



SIMULASI DISTRIBUSI TEMPERATUR, *EQUIVALENT VON MISSES* DAN *HEAT FLUX* PADA *PINLESS FRICTION WELDING*

Pradhana Kurniawan^{a*}, Agus Iswantoko^a, Febrian Dakriso Pa Lado^a, Hariyanto Dwi Prasetyo^a

^aProgram Studi Teknik Mesin, Jurusan Teknik Mesin, Universitas Merdeka Malang, Jalan Terusan Dieng No. 62-64 Klojen, Pisang Candi, Malang, Jawa Timur 65146, Indonesia

*Corresponding authors at: pradhana.kurniawan@unmer.ac.id (P. Kurniawan) Telp.: + 62857-3673-0919

INFO ARTIKEL

Riwayat artikel:

Diajukan pada 11 Januari 2024

Direvisi pada 05 Februari 2024

Disetujui pada 16 Februari 2024

Tersedia daring pada 02 Maret 2024

Kata kunci:

Temperatur, heat flux, pinless friction welding

Keywords:

Temperature, heat flux, pinless friction welding

ABSTRAK

Metode mengilangkan pin pada *friction stir welding* dapat meminimalisir terjadinya cacat las. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis simulasi distribusi temperatur dan *Heat Flux* pada *friction stir welding* dengan material Ti-6Al-4V. Proses simulasi terdiri dari *preprocessing*, *processing* dan *post processing*. *Preprocessing* diawali dengan desain sambungan plat Ti-6Al-4V dan geometri pahat menggunakan *space claim* pada *software* ANSYS. Plat memiliki dimensi 76,20 mm x 31,75 mm dan *tool* memiliki diameter 15,24 mm. Proses selanjutnya adalah input *engineering data* dimana material yang digunakan adalah TI-6Al-4V dan untuk pahat adalah AISI H13. *Meshing* menggunakan metode *multizone* pada pahat dan pada benda kerja menggunakan metode *sweep* dengan *number of divisions* 44. *Boundary condition* terdiri dari *displacement*, *remote displacement*, *plastic heating* dan *convection*. *Displacement* digunakan dalam menentukan posisi tumpuan dari benda kerja sedangkan *remote displacement* digunakan pada arah putaran pahat. Putaran pahat menggunakan 300 rpm. Hasil simulasi teperatur menunjukkan bahwa temperature global mengalami kenaikan dari 25°C ke 1052°C. Kenaikan ini diikuti dengan penambahan waktu pengelasan. Temperatur minimum yang dihasilkan adalah 19,8°C pada range waktu 1 – 2 second. Heat flux yang dihasilkan sebesar 3,8 W/mm². Kenaikan temperature disebabkan adanya gesekan antara tool dan benda kerja, selain itu juga adanya regangan plastis. Temperatur yang naik menyebabkan pelunakan material sehingga nilai stress akan semakin turun

ABSTRACT

By removing pins from the *friction welding* process, it is possible to reduce the number of faults that arise during the welding process. The purpose of this study is to investigate the modelling of temperature distribution and heat flux in *friction stir welding* with Ti-6Al-4V material. *Preprocessing*, *processing*, and *postprocessing* are the three step processes that make up the simulation process. The design of the Ti-6Al-4V plate connection and tool geometry is made using *space claims* in the ANSYS programme. This is the first step in the *preprocessing* process. The diameter of the tool is 15.24 millimetres, and the measurements of the plate are 76.20 millimetres by 31.75 millimetres. TI-6Al-4V is the material that is used for the chisel, and AISI H13 is the material that is used for the next procedure, which is *engineering data* input. In the process of *meshing*, the *multizone* method is utilised on the chisel, and the *sweep* method is utilised on the workpiece, with a total of 44 divisions. Conditions that are considered to be boundary conditions include *convection*, *plastic heating*, *remote displacement*, and *displacement*. It is possible to identify the support position of the workpiece by using *displacement*, whereas *remote displacement* is utilised to determine the direction in which the tool is rotating. The rotation of the chisel utilises 300 revolutions per minute. According to the findings of the temperature simulation, the average temperature of the entire planet has risen from 25 degrees Celsius to 1052 degrees Celsius. After this increase, there was a subsequent longer period of time spent welding. Within the time span of one to two seconds, the minimum temperature that was reached was 19.8 degrees Celsius. There is a heat flux of 3.8 W/mm² that is created.

