

repository.ub.ac.id

MODEL SUMBER PANAS VOLUMETRIK DARI PROSES *FRICITION STIR WELDING* MENGGUNAKAN SIMULASI *MOVING HEAT SOURCE*
(Moving Body Heat Load Model of Friction Stir Welding)

Daru K. Jati, Djarot B. Darmadi, Rudy Soenoko

Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya
Jalan MT. Haryono 167, Malang 65145, Indonesia
E-mail: dkjmazz@gmail.com

ABSTRAK

Untuk membuat produk dengan kualitas yang mendekati keinginan pemakainya, jika tidak bisa dikatakan sempurna, diperlukan pertimbangan dalam berbagai macam proses pembuatan produk tersebut sampai distribusinya ke tangan pemakai. Salah satunya adalah proses produksi dan manufaktur dari produk itu sendiri. Dalam industri logam, pengelasan merupakan satu dari sekian banyak proses manufaktur dimana dua logam atau lebih digabung menjadi satu dengan cara melelehkan salah satu logam di atas logam yang lain dan membekukan kembali logam yang leleh tersebut. Penelitian ini bertujuan meneliti salah satu jenis proses pengelasan, yaitu Friction Stir Welding (FSW); berapa suhu puncak titik tertentu pada waktu tertentu dan juga bagaimana persebaran suhu dari proses FSW. Penelitian ini dilakukan dengan metode eksperimental semu atau simulasi. Dalam pemodelan kali ini, dua plat aluminium AL 6061 dengan dimensi $p \times l \times t$ 180 x 60 x 10 (cm) dilas dengan proses FSW. Dari hasil penelitian menunjukkan bahwa suhu sepanjang lintasan lasan akan meningkat seiring pergerakan translasi pahat yang berputar sebagai sumber panas, sampai titik puncak dimana setelahnya akan terjadi penurunan suhu diakibatkan pendinginan pasca pengelasan. Juga, dikarenakan kecenderungan grafik heating & cooling yang hampir sama, hasil yang didapat dari simulasi komputer dapat dipergunakan sebagai perbandingan untuk hasil eksperimental.

Kata Kunci: Friction Stir Welding, simulasi, suhu puncak, persebaran suhu.

ABSTRACT

In efforts of making products with the quality close enough to the demands of the users, if it cannot be said perfect, it is a necessity to consider various process in the product making until it's distribution to the consumers. One of them is the production process and manufacturing process of the product. In the metal industry, welding is one of the manufacturing process in which two metals or more are to be joined into one part by melting one metal on the other and then freeze it back.

This research aims to examine one of a kind of welding, that is Friction Stir Welding (FSW); how much the peak temperatur of certain place in a certain time and how does the temperature spreads along the process of FSW. This research using pseudo – experiment method or simulation. In this model, two plates of Aluminium AL 6061 with the dimension of $l \times w \times t$ 180 x 60 x 10 (cm) is welded by FSW process.

The results of this simulation states that the temperature along the weld line is increasing following the translation movement of the rotating tool acts as the heat source, until it reaches the peak point where the temperature will slowly go down due to the cooling phase of welding. Also, because of the heating – cooling graphic trend is nearly corresponds the experiments results, the simulation results is an ok to be used as a comparison for the experimental Friction Stir Welding results.

Keywords : Friction Stir Welding, simulation, peak temperature, temperature spreads

PENDAHULUAN

Bisa dikatakan, bahwa pengelasan adalah proses manufaktur yang paling kompleks di antara disiplin ilmu mekanika struktural, dikarenakan untuk memahami prosesnya dibutuhkan sumbangsih dari berbagai macam disiplin ilmu pengetahuan diantaranya adalah perpindahan panas, ilmu mekanika, metalurgi, dsb. Di sini, FEM (*Finite Element Method*) *modelling* menjadi instrumen yang sangat penting dalam rangka memahami hubungan antara proses pengelasan dengan berbagai macam disiplin ilmu di atas.

