

SIMULASI FSW MENGGUNAKAN MODEL *MOVING HEAT SOURCE* DENGAN SUMBER PANAS *SURFACE HEAT FLUX*

**ARTIKEL ILMIAH
TEKNIK MESIN KONSENTRASI KONSTRUKSI**

**Ditulis Untuk Memenuhi Persyaratan
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik**



Disusun Oleh :

FATHI ROBBANY

NIM. 125060200111033

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

MALANG

2017

SIMULASI FSW MENGGUNAKAN MODEL *MOVING HEAT SOURCE* DENGAN SUMBER PANAS *SURFACE HEAT FLUX*

ARTIKEL ILMIAH

TEKNIK MESIN KONSENTRASI KONSTRUKSI

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



FATHI ROBBANY
NIM 125060200111033 - 62

Skripsi ini telah direvisi serta disetujui oleh dosen pembimbing
pada tanggal 27 Januari 2017

DOSEN PEMBIMBING I

DOSEN PEMBIMBING II

Ir. Djarot B. Darmadi, MT., Ph.D
NIP. 19670518 199412 1 001

Prof. Dr. Ir. Rudy Soenoko, M.Eng.Sc.
NIP 19490911 198403 1 001

Mengetahui
Ketua Program Studi

Dr.Eng. Widya Wijayanti, ST., MT.
NIP. 19750802 199903 2 002

SIMULASI FSW MENGGUNAKAN MODEL *MOVING HEAT SOURCE* DENGAN SUMBER PANAS *SURFACE HEAT FLUX*

Fathi Robbany¹, Djarot B. Darmadi², Rudy Soenoko²

^{1,2}Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Jalan MT. Haryono 167, Malang 65145, Indonesia
087754440727

E-mail: fathirobbany@gmail.com

Abstrak

. Aluminium merupakan material dengan kekuatan spesifik yang tinggi namun pada beberapa jenis aluminium seperti aluminium 2XXX dan 7XXX yang diklasifikasikan sebagai *non-weldable*, sangat sulit jika dilakukan penyambungan menggunakan fusi welding. Pada tahun 1991 *friction stir welding (FSW)* ditemukan oleh *The Welding Institute (TWI)*, FSW merupakan solusi yang tepat untuk pengelasan aluminium karena hasil las-an FSW memiliki kekuatan yang lebih dibanding dengan fusi welding. Penelitian dilakukan dengan metode simulasi hal ini dilakukan untuk menghindari biaya dari percobaan eksperimental, material yang digunakan adalah aluminium 6061 dan sumber panas berupa *heat flux* yang berjalan sesuai dengan kecepatan tool saat penelitian eksperimental. Untuk memastikan kebenaran dari model maka dilakukan validasi terhadap hasil data eksperimen. Hasil dari model memiliki error I (perbandingan luasan) rata-rata sebesar 4.12% dan untuk error II (perbandingan tiap titik) rata-rata sebesar 12.64%. Penulis beranggapan bahwa model sudah baik karena memiliki luasan yang hampir sama dengan data eksperimen hanya profil dari grafik yang sedikit berbeda. Setelah model telah di-validasi maka dapat dilakukan prediksi dari profil temperatur, temperatur tertinggi berada pada akhir proses pengelasan yaitu sebesar 486.843 °C sekitar 80-90% dari suhu melting aluminium 6061.

Kata Kunci: *Friction stir welding, validasi, profil temperatur, moving heat source, heat flux.*

Abstract

Aluminium is material with high specific strength, but some types of aluminium such as 2XXX and 7XXX are classified as *non-weldable*, its very difficult if using fusion welding. In 1991 *friction stir welding (FSW)* was invented at *The Welding Institute (TWI)*, FSW is the best solution for joining aluminium because welds have more strength than welding with fusion welding. The principle of FSW is heating of workpiece by friction between non-consumable tool and the workpiece, it will softens the material and it will be stirred by the pin. Simulation method was chosen because it will avoided the cost of the experiment trials, the material used is aluminium 6061 and a heat flux are moving in accordance with the speed of experiment research tool. Simulation results will be validated against experiment results to ensure the correctness of the model. The results of the model has an error I (area compared) which has an average by 4.12% and for error II (each point compared) which has average of 12.64%. The authors assume that the model is good because the results has the same area with experiment result just the profil of the model is slightly different. Once the model has been validated, we can predict the temperature profile, the highest temperature is at the end of the welding process which it value is 486.843 °C, its about 80-90% from the melting temperature of aluminium 6061.

Keywords: *Friction stir welding, validation, profile temperature, moving heat source, heat flux.*

PENDAHULUAN

Keberhasilan suatu rancangan konstruksi yang kuat dan ringan tidak terlepas dari kombinasi antara pemilihan material, desain, dan proses manufakturnya. Ketika material yang dipilih adalah aluminium, maka penyambungan adalah tantangan yang besar. Terutama aluminium 2XXX dan 7XXX yang diklasifikasikan sebagai *non-weldable*. [9] Pada proses *friction stir welding (FSW)* (Gambar 1), panas dihasilkan dari gesekan antara tool dan benda kerja. Benda kerja akan

menerima 95% dari panas total sedangkan tool akan menerima 5% dari panas total. Panas yang mengalir pada benda kerja akan menentukan kualitas dari las-an, *residual stress* dan distorsi, Sedangkan panas yang mengalir pada *tool* akan berpengaruh pada keawetan *tool*. [4]

Menurut Schmidt [10] total *heat generation* (Q) dapat diperoleh dari pengintegralan dari *local heat generation*(q) pada permukaan *tool*. *Local heat generation* sendiri dapat di hitung dengan persamaan :

$$q = \tau \omega r \quad (1)$$

Dengan :

q = Heat flux [Watt/m²]

$\tau = \mu P$ [Pa]

$\omega =$ Kecepatan sudut [rad/s]