1. PENGANTAR

Ti-6Al-4V merupakan jenis paduan titanium yang paling sering digunakan pada industry manufaktur khususnya pada bidang penerbangan (Froes, 2001; Gangwar & Ramulu, 2017). Industri bidang penerbangan menggunakan Ti-6Al-4V karena memiliki keunggulan diantaranya ringan, memiliki kekuatan yang tinggi, tahan korosif, tahan pada temperature yang tinggi dan tidak memiliki elemen toksik yang dapat menurunkan sifat mekanis (Gaddam dkk., 2013). Keunggulan tersebut menjadi sejalan dengan tuntutan pengembangan komponen penerbangan karena membuat lebih ringan, memberikan improvement pada aerodinamis dan meghemat penggunaan bahan bakar (Nyamekye dkk., 2023; Pasang dkk., 2023).

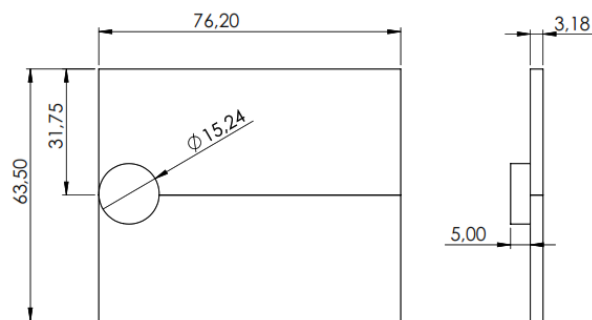
Proses penyambungan *body* pesawat sebagian besar sangat bergantung pada teknik pengelasan Fusi (Park, t.t.). Pengelasan fusi yang diterapkan pada paduan yang memiliki karakteristik temperatur tinggi seperti titanium akan berdampak kerentanan terhadap terjadinya cacat (Prangnell dkk., 2011). Cacat yang ditimbulkan pada pengelasan Fusi akan menurunkan kekuatan dari sambungan (Gangwar & Ramulu, 2017). *Friction stir spot welding* merupakan metode terbaru dalam proses penyambungan plat dengan menggunakan *solid state* (Thomas dkk., 2002). *Solid state* memiliki kelebihan dibandingkan FSE karena proses pengelasan menjadi lebih mudah dan menghasilkan pengelasan yang cukup baik (Bakavos dkk., 2011). Penelitian terkait p-FSSW menjadi menarik dengan melepaskan pin pada *tool* (*pinless*) akan menghasilkan produk pengelasan dengan menimalisir terjadinya cacat seperti *keyhole* dan *hooking* (Badarinarayan dkk., 2009). Secara luas aplikasi p-FSSW sudah diterapkan pada paduan structural ringan seperti Al dan Mg, namun pada paduan yang memiliki ketahanan pada Temperatur tinggi masih terbatas untuk diteliti (Begum dkk., 2009; Zhang dkk., 2011). Terbatasnya penelitian Ti-6Al-4V karena pemilihan *tool* yang digunakan harus memiliki kekuatan yang tinggi dan sifat refraktori. Selain itu penelitian dengan pemodelan *Finite Element Method* pada P-FSSW Ti-6Al-4V masih terbatas pada variasi kecepatan putaran, *plunge depth* dan *plunge rate*.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis *equivalent von misses*, temperatur dan *heat flux* pada Ti-6Al-4V menggunakan geometri *flat tool* pada pengelasan P-FSSW. *Tool* menggunakan putaran 330 rpm dengan material H13. Temperatur transien dan tegangan sisa dengan dan tanpa pelepasan perlengkapan pada benda kerja selanjutnya ditentukan secara numerik. Hasil metode simulasi kemudian dijadikan referensi untuk metode eksperimen dan hasilnya akan dibandingkan

2. METODE

2.1 Desain

Preprocessing dimulai dengan mendesain geometri specimen Ti-6Al-4V dan geometri *Tool* menggunakan design modeler ANSYS 2021 R1. Dimensi dari *specimen* memiliki panjang 76,2 mm, lebar 31,75, dan tebal 3,18 (Gambar 1). *Tool* menggunakan jenis *pinless flat tool* dengan diameter 15,24 mm dan panjang 5 mm (Zhu & Chao, 2004).