Analisa thermal menjadi langkah yang sangat fundamental di dalam pemodelan pengelasan dan adanya kesalahan di dalam pemodelan panas akan berefek pada analisa. Sifat panas material, terutama konduktivitas termal memberi pengaruh signifikan pada distribusi temperatur yang bila dianalisa lebih lanjut juga dapat membantu dalam hala analisa termomekanikal (tegangan sisa las) dan termometalurgikal (mikrostruktur hasil lasan). Maka dari itu, pemodelan FEM memainkan peran yang sangat penting dalam usaha membangun pemahaman tentang proses pengelasan

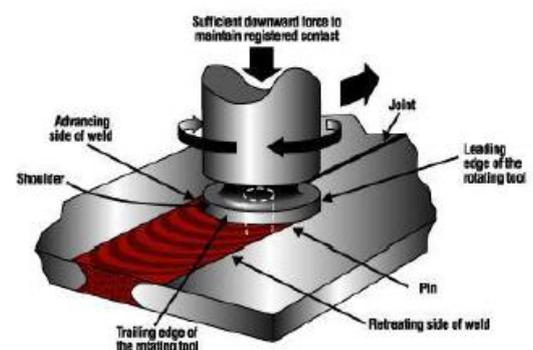
Pengelasan sendiri dibagi ke dalam berbagai macam jenis. Salah satu dari jenisnya adalah *Friction Stir Welding* (FSW) atau las gesek-putar, dimana logam yang akan dilas dikenai gesekan dari pahat yang bergerak translasi terhadap panjang logam yang hendak dilas dan pahat berputar terhadap sumbu putar pahat yang keduanya menimbulkan panas untuk digunakan dalam proses pengeleasan tersebut.

Salah satu contoh aplikasi FSW dalam dunia industri adalah perusahaan Tower Automotive yang sudah menggunakan FSW dalam proses manufakturnya. Perusahaan tersebut mengklaim bahwa FSW bisa menjadi pengganti yang cocok terhadap las GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), karena diperkirakan bisa mengurangi berat sampai dengan

40%, dua kali lipat menaikkan kekuatan tarik pada Aluminium seri 6000, dan bisa meningkatkan *fatigue life* dua sampai dua puluh kali dari pada pemakaian GMAW [1].

Friction Stir Welding (FSW) atau Las Gesek – Putar adalah teknik las *solid state* yang ditemukan di The Welding Institute (TWI) pada tahun 1991 [2]. FSW berlangsung di bawah suhu solidus dari logam lasan, sehingga tidak ada pelelehan logam yang terjadi. Proses FSW merupakan pengembangan dari proses Las Gesek dan jamak digunakan untuk memproduksi lasan kontinu pada fabrikasi plat. Sama seperti proses pengelasan lain, FSW juga bisa diterapkan pada jenis sambungan las yang bermacam – macam, juga posisi las yang bervariasi pula.

Benda kerja pada proses FSW, pada kasus ini berupa plat, dicekam dengan ragam dikarenakan gaya yang timbul akibat proses FSW dapat merubah posisi benda kerja, yang tentu saja hal ini sangat tidak menguntungkan. Pahat berputar dengan atau disertai profil tertentu sepanjang sambungan pada plat yang akan dilas, juga panjang pahat dalam proses ini harus tidak boleh lebih besar daripada tebal plat.[3] [4] [5]



Gambar 1. Proses Kerja FSW

Bersama dengan panas mekanik akibat pengadukan material yang dikenai gesekan dan putaran, panas juga utamanya dihasilkan dari proses gesekan *probe & shoulder* dari pahat terhadap plat menyebabkan material plat akan menjadi

lunak, tapi tidak sampai melebur, yang memungkinkan pahat bisa bergerak sepanjang lintasan las. Akibat gerak translasi dan rotasi dari pahat, material plastis yang menghadap muka pin akan bergerak menuju belakang pin, dan hal ini berulang sampai proses penyambungan selesai. [4] [5]

Colegrove [9] mempublikasikan model 3D dari perpindahan panas dan seberapa besar panas yang dihasilkan pin pada proses FSW. Dalam FSW, panas dihasilkan akibat (1) gesekan pahat dan benda kerja (2) panas deformasi plastis di dekat pin pahat. [6]. Pada tahun 2003, Chao, Qi, & Tang mempublikasikan perbandingan antara hasil eksperimental dan simulasi FEM dari FSW [7]. Pada tahun 2010, Schmidt memodelkan panas pada FSW dengan persebaran panas pada *shoulder* serta selimut pin [8]. Penelitian ini menunjukkan bahwa panas pada *shoulder* persentasenya adalah sebesar 83% dan sisa panasnya teraplikasikan pada pin.