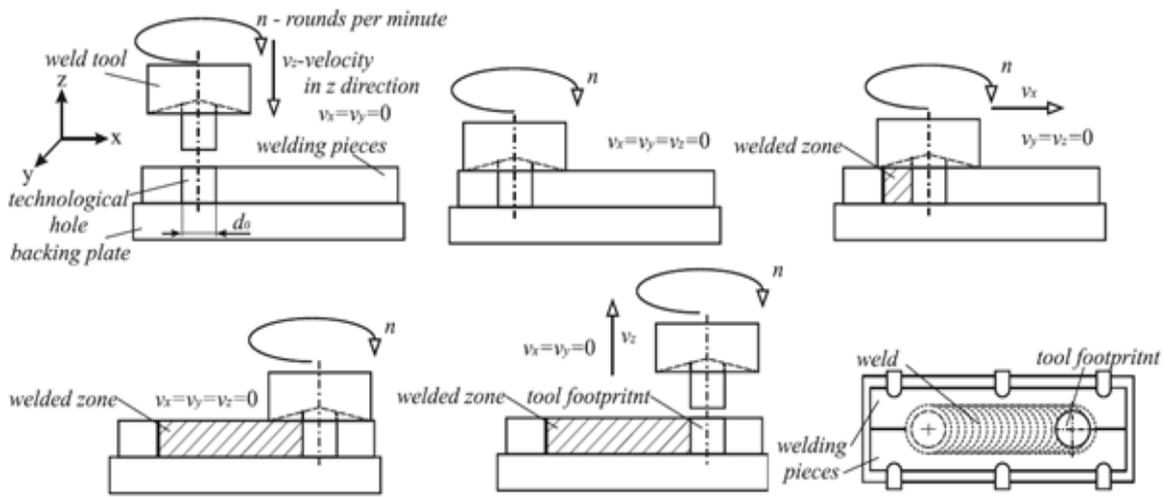
r = Jari-jari [m]

Dengan mengintegrasikan *local heat generation* pada Persamaan (1) pada *shoulder*, *pin side*, dan *pin tip* maka akan didapatkan persamaan kontribusi dari *shoulder*, *pin side* dan *pin tip*, sebagai berikut:

$$Q_{shoulder} = \frac{2}{3} \pi \omega \tau (R_{shoulder}^3 - R_{pin}^3) \quad (2)$$

$$Q_{probe\ side} = 2 \pi \omega \tau R_{pin}^2 H_{pin} \quad (3)$$

$$Q_{pin\ tip} = \frac{2}{3} \pi \omega \tau R_{pin}^3 \quad (4)$$



Gambar 1: Proses Pada *Friction Stir Welding*

Dengan :

Q = Energi per satuan waktu [Watt]

$\pi =$ phi, 3.14

$R_{shoulder}$ = Jari-jari *shoulder* [m]

R_{pin} = Jari-jari *pin* [m]

H_{pin} = Tinggi *pin* [m]

Penelitian bertujuan untuk mem-validasi model dengan hasil data eksperimen dengan material aluminium 6061, sehingga dapat diprediksi profil temperatur saat proses pengelasan berlangsung.

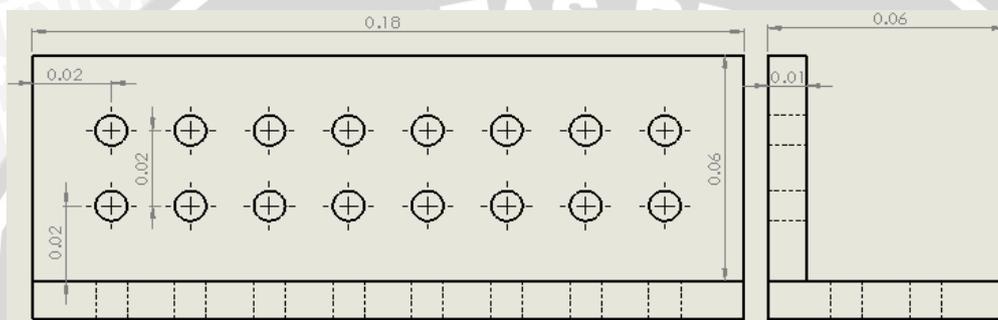
METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian menggunakan metode simulasi, dengan menggunakan software

NSYS Parametric Design Language (APDL) v14.5. Pemodelan diperlakukan sedemikian rupa sehingga menyerupai kondisi eksperimen, material yang digunakan adalah aluminium 6061 dengan properti seperti pada Tabel 1, terdapat 32 *thermocouple* yang diletakkan pada tempat yang berbeda, namun data yang dapat diolah hanya 20 data *thermocouple*, berikut dimensi benda kerja dan peletakkan tiap-tiap *thermocouple* dapat dilihat pada Gambar 2. Sedangkan untuk Variabel-variabel yang akan dimasukkan dalam simulasi adalah parameter-parameter yang didapatkan dari pengujian eksperimental. Variabel penelitian yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 1 : Properti Alumunium 6061

Temperature (°C)	Thermal conductivity (W/m °C)	Heat capacity (J/kg °C)	Density (kg/m ³)	Young's modulus (GPa)	Yield strength (MPa)	Thermal expansion (µm/ °C)	Poisson's ratio	Melting point (°C)
AISI A2 Steel	23.8	1096	7860	203		10.6	0.23	
Al alloy 6061-T6								
0	162	917	2703	69.7	277.7	22.4		
93.3	177	978	2685	66.2	264.6	24.61		
204.4	192	1028	2657	59.2	218.6	26.6	0.23	582-652
315.6	207	1078	2630	47.78	66.2	27.6		
427.7	223	1133	2602	31.72	17.9	29.6		
571.1	253	1230	2574	0	0	34.2		

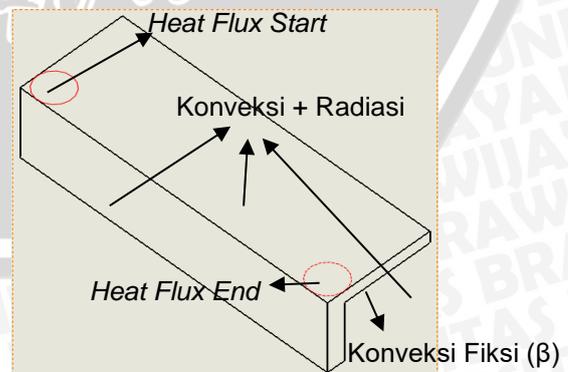


Gambar 2 : Dimensi Benda Kerja dan Penempatan Thermocouple

Tabel 2 : Variabel Penelitian

Nama	Besaran	Satuan	Nama	Besaran	Satuan
Shoulder Radius	10	mm	Kecepatan Sudut	209	rad/s
Pin Radius	2,5	mm	Gaya ke bawah (Fz)	1200	Newton
Tinggi Pin	10	mm	Temperatur Ruang	33	°C
Koefisien Gesek	0.3	•••	h _{bottom}	(Best Fit)	W/m ² .°C
Kecepatan Pengelasan	0.25	mm/s	h _{overall}	30	W/m ² .°C
Panas ke benda kerja	0.95	•••			