Gambar 1: Dimensi spesimen dan *tool*

2.2 Material

Material yang diinput pada engineering data adalah Ti-6Al-4V (Spesimen) dan AISI H13 (*Tool*). Nilai *coefficient of thermal expansion* pada Ti-6Al-4V dapat dilihat pada Tabel 1. Sifat mekanis pada *tool* meliputi *density* hingga *specific heat constant pressure* dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 1 : Coefficient of Thermal Expansion

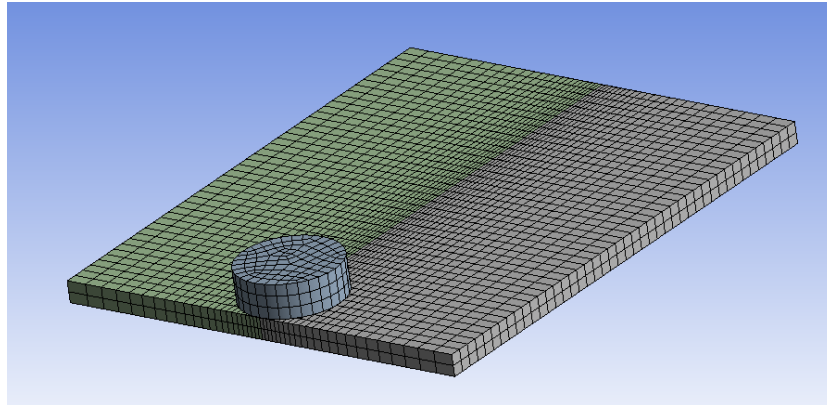
No	Temperatur (°C)	Coefficient of Thermal Expansion (1/C ¹)
1	-233,15	6,5 x 10 ⁻⁶
2	-173,15	7,1 x 10 ⁻⁶
3	19,85	8,9 x 10 ⁻⁶
4	126,85	9,7 x 10 ⁻⁶
5	326,85	1,08 x 10 ⁻⁵
6	526,85	1,14 x 10 ⁻⁵
7	626,86	1,16 x 10 ⁻⁵
8	826,86	1,16 x 10 ⁻⁵

Tabel 2 : Sifat Mekanis Aisi H13

No	Jenis Sifat Mekanis	Nilai
1	<i>Density</i>	280 (Kg / m ³)
2	<i>Young Modulus</i>	6,8 x 10 ¹¹ (Pa)
3	<i>Poisson's Ratio</i>	0,22
4	<i>Bulk Modulus</i>	4,0476 x 10 ¹¹ (Pa)
5	<i>Shear Modulus</i>	2,7869 x 10 ¹¹ (Pa)
6	<i>Isotropic Thermal Conductivity</i>	100 (W/m ¹ C ¹)
7	<i>Specific Heat Constant Pressure</i>	750 (J/Kg ⁻¹ C ⁻¹)

