjadi empat zona yaitu *Stir Zone* (SZ), *Thermomechanical Affected Zone* (TMAZ), *Heat Affected Zone* (HAZ) dan *Base Material* (BM). Gambar 3.5 menunjukkan morfologi penambang melintang daerah sambungan dari variasi suhu preheating. Dari semua variasi suhu preheating nampak adanya *tunnel defect* yang terjadi pada *advancing side*. Bahwa kebanyakan cacat terjadi pada *advancing side* karena distribusi suhu yang tidak merata kemudian terjadi pelunakan material yang berlebihan [15].

Cacat *tunnel* terjadi karena aliran material dan *heat input* yang tidak mencukupi dalam proses pengelasan sehingga aliran logam tidak mencukupi dan terjadi penyambungan yang tidak sempurna. Cacat *tunneling* umumnya muncul pada *Advancing Side* dibagian tengah dan bawah. Cacat ini juga terjadi dikarenakan pemilihan parameter proses pengelasan yang tidak tepat sehingga mengakibatkan aliran material yang tidak normal [8].

KESIMPULAN

Dari analisis dan pembahasan dapat disimpulkan bahwa, secara umum suhu pada AS lebih tinggi dibanding RS dan suhu puncak las tertinggi didapatkan pada *Advancing Side*. Semakin tinggi suhu *preheating* menyebabkan pencapaian suhu puncak semakin cepat dan laju pendinginan pasca pengelasan semakin turun. Suhu puncak las semakin meningkat dari T_{ruang} sampai $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ kemudian turun kembali pada suhu $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan $125\text{ }^{\circ}\text{C}$. Berdasarkan morfologi sambungan di tiap variasi suhu *preheating* terdapat *tunnel defect* pada *advancing side*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini dilaksanakan dan dibiayai melalui Kontrak Hibah Penelitian Doktor Lektor Kepala yang diselenggarakan oleh Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Tahun Anggaran 2023.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Biradar, N.S. 2012, Investigation of hot cracking behavior in transverse mechanically arc oscillated autogenous AA2014 T6 TIG welds. *Metall. Mater. Trans.* 43, 3179–3191
- [2] Chao, Yuh J. 2003. *Heat Transfer in Friction Stir Welding-Experimental and Numerical*

Studies. Columbia: University of South Carolina.

- [3] Cook, G.E., Crawford, R., Clark, D.E., Strauss, A.M., 2002, Robotic friction stir welding, *Industrial Robot: An International Journal*, 31(1), pp. 55-63.
- [4] E.Ravikumar, N.Arunkumar, and Sunnapu Gunhie Samhit, 2013, Characterization of Mechanical Properties of Aluminum (AA6061-T6) By Friction Welding, rd International Conference on Mechanical, Automotive and Materials Engineering (IC-MAME'2013), pp. 127-131
- [5] Ericsson, M.; Sandström, R., 2003, Influence of welding speed on the fatigue of friction stir welds, and comparison with MIG and TIG. *Int. J. Fatigue*, 25, 1379–1387
- [6] Fratini, L.; Buffa, G.; Shivpuri, R., 2009, In-process heat treatments to improve FS-welded butt joints. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 43, 664–670.
- [7] Gharavi, F.; Matori, K.A.; Yunus, R.; Othman, N.K.; Fadaeifard, F, 2016, Corrosion Evaluation of Friction Stir Welded Lap Joints of AA6061-T6 Aluminum Alloy. *Trans. Nonferr. Metals Soc. Chin.*, 26, 672–681.
- [8] Haitao Luo, Tingke Wu, Peng Wang, Fengqun Zhao, Haonan Wang and Yuxin Li, 2019, Numerical Simulation of Material Flow and Analysis of Welding Characteristics in Friction Stir Welding Process *Metals*, 9, 621; doi:10.3390/met9060621.
- [9] Hamilton Carter, Mateusz Kopys´Cian´ Ski, Oleg Senkov, And Stanislaw Dymek, 2013, A Coupled Thermal/Material Flow Model of Friction Stir Welding Applied to Sc-Modified Aluminum Alloys, *Metallurgical And Materials Transactions A Journals*, Vol. 44A, pp. 1730-1740, DOI: 10.1007/s11661-012-1512-y
- [10] Hassan, K.A.A.; Prangnell, P.B.; Norman, A.F.; Price, D.A.; Williams, S.W., 2003, Effect of welding parameters on nugget zone microstructure and properties in high strength aluminium alloy friction stir welds. *Sci. Technol. Weld. Join.*, 8, 257–268.
- [11] Hazman Seli, Ahmad Izani Md. Ismail, Endri Rachman, Zainal Arifin Ahmadd, 2010, Mechanical evaluation and thermal modeling of friction welding of mild steel and aluminium, *Journal of Materials Processing*

- Technology Vol. 210, pp.1209-1216.
- [12] K Reddi Prasad, V G Sridhar, 2017, Experimental Investigation On Mechanical Characterization Of Aa6061-T6 Pipe Joints By Continuous Drive Friction Welding, International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET), Vol. 8, Issue 9, pp. 264–273
- [13] Mishra, R.S. 2005. *Friction Stir Welding and Processing*. China: University of Missouri Rolla.
- [14] N. Rajamanickan et al. 2016. *Effect of Process Parameters on Thermal History and Mechanical Properties of Friction Stir Welds*. India: Department of Mechanical Engineering PSG College of Technology.
- [15] Narges Dialami, Miguel Cervera, Michele Chiumenti, 2020, Defect formation and material flow in Friction Stir Welding. European Journal of Mechanics / A Solids
- [16] Peng, G.; Ma, Y.; Hu, J.; Jiang, W.; Huan, Y.; Chen, Z.; Zhang, T., 2018, Nanoindentation Hardness Distribution and Strain Field and Fracture Evolution in Dissimilar Friction Stir-Welded AA
- [17] Sabari, S.S.; Malarvizhi, S.; Balasubramanian, V., 2016, Influences of tool traverse speed on tensile properties of air cooled and water cooled friction stir welded AA2519-T87 aluminium alloy joints. J. Mater. Process. Technol., 237, 286–300.
- [18] Sugiarto, M.S. Ma'arif, Djarot B. Darmadi, M. Ikram Kido, 2021, Characteristic of friction welding weld joint of AA6061 on elevated environmental temperature, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, Vol. 1034 No.1 012178, doi:10.1088/1757-899X/1034/1/012178.
- [19] Sushant Sukumar Bhate and S. G. Bhatwadekar, 2016, A Literature Review Of Research On Rotary Friction Welding, International Journal Of Innovative Technology And Research (IJITR), Vol. 4, Issue No.1, pp. 2601 – 2604.
- [20] Terry, 2005. Friction Stir Welding. Cambridge: University of Cambridge
- [21] W. Tang. 1998. Heat Input and Temperature Distribution in Friction Stir Welding. *Article in Journal of Materials Processing and Manufacturing Science*. 10 (I): 1-6.
- [22] Wiryosumarto, Harsono dan Okumura, Toshie. 2004. *Teknologi Pengelasan Logam*. Jakarta : Pradnya Paramita .