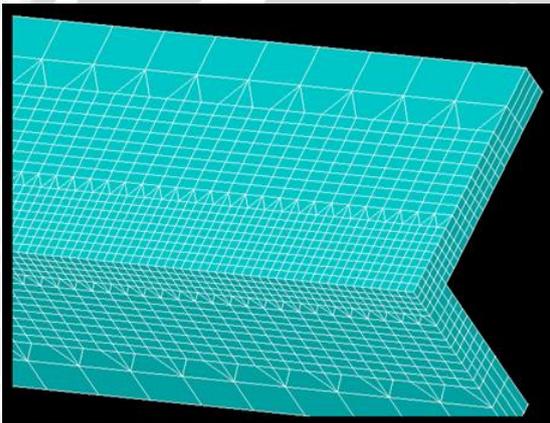
Konveksi fiksi (h_{bottom}) ditentukan dengan melakukan beberapa percobaan angka sehingga hasil simulasi mendekati hasil dari eksperimen, hal ini dilakukan karena sulitnya menentukan kontak konduktansi pada area bawah plat dengan *backing plate*-nya.[4] Gambar 3 merupakan *boundary condition* dari model. Heat flux berjalan dari awal kiri plat sampai ujung kanan plat, sedangkan untuk bentuk *heat flux* sendiri dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 3 : Boundary condition

Pemodelan menggunakan elemen Solid70 dengan 8 *node* yang berbentuk balok dan dilapisi dengan elemen Surf152 untuk pengaplikasian konveksi agar dapat berjalan bersamaan dengan pembebanan *heat flux* pada Solid70. Elemen Targe170 dan Conta173 ditempatkan pada sambungan las, elemen ini digunakan agar dapat melihat kontak status dari sambungan las. *Meshing* pada model dilakukan se-efisien mungkin, sehingga hasil simulasi akan mendekati data hasil dari percobaan eksperimen, tetapi waktu yang dibutuhkan untuk menyelesaikan simulasi se-minimal mungkin.

Pada daerah yang dekat dengan *heat source*, *mesh* dibuat kecil, lalu *mesh* membesar seiring bertambahnya jarak terhadap *heat source*. *Meshing* pada model dapat dilihat pada Gambar 5.



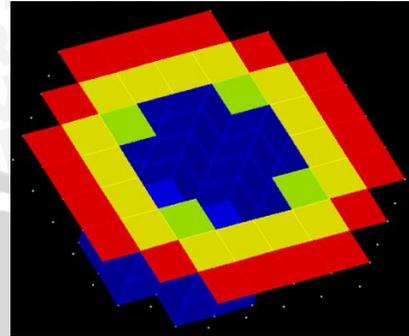
Gambar 5 : *Meshing*

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pembahasan Grafik Channel 7-16

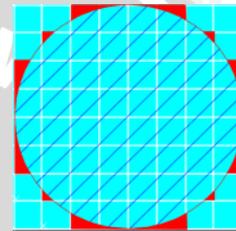
Dapat dilihat pada Gambar 7 dan Gambar 8 hasil dari simulasi sudah mendekati dari hasil eksperimen. Dapat dilihat pula bahwa hasil dari simulasi sedikit lebih besar dari pada hasil dari eksperimen, penulis berpendapat bahwa penyebab lebih tingginya hasil simulasi dikarenakan tiga penyebab.

Penyebab pertama karena terdapat *heat flux* yang lebih daripada yang seharusnya (Gambar 6) akibat dari proses *meshing*. Proses *meshing* tidak dapat dihindari di dalam FEM, tetapi dapat di minimalisir dengan memperhalus *meshing*.



Gambar 4 : Heat Flux Model

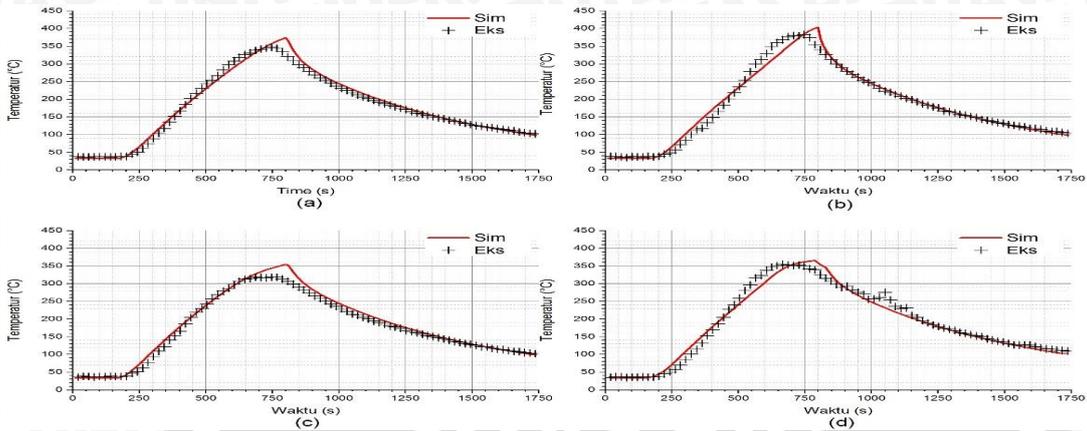
1. Arsir warna biru = *Heat flux* nyata
2. Luasan warna merah = *Heat flux* error