2.3 Meshing

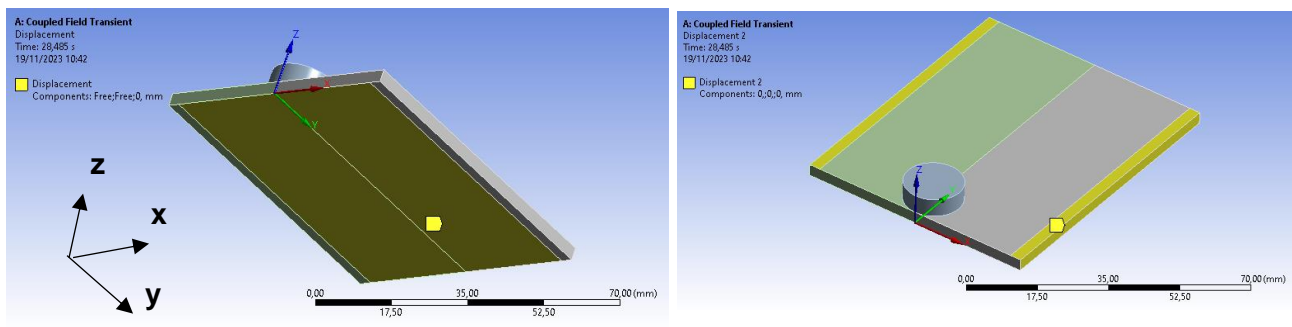
Meshing bertujuan untuk membagi part menjadi elemen kecil. *Part tool* menggunakan metode *meshing* multizone. *Edge sizing* pada *tool* menggunakan type *Number of Division* dengan jumlah total 32. *Meshing* pada bagian plat Ti-6Al-4V pada bagian ujung plat menggunakan *edge sizing* dengan number of division 22, sedangkan pada *body* menggunakan *meshing* dengan metode *sweep* dengan jumlah *sweep number of divisions* 44. Total nodes yang dihasilkan 6936 dan elements 4339.



Gambar 2: Hasil *meshing*

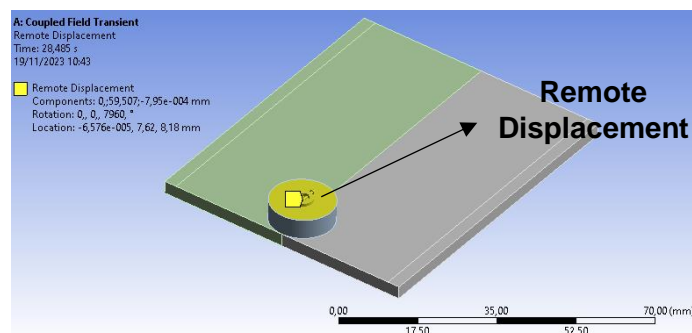
2.4 Boundary Condition

Boundary condition meliputi *plastic heating*, *displacement*, *remote displacement* dan *convection*. *Plastic heating* diposisikan pada bagian plat Ti-6Al-4V dengan nilai *plastic work fraction* sebesar 0,8. *Displacement* terdiri dari dua bagian yaitu permukaan bawah plat dan permukaan samping plat. Permukaan bawah plat pada pergerakan sumbu x dan y adalah *free* sedangkan pada sumbu z adalah nol. *Displacement* pada bagian samping berfungsi sebagai tumpuan *fixed support* dimana pergerakan pada sumbu x, y dan z adalah 0 mm



Gambar 3: Posisi *displacement*

Tool diposisikan sebagai *remote displacement* dimana pergerakan sumbu x adalah nol, sumbu y akan bergerak pada step 29 s sejauh 60,9 mm, dan sumbu z akan bergerak ke bawah melakukan pemakanan pada benda kerja sejauh $7,95 \times 10^{-4}$ mm. Rotasi *tool* pada sumbu x, y adalah nol dan rotasi pada sumbu z adalah sebesar 8100° (1330 rpm).



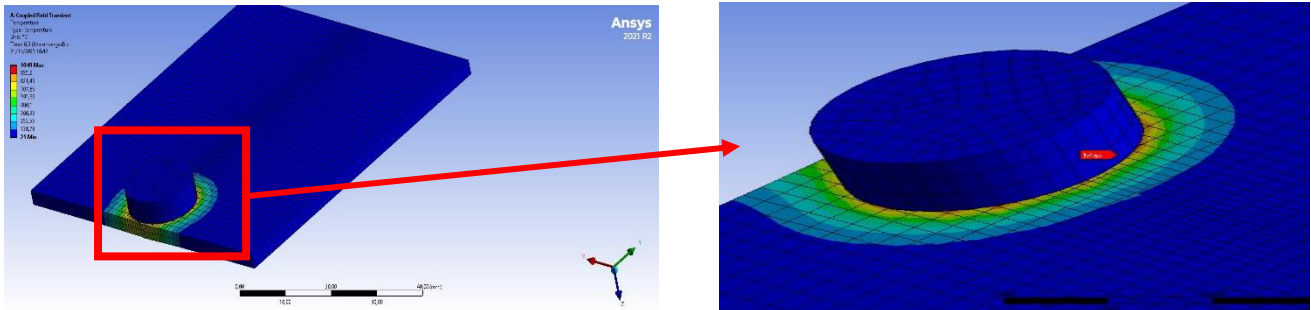
Gambar 4: Posisi *Remote displacement*

Convection pada *tool* dan plat Ti-6Al-4V memiliki nilai koefisien sebesar 3×10^{-11} W/mm² °C sedangkan pada permukaan bawah memiliki nilai 3×10^{-11} W/mm² °C.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