Penelitian kali ini mencoba untuk menggabungkan sumber panas permukaan, pada *shoulder*, dengan sumber panas volumetrik pada pin. Chao, Qi, Tang [7] memperkirakan ada sekitar 95% panas total dari keseluruhan proses FSW teraplikasikan pada benda kerja, sedang sisanya mengalir pada tool. Song & Kovacevic [6] mencoba menambahkan panas dari deformasi plastis pada pin sebagai tambahan atas panas akibat *surface heat load* pada *shoulder*. Dengan mengasumsikan volume area yang terdefomasi plastis sebagai silinder sempurna sebagaimana bentuk pin pahat.

Pada *paper* kali ini, akan dipaparkan model detail dari perpindahan panas transien pada proses penyambungan plat aluminium dengan menggunakan FSW. Selain panas permukaan akibat kontak *shoulder* pahat terhadap benda kerja, juga dimasukkan panas volumetrik akibat deformasi plastis pada pin pahat. Sejumlah *commad prompt* dari *software* APDL diaplikasikan untuk memberi

perlakuan pada model semisal yang terjadi pada penelitian eksperimental. APDL dipilih karena menyediakan kemudahan akses dalam memodifikasi berbagai macam parameter yang ada di dalam pemodelan sumber panas volumetrik pada proses FSW dengan menggunakan *moving heat source*.

DESKRIPSI MODEL

Dalam rangka simplikasi model matematika, FSW dibagi menjadi tiga periode [6]. :

1. Penetrasi; sesaat setelah pin pahat menyentuh permukaan benda kerja sampai bagian *shoulder* pahat menyentuh permukaan benda kerja.
2. Pengelasan; setelah pahat seluruhnya penetrasi ke dalam benda kerja sampai pahat berhenti mengelas. Ini adalah bagian utama dari proses FSW
3. Pencabutan; mulai dari penarikan pahat sampai pin tercabut sempurna dari benda kerja.

Batasan – batasan dalam penelitian kali ini adalah sebagai berikut :

1. Panas diasumsikan 95% yang teraplikasikan pada benda kerja
2. Deformasi material pada muka atas benda kerja selama pengelasan diabaikan.
3. Gaya gesek dari pin pahat selama pengelasan diabaikan.
4. Pin pahat berbentuk total silinder.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode penelitian eksperimental semu yaitu dengan melakukan simulasi komputer memakai software berbasis metode elemen hingga. Ada 3 variabel yang digunakan dalam penelitian ini:

1. Variabel bebas (*independent variable*)

Variabel bebas adalah variabel yang bebas ditentukan oleh peneliti sebelum melakukan penelitian dan tidak dipengaruhi oleh variabel lain. Dalam penelitian ini variabel bebas yang digunakan adalah lebar dan panjang plat lasan yang ditunjukkan gambar 2

2. Variabel terkontrol

Variabel terkontrol adalah variabel yang nilainya dijaga konstan, dan nilainya ditentukan sebelum penelitian. Variabel terkontrol yang digunakan pada penelitian ini adalah kecepatan linear pengelasan adalah 2,5 mm/s; putaran pahat sebesar 2000 RPM, gaya penekanan pada saat proses FSW sebesar 1200 N, koef. gesek 0,3.

3. Variabel terikat (*dependent variabel*)

Variabel terikat adalah variabel yang besarnya tergantung pada variabel bebas, dan besarnya akan diketahui setelah dilakukannya penelitian. Variabel terikat dari penelitian ini antara lain:

- Suhu puncak;
- Persebaran suhu;

Prosedur penelitian kali ini adalah seperti yang dijabarkan pada langkah – langkah sebagai berikut :

1. Pemodelan; memasukkan parameter – parameter yang dibutuhkan dalam proses simulasi. Adapun parameter yang harus dimasukkan untuk pemodelan kali ini adalah geometri, beban, material, diskretisasi, kondisi batas.