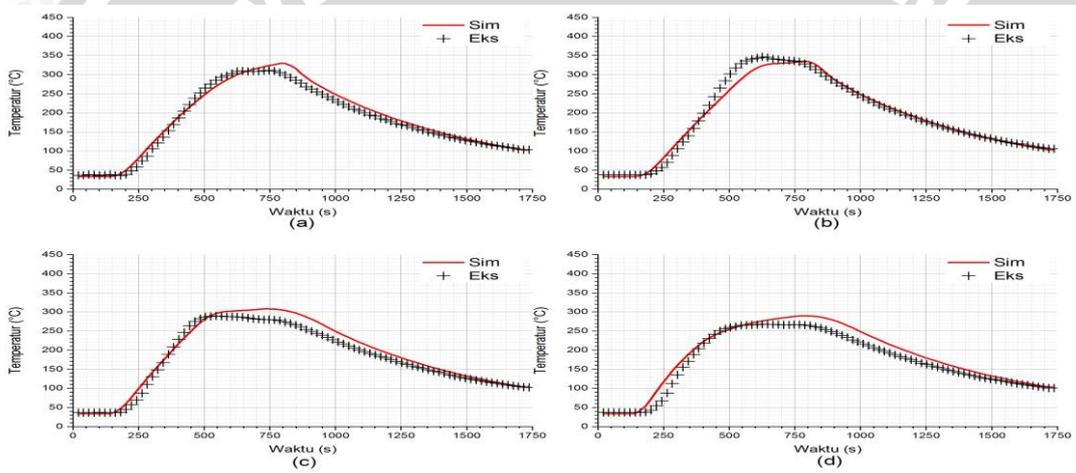
Gambar 6 : Heat Flux Error

Untuk penyebab ke dua, terjadi karena pergantian konveksi fiksi (β) pada daerah benda kerja yang bersentuhan dengan *backing plate* terlalu cepat sehingga tidak mewakili proses *pulling out* pada proses FSW keadaan nyata. Hal ini juga akan berakibat pada bergesernya *peak* temperatur, dapat dilihat pada seluruh grafik (*channel 7 – channel 26*) *peak* temperatur bergeser pada detik 810 ke atas, karena pada detik ke 810 konveksi fiksi (β) langsung diubah secara mendadak, sehingga energi yang masuk lebih banyak yang terkonduksikan ke dalam benda kerja daripada yang hilang akibat lingkungan.

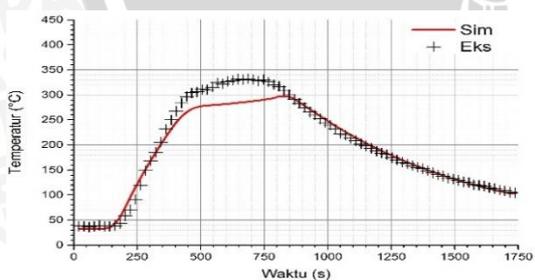
Sedangkan penyebab ke tiga disebabkan oleh penyederhanaan konveksi+radiasi (h_{overall}) sebesar $30 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$. Pada suhu rendah penyederhanaan ini masih mendekati kondisi aktual karena kecilnya pengaruh radiasi pada suhu rendah, hal ini dapat dilihat pada kecenderungan pada awal dan akhir grafik akan tetapi pada suhu tinggi, pengaruh dari radiasi cukup besar sehingga pada suhu *peak* grafik simulasi cenderung lebih tinggi dibandingkan dengan grafik pada pengujian eksperimen.



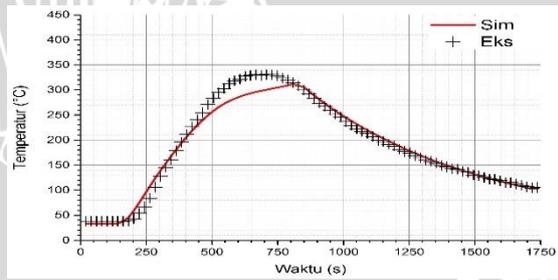
Gambar 7 : (a) Channel 7; (b) Channel 8; (c) Channel 9; (d) Channel 10



Gambar 8 : (a) Channel 11; (b) Channel 12; (c) Channel 14; (d) Channel 15



Gambar 9 : Channel 16



Gambar 10 : Channel 13

Terdapat perbedaan pada *channel 16* (Gambar 9), karena data eksperimen lebih tinggi dibandingkan dengan hasil simulasi, hal ini bisa dikarenakan, tidak dimodelkannya proses *dweling*. Proses *dweling* sendiri digunakan untuk *pre-heat* pada benda kerja agar dapat dilakukan proses *welding*.

Pada *channel 13* (Gambar 10) hasil dari simulasi sedikit lebih rendah dibandingkan dengan hasil eksperimen, bahkan pada *channel 13* suhu *peak* lebih tinggi dibandingkan dengan *channel 14* yang berada lebih dekat dengan sumber panas las. Hal ini dapat disebabkan karena *thermocouple* pada

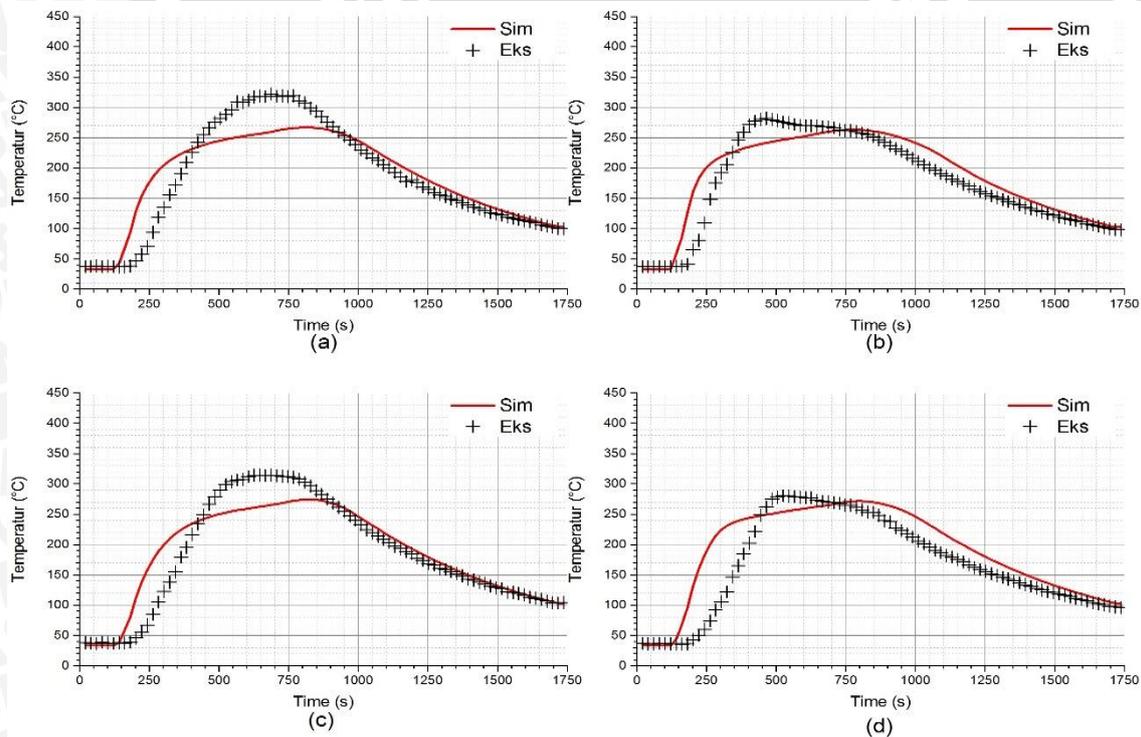
channel 13 tidak bekerja dengan baik, sehingga data yang diperoleh tidak konsisten.