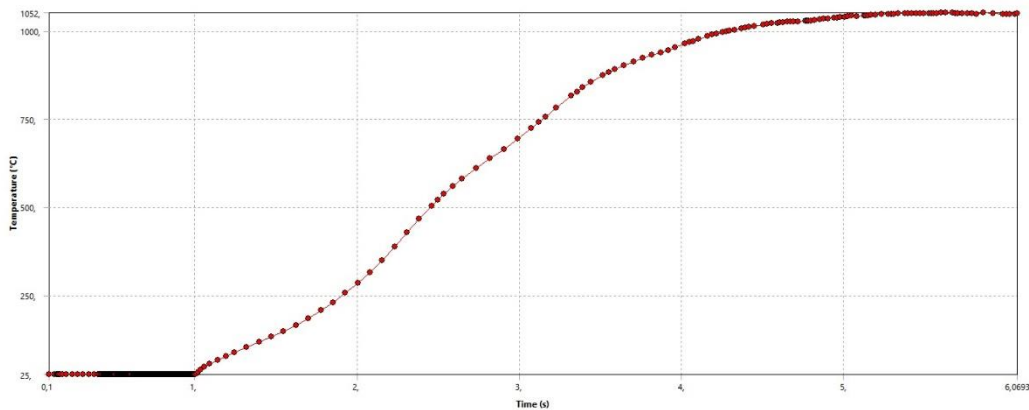
3.1 Distribusi Temperatur

Distribusi temperature dihasilkan pada Gambar 5, Gambar 6 dan Gambar 7. Temperatur tertinggi dihasilkan disekitar *tool pinless* karena terjadi gesekan antara *tool* dan plat Ti-6Al-4V. Temperatur puncak yang dihasilkan sebesar 1049°C dengan kecepatan putar 1350 rpm dan *plunge depth* $7,95 \times 10^{-4}$ mm. Kecepatan putar dan *plunge depth* menjadi parameter penting untuk menghasilkan parameter pengelasan yang optimal (Shobri dkk., 2021). Pengelasan yang optimal dihasilkan oleh masukan panas yang cukup untuk melunakan daerah disekitar pengelasan dan menghasilkan bahan Ti-6Al-4V menjadi plastis (Fujimoto dkk., 2005).

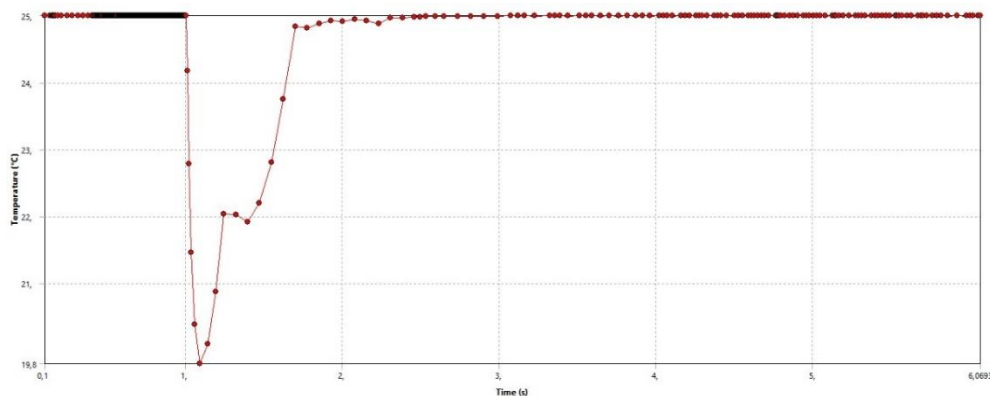


Gambar 5. Hasil temperatur

Grafik temperature maksimum dan minimum terhadap waktu dapat dilihat pada Gambar 7