2. Simulasi; proses perhitungan untuk mendapatkan hasil, berdasarkan perhitungan MEH (Metode Elemen Hingga)

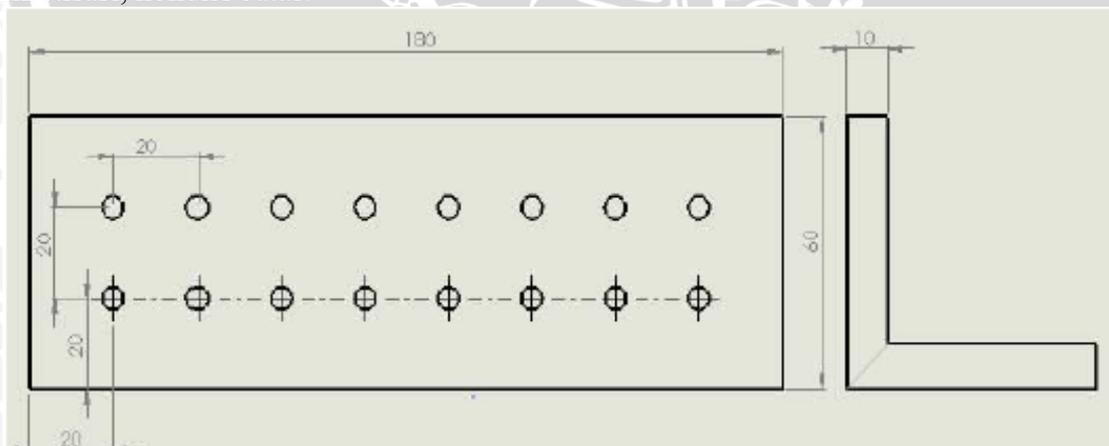
3. Pengambilan data; data yang diambil pada penelitian kali ini adalah suhu puncak pada lokasi yang bervariasi, juga persebaran suhu pada berbagai tempat dan waktu.

4. Pengolahan data; data yang sudah didapatkan dibuat grafik persebaran suhu terhadap waktu. Suhu maksimum dapat diketahui dengan mencari nilai suhu terbesar sepanjang data persebaran suhu.

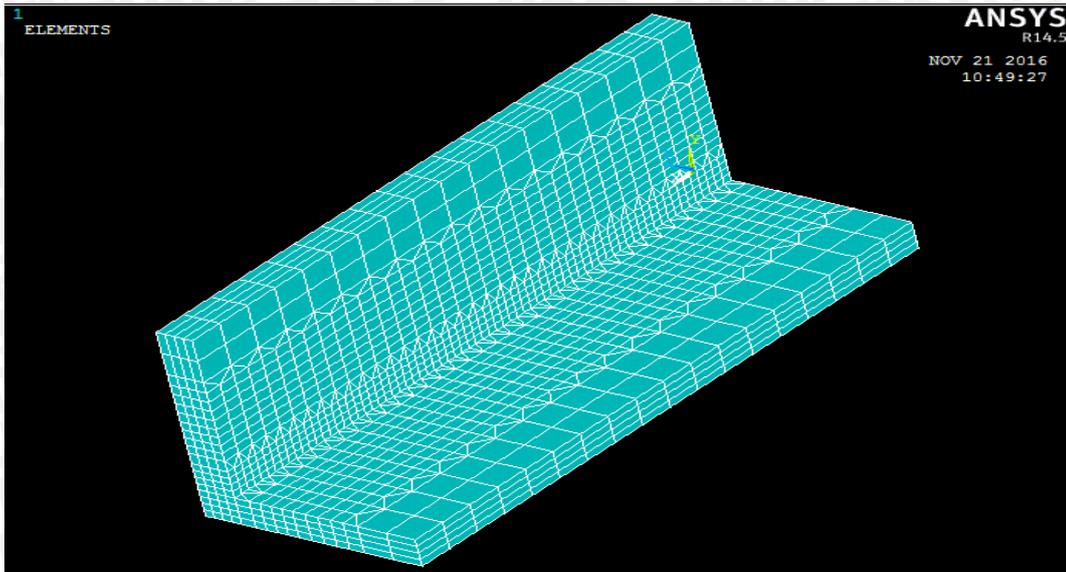
5. Hasil dan Pembahasan; mendapatkan gambaran umum setelah dilakukan penelitian terhadap dasar teori