Pembahasan Grafik Channel 17-26

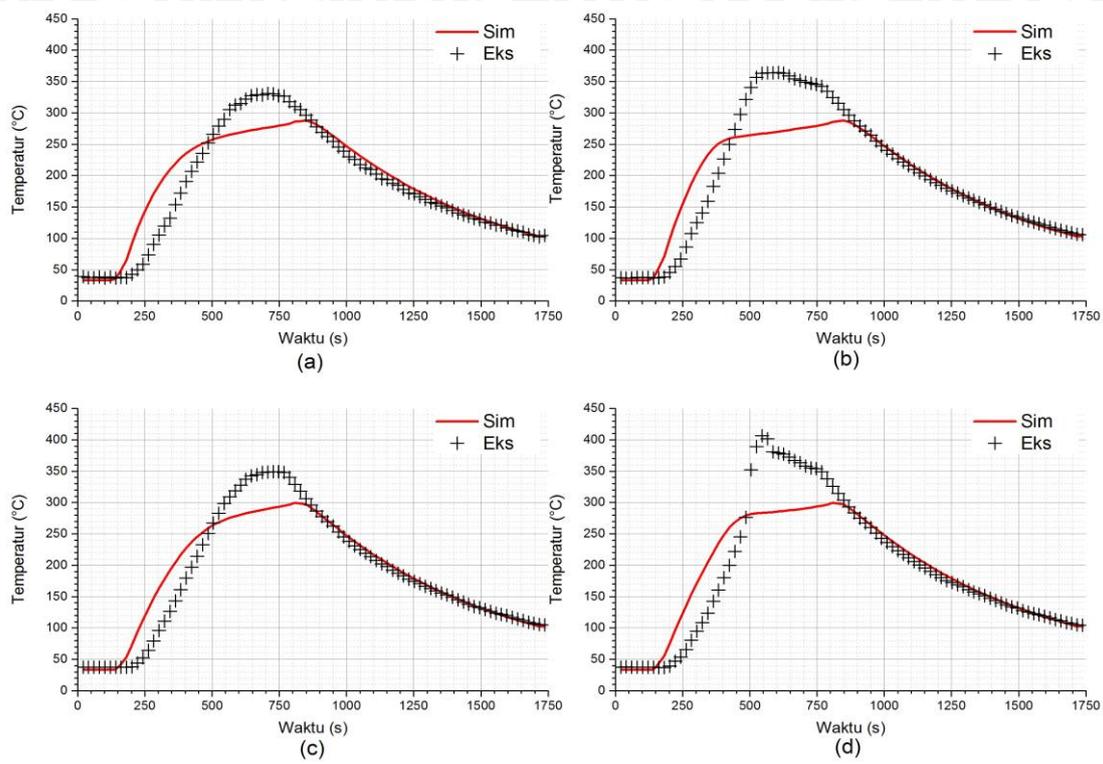
Pada Gambar 11 sampai dengan Gambar 14 naiknya grafik pada data eksperimen lebih lama dibandingkan dengan naiknya grafik pada data simulasi. Hal ini dapat disebabkan karena penempatan *thermocouple* tidak sesuai dengan yang diinginkan, jika dilihat dari grafik eksperimen yang lebih lama naiknya dibandingkan dengan simulasi dan *peak* temperatur pada eksperimen lebih tinggi hal ini dapat dikarenakan penempatan *thermocouple* lebih ke kanan (searah dengan *weld direction*)

sehingga suhu *peak*-nya lebih tinggi dan perubahan temperatur awalnya lebih lama dibandingkan dengan data dari simulasi.

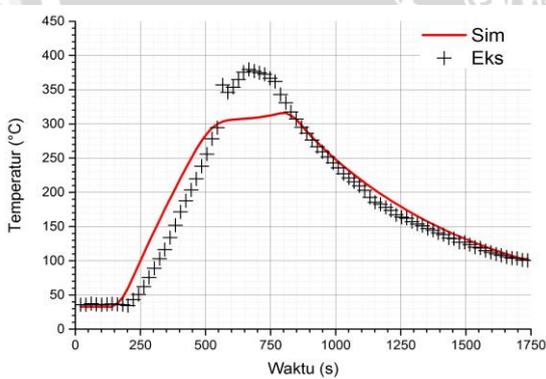
Perbedaan kecenderungan terjadi pada *channel* 25 (Gambar 14), yang mana data dari simulasi lebih tinggi dari data eksperimen, hal ini dapat disebabkan karena pemasangan *thermocouple* yang tidak menempel secara sempurna saat dilakukan penilitian eksperimen.



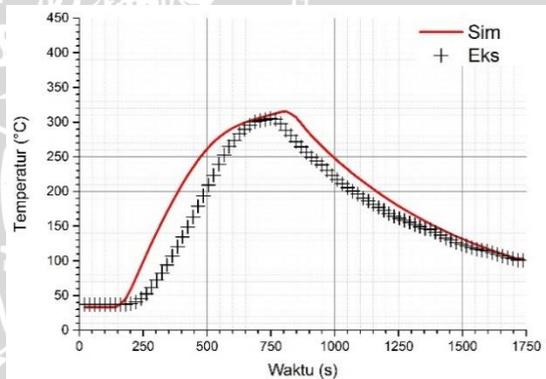
Gambar 11 : (a) Channel 17; (b) Channel 18; (c) Channel 19; (d) Channel 20



Gambar 12 : (a) Channel 21; (b) Channel 22; (c) Channel 23; (d) Channel 24



Gambar 13 : Channel 26



Gambar 14 : Channel 25

Error Pada Model

Untuk menentukan baik atau tidaknya suatu model maka model akan di-komparasi dengan hasil dari eksperimen (validasi) yang mana hal ini akan menghasilkan error, *Error* Nilai pada *error* I sangat baik karena mempunyai *error* yang bernilai kecil, yang artinya luasan dibawah kurva simulasi mempunyai *error* rata-rata 4.124%, bila dibandingkan dengan luasan dibawah kurva