Gambar 6. Temperatur global maksimum

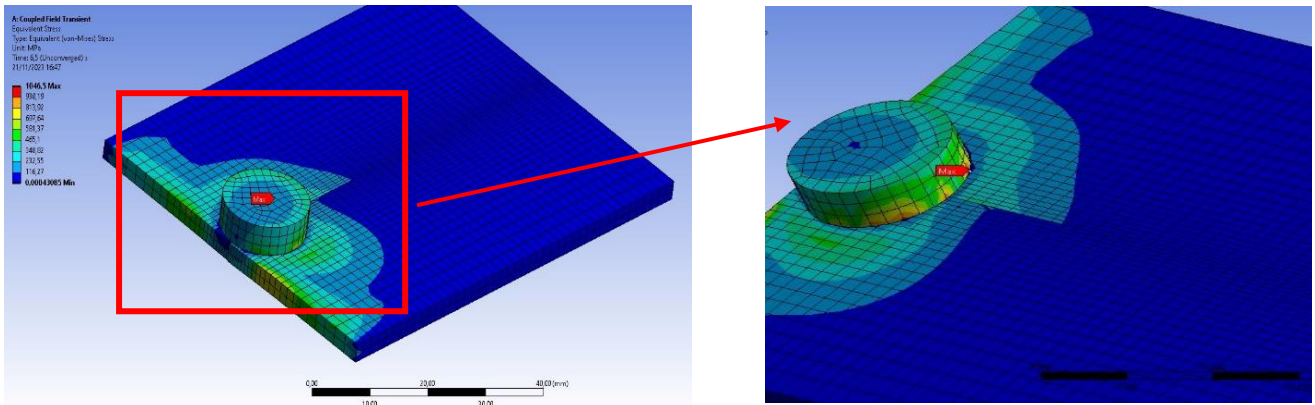


Gambar 7. Temperatur global minimum

Kenaikan temperatur dimulai dari waktu 1 – 6 second, setelah itu konstan pada temperature 1052°C. Kenaikan Temperatur disebabkan oleh panas yang dihasilkan dari gesekan dan regangan plastis. Gesekan akan mengakibatkan hilangnya energi sebesar hampir 92%. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa peningkatan Temperatur pada benda kerja akan linier dengan kecepatan putaran *tool*. Berdasarkan Gambar 6 dan 7 bahwa kenaikan temperature dihasilkan pada proses *plunge period* dimana pertama *tool* bersentuhan benda kerja secara langsung. Hal ini disebabkan karena *tool* menghasilkan hampir 86% panas dari gesekan. Pada akhir period temperature menjadi konstan dan menurun pada temperature yang lebih rendah.

3.2 Equivalent Von Misses

Hasil equivalent von misses dapat dilihat pada Gambar 8. Nilai yang dihasilkan adalah sebesar 1046,5 MPa. Nilai stres mulai tetap menjelang akhir *plunge period* dan inisiasi *dwell period* (Baruah dkk., 2022). *Plunge period* merupakan tahapan awal dimana *tool* yang berputar berada tepat diatas permukaan benda kerja, sedangkan *dwell period* adalah tahap dimana kedalaman dari *tool* sudah melewati pada kondisi yang diinginkan (Veljic dkk., 2013).

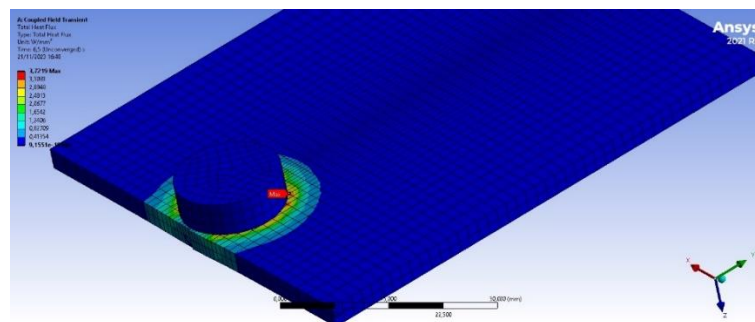


Gambar 8: Hasil Equivalent Von Misses

Nilai stres semakin menurun pada bagian tertentu selama *dwell period* hal ini disebabkan karena pelunakan material lokal akibat Temperatur yang lebih tinggi di daerah pengelasan P-FSSW (Salloomi dkk., 2020). Bertambahnya kedalaman *plunge* berpengaruh terhadap peningkatan nilai *stress*. *Stress* yang tinggi dihasilkan ketika pada awal proses pengelasan karena terjadi kontak bahu antara *tool* dan benda kerja (*plunge period*) (Baruah dkk., 2022). Menjelang akhir *plunge period* distribusi *stress* menjadi melebar pada daerah potongan benda kerja dan melampaui dari *tool*. Nilai *stress* kemudian semakin menurun dengan bertambahnya waktu karena pelunakan local pada material Ti-6Al-4V (Pradhana dkk., 2021).

3.3 Heat Flux

Hasil simulasi *heat flux* dan *directional* dapat dilihat pada Gambar 9 d. Hasil simulasi *heat flux* sebesar $3,8 \text{ W/mm}^2$. Kondisi tersebut sejalan dengan peningkatan temperatur dimana hampir 50% total energi mekanik mesin FSW diubah menjadi peningkatan temperatur benda kerja selama FSW (Zhu & Chao, 2004). Energi 50% lainnya dapat hilang dalam (a) deformasi plastis yang besar pada material las, strip perlengkapan yang dijepit, dan pelat pendukung, dan (b) panas yang ditransfer ke pahat dan kepala mesin. Perhatikan bahwa persentase energi mekanik yang ditransfer ke pemanasan benda kerja kurang dari nilai 75–80% (Chao dkk., 2003).



Gambar 9: Heat flux

4. KESIMPULAN

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis equivalent von misses, temperature dan heat flux pada pengelasan P-FSSW Ti-6Al-4V. Hasil equivalent von misses tertinggi sebesar 1046,5 MPa dimana nilai tersebut dihasilkan pada proses *plunge period* karena adanya kontak bahu pertama antara *tool* dengan benda kerja Ti-6Al-4V. Nilai stres semakin menurun pada *dwell period*. Hasil simulasi temperatur sebesar 1049°C , kenaikan Temperatur disebabkan oleh panas yang dihasilkan dari gesekan dan regangan plastis. Kecepatan putar dan *plunge depth* menjadi parameter penting untuk menghasilkan parameter P-FSSW yang optimal. Hasil simulasi total heat flux adalah sebesar 3 W/mm^2 yang sejalan dengan peningkatan distribusi dari temperature dan hampir 50% total energi mekanik mesin P-FSW diubah menjadi peningkatan temperatur benda kerja selama P-FSW.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis pada kesempatan ini mengucapkan terimakasih pada LPPM Universitas Merdeka Malang yang telah mendanai penelitian simulasi P-FSSW. Terimakasih kepada Laboratorium Simulation dan Modelling Teknik Mesin Universitas Negeri Malang dan Universitas Merdeka Malang yang telah membantu penulis dalam penyelesaian naskah jurnal ini.

DAFTAR PUSTAKA

Attah, B., Lawal, S., Akinlabi, E., & Bala, K. (2021). Evaluation of mechanical properties of dissimilar aluminium alloys during friction stir welding using tapered tool. *Cogent Engineering*, 8, 1909520.