I adalah jika luasan di bawah grafik simulasi dibandingkan dengan luasan di bawah grafik eksperimen sedangkan *error* II adalah Jika grafik dari simulasi dibandingkan tiap-tiap titik dengan grafik data eksperimen. *Error* terkecil terdapat pada *channel* 8 sebesar 0.8216%, sedangkan *error* terbesar terdapat pada *channel* 25 yaitu sebesar 14.2%. Namun jika data simulasi dibandingkan per-titik (*error*

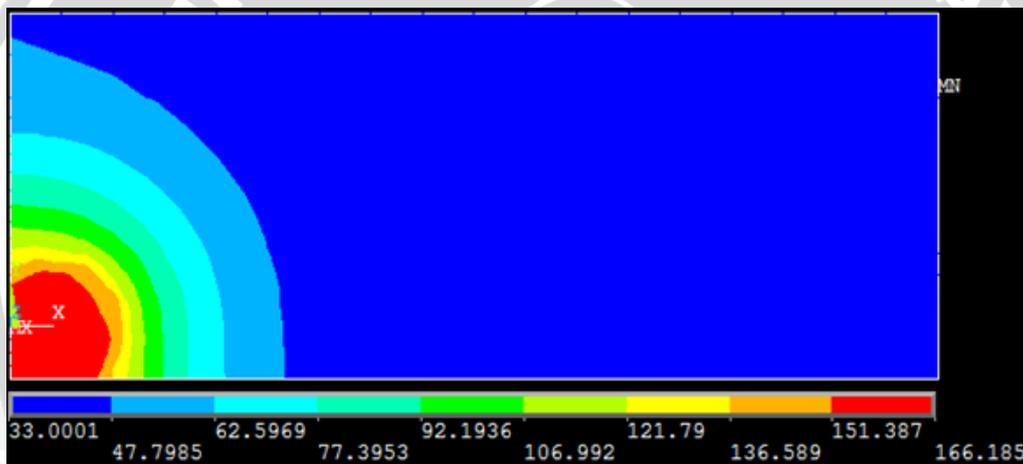
II), *error* mempunyai nilai yang besar, dengan rata-rata *error* sebesar 12,64%. *Error* terkecil terdapat pada *channel* 11 dengan nilai 5.72%, dan yang terbesar terdapat pada *channel* 19 yaitu sebesar 26.86%.

Prediksi Profil Temperatur

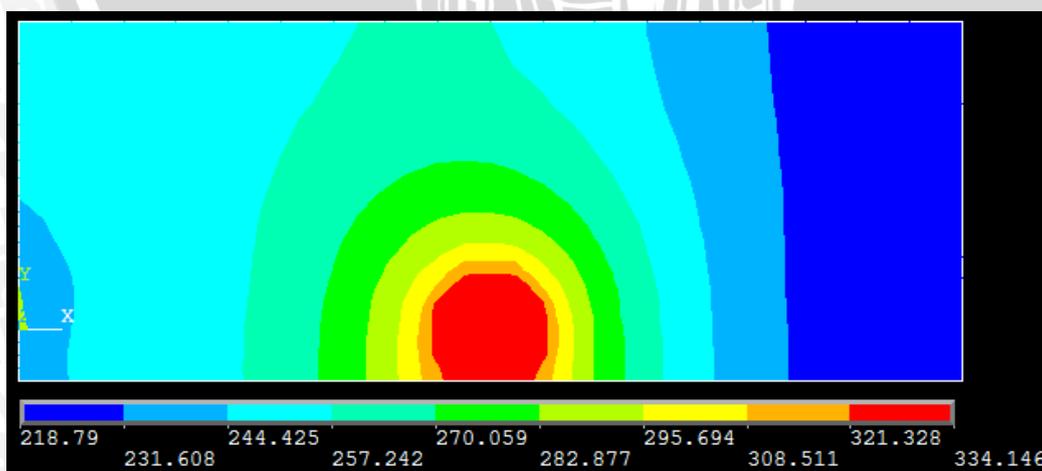
Profil temperatur pada benda kerja akan menentukan *residual stress* dan juga akan mempengaruhi kekuatan benda kerja pada daerah yang mencapai suhu rekristalisasi. Baik *residual stress* dan metalurgi benda kerja, keduanya akan mempengaruhi kekuatan benda kerja maupun kekuatan dari sambungan lasnya.

Jika awal pengelasan dari kiri benda kerja, maka temperatur tertinggi berada

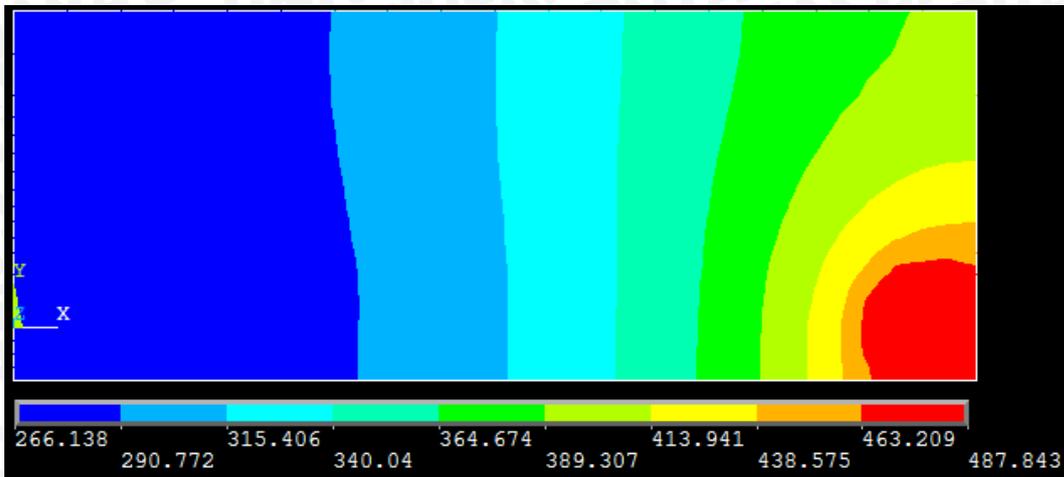
pada ujung kanan benda kerja seperti Gambar 17. Dapat dilihat temperatur maksimal dari proses FSW pada simulasi adalah sebesar 486.843 °C, hal ini sesuai dengan pendapat Chao bahwa proses pengelasan FSW menghasilkan temperatur maksimal sekitar 80-90 persen dari temperatur *melting*[2] benda kerja yaitu sebesar 582 °C. Gambar 15 adalah ketika *tool* berada pada ujung kiri benda (awal proses pengelasan) sedangkan Gambar 16 adalah ketika *tool* berada pada tengah-tengah benda kerja.



Gambar 15 : Profil Temperatur Awal



Gambar 16 : Profil Temperatur Tengah

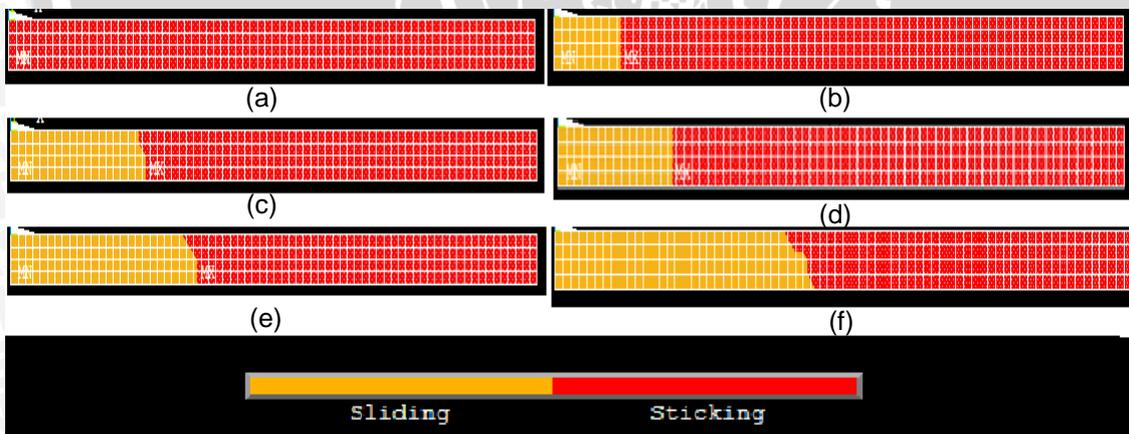


Gambar 17 : Profil Temperatur Akhir

Prediksi Profil Bonding dan Bonding Temperatur

Karena tidak adanya data eksperimen untuk profil bonding dari sambungan las maka untuk memprediksi bonding temperatur dilakukan peng-inputan beberapa suhu bonding, pada pengelasan gesek temperatur bonding minimal adalah sebesar suhu rekristalisasi dari material benda kerja tersebut

[1]. Sedangkan untuk aluminium sendiri, Chao mengemukakan dalam jurnalnya [4], aluminium mengalami rekristalisasi pada suhu sekitar 200 °C hingga 300 °C, sedangkan Avner dan Sidney[3] mengemukakan bahwa suhu rekristalisasi aluminium paduan sekitar 315 °C. Berikut (Gambar 18) profil bonding jika bonding temperatur sebesar 260 °C sampai dengan 315 °C .



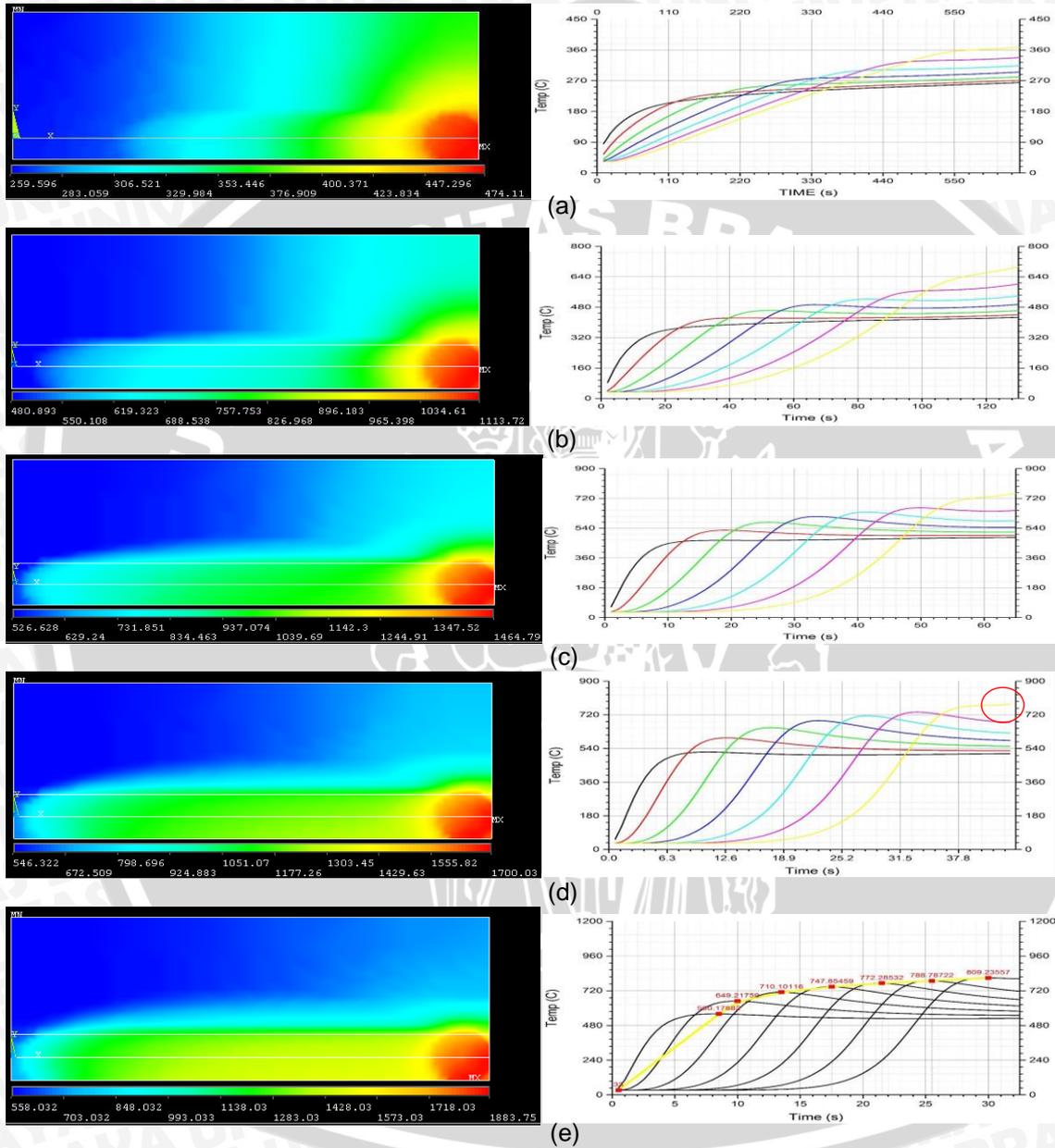
Gambar 18 : Profil Bonding Jika Bonding Temperature (a) 260 °C; (b) 270 °C; (c) 280 °C; (d) 290 °C; (e) 300 °C; (f) 315 °C