- Badarinarayan, H., Yang, Q., & Zhu, S. (2009). Effect of tool geometry on static strength of friction stir spot-welded aluminum alloy. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49(2), 142–148.
- Bakavos, D., Chen, Y., Babout, L., & Prangnell, P. (2011). Material Interactions in a Novel Pinless Tool Approach to Friction Stir Spot Welding Thin Aluminum Sheet. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 42(5), 1266–1282.
- Baruah, A., Murugesan, J., & Borkar, H. (2022). Numerical Simulation of Friction Stir Spot Welding of Aluminium-6061 and Magnesium AZ-31B. *Materials Science Forum*, 1048, 241–253.
- Begum, S., Chen, D., Xu, S., & Luo, A. (2009). Effect of strain ratio and strain rate on low cycle fatigue behavior of AZ31 wrought magnesium alloy. *Materials Science and Engineering A-structural Materials Properties Microstructure and Processing - MATER SCI ENG A-STRUCT MATER*, 517, 334–343.
- Chao, Y., Qi, X., & Tang, W. (2003). Heat Transfer in Friction Stir Welding—Experimental and Numerical Studies. *Journal of Manufacturing Science and Engineering-transactions of The Asme - J MANUF SCI ENG*, 125.
- Froes, F. H. (2001). Titanium Alloys: Properties and Applications. Dalam K. H. J. Buschow, R. W. Cahn, M. C. Flemings, B. Ilshner, E. J. Kramer, S. Mahajan, & P. Veyssière (Ed.), *Encyclopedia of Materials: Science and Technology* (hlm. 9367–9369). Elsevier.
- Fujimoto, M., Inuzuka, M., Koga, S., & Seta, Y. (2005). Development of Friction Spot Joining. *Welding in the World*, 49(3), 18–21.
- Gabriel J. DeSalvo & John A. Swanson. (1985). ANSYS Engineering Analysis System User's Manual. *Swanson Analysis Systems*.
- Gaddam, R., Sefer, B., Pederson, R., & Antti, M.-L. (2013). Study of alpha-case depth in Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo and Ti-6Al-4V. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 48, 012002.
- Gangwar, K., & Ramulu, M. (2017). Friction stir welding of titanium alloys: A review. *Materials & Design*, 141.
- Nyamekye, P., Rahimpour Golroudbary, S., Pili, H., Luukka, P., & Kraslawski, A. (2023). Impact of additive manufacturing on titanium supply chain: Case of titanium alloys in automotive and aerospace industries. *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*, 6, 100112.
- Park, H. (t.t.). Pinless Friction Stir Spot Welding of Ti-6Al-4V Alloy for Aerospace Application. *Doctoral Dissertations University of Tennessee*.
- Pasang, T., Budiman, A. S., Wang, J. C., Jiang, C. P., Boyer, R., Williams, J., & Misiolek, W. Z. (2023). Additive manufacturing of titanium alloys – Enabling re-manufacturing of aerospace and biomedical components. *Microelectronic Engineering*, 270, 111935.
- Pradhana, Andoko, A., & Sunu, P. W. (2021). Leaf spring type simulation with finite element method approach. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1034(1), 012015.
- Prangnell, P., Haddadi, F., & Chen, Y. (2011). Ultrasonic spot welding of aluminium to steel for automotive applications—Microstructure and optimisation. *Materials Science and Technology*, 27, 617–624.
- Salloomi, K. N., Hussein, F. I., & Al-Sumaidae, S. N. M. (2020). Temperature and Stress Evaluation during Three Different Phases of Friction Stir Welding of AA 7075-T651 Alloy. *Modelling and Simulation in Engineering*, 2020, e3197813.
- Shobri, N. N. S. M., Pedapati, S. R., & Awang, M. (2021). Simulation of Friction Stir Spot Welding of Copper and Aluminium During Plunging Phase. *Journal of Physics: Conference Series*, 2129(1), 012002.
- Thomas, W., Dolby, R. E., & Twi. (2002). Friction Stir Welding Developments. Dalam *ASM Proceedings of the International Conference: Trends in Welding Research*.
- Veljic, D., Rakin, M., Perović, M., Medjo, B., Radakovic, Z., Todorovic, P., & Pavišić, M. (2013). Heat generation during plunge stage in friction stir welding. *Thermal Science*, 17, 489–496.
- Zhang, Z., Yang, X., Zhang, J., Zhou, G., Xu, X., & Zou, B. (2011). Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir spot welded 5052 aluminum alloy. *Materials & Design*, 32(8), 4461–4470.
- Zhu, X. K., & Chao, Y. J. (2004). Numerical simulation of transient temperature and residual stresses in friction stir welding of 304L stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 146(2), 263–272.