Quasi Steady State Parametric Study

Dalam simulasi diketahui bahwa, pengelasan pada eksperimen belum mencapai quasi steady state hal ini dikarenakan kecepatan penelasan yang lambat, profil

temperatur maksimal dapat dilihat pada gambar 19.

Dengan memvariasikan kecepatan namun dengan menyamakan heat input maka didapatkan hasil simulasi sebagai berikut:

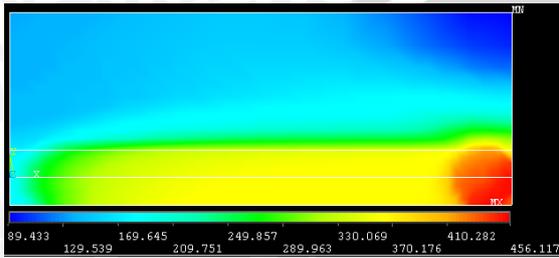


Gambar 19 : Variasi kecepatan pengelasan (a) Normal; (b) 5x; (c) 10x; (d) 15x; (e) 20x

Dapat dilihat pada Gambar 19, *quasi steady state* dapat dilakukan pada eksperimen karena suhu *steady state* dicapai saat kecepatan melebihi dari titik *melting* material. Hal ini tidak sesuai dengan dasar teori bahwa suhu pengelasan 300mm/menit, namun hal ini tidak

pengelasan FSW adalah 80-90% dari titik melting benda kerja.

Agar mencapai *quasi steady state* dan mempunyai temperatur maksimal yang sama dengan parameter sebelumnya, penulis berpendapat agar pengelasan dilakukan dengan kecepatan 300mm/menit dan dengan gaya 4800N. Hasil simulasi dengan parameter tersebut dapat dilihat pada Gambar 20.



Gambar 20 : 300mm/menit, 4800N

Dengan metode simulasi kita dapat memahami fenomena yang terjadi pada proses pengelasan FSW, mengetahui profil temperatur, *bonding* temperatur dan profil *bonding* bahkan dapat menentukan parameter yang tepat agar hasil las-an menjadi lebih baik lagi dan yang terpenting hal tersebut dapat dilakukan dengan mudah dan murah.

KESIMPULAN

1. Dari hasil simulasi diketahui *error I* dan *error II* masing-masing dari *channel 7-26* rata-rata sebesar 4.124% dan 12,64%. Hal ini menandakan bahwa model memiliki luasan di bawah kurva yang hampir sama dengan hasil eksperimen (dengan perbedaan 4.12%) hanya saja profil dari kurva tersebut memiliki perbedaan yang cukup besar yaitu sebesar 12,64%.
2. Temperatur tertinggi pada setiap *load step* berada pada daerah yang dekat sumber panas lalu berkurang seiring bertambahnya jarak, sedangkan untuk *peak* temperatur tertinggi berada pada saat lasan berada pada ujung benda kerja yaitu sebesar 486.843 °C.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Afriansyah, A. 2016. **Pengaruh Variasi Waktu Gesekan dan Sudut Chamfer Terhadap Nilai Kekuatan Tarik Sambungan Las Gesek Al-Mg-Si**

Dengan Upset Force 500 kgf. Universitas Brawijaya.

- [2] Amini, A. &Asadi, P. 2014. **Friction Stir Welding Applications in Industry.** Elsevier. p. 671-722.
- [3] Avner, S.H. **Introduction To Physical Metallurgy, Second Edition.** New York: McGRAW-HILL.
- [4] Chao, Yuh.J., Qi, X. &Tang, W. 2003. **Heat Transfer in Friction Stir Welding-Experimentl and Numerical Studies.** Journal of Manufacturing Science and Engineering. Vol. 125. p. 138-145
- [5] Feng, Z., Wang, X.L., David, S.A., and Sklad, P.S. 2007. **Modelling of Residual Stresses and Property Distributions in Friction Stir Welds of Aluminum Alloy 6061-T6.** Science and Technology
- [6] Hasselstrom, A.K.J and Nilsson, U.E. 2012. **Thermal Contact Conductance in Bolted Joints.** Sweden: Chalmers University of Technology
- [7] Larsen, Anders., Stolpe, Mathias., Hattel. J.H. 2012. **Estimating the Workpiece Backing Plate Heat Transfer Coefficient in Friction Stir Welding.** Engineering Computations: International Journal for Computer-Aided Engineering and Software. Vol. 29. No. 1. p. 65-82.
- [8] Malde, Manthan. 2006. **Thermomechanical Modeling and Optimization of Friction Stir Welding.** Hyderabad:Osmania University.
- [9] Mishra, R.S., Ma, Z.Y. 2005. **Friction Stir Weldin and Processing.** Materials Science and Engineering R 50. p. 1-78.
- [10] Schmidt, H., Hattel, J. &Wert. J. 2004. **An Analytical Model for the Heat Generation in Friction Stir Welding.** Modelling Simul. Mater. Sci. Eng. Vol. 12. p. 143-157.
- [11] Schmidt, H.N.B., Dickerson, T.L. &Hattel, J.H. 2006. **Material Flow in Butt Friction Stir Welds in AA2024-T3.** Acta Materialia.Vol.54. p. 1199-1209.
- [12] Schmidt, H.B. &Hattel, J.H. 2008. **Thermal Modelling of Friction Stir Welding.** Scripta Materialia. Vol. 58. p. 332-337
- [13] Schmidt, H.N.B. 2010. **Modelling Thermal Properties in Friction Stir Welding.** Denmark:Technical University of Denmark.