DATA MATERIAL BENDA KERJA

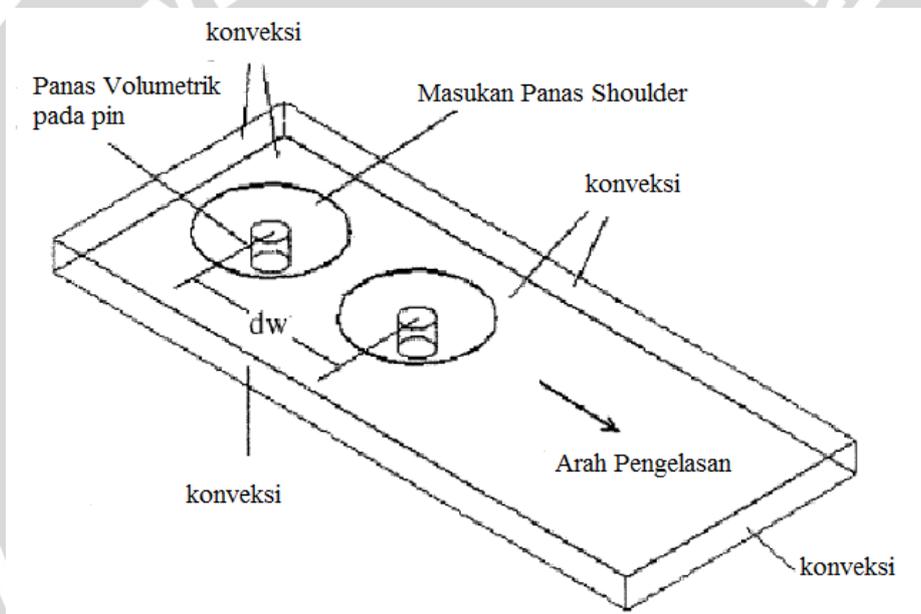
<i>Aluminium AA 6061</i>	
<i>Density (kg/m³)</i>	2700
<i>Poisson's Ratio</i>	0.33
<i>Yield Strength (MPa)</i>	570
<i>Shear Modulus (MPa)</i>	26000
<i>Elasticity Modulus (MPa)</i>	76300



Gambar 2. Plat Benda Kerja



Gambar 3. Meshing benda kerja



Gambar 4. Kondisi batas

$$\mu = 0,3$$

✓ Masukan panas akibat gesekan *shoulder* pahat:

$$Q_{\text{shoulder}} = \frac{2}{3} \pi \omega \tau_{\text{contact}} (R_{\text{shoulder}}^3 - R_{\text{pin}}^3)$$

x 95%

dimana :

$$\omega = N \times \frac{2\pi}{60} \text{ (rad/s)}$$

$$\tau_{\text{contact}} = \frac{F}{A} \chi \mu \text{ (Pa)}$$

$$N = 2000 \text{ RPM}$$

$$F = 1200 \text{ N}$$

$$A = 3,14 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

sehingga, didapatkan panas pada *shoulder* sebesar : 470 Watt

✓ Masukan panas akibat pin pahat:

$$Q_{\text{pin}} = 2\pi r_p h \bar{y} \frac{V_m}{\sqrt{3}} + \frac{2\mu \bar{y} \pi r_p h v_{rp}}{\sqrt{3(1+\mu^2)}} +$$

$$\frac{4F_p \mu V_m \cos \theta}{\pi}$$

dimana

$$\theta = 90^\circ - \bar{y} - \lambda - \tan^{-1}(\mu)$$

$$V_m = \frac{\sin \lambda}{\sin(180^\circ - \theta - \lambda) v_p}$$

$$v_p = r_p \omega$$



$$\bar{Y} = 1012815 \text{ Pa}$$

$$\lambda = 90^\circ$$

$$r_p = 0,0025 \text{ m}$$

$$h = 0,01 \text{ m}$$

sehingga, didapatkan panas yang terjadi pada pin : 96,99 Watt

Untuk kasus FSW kali ini, selain sumber panas permukaan (*surface*), juga diaplikasikan sumber panas volumetrik yang berasal dari deformasi plastis material benda kerja, seperti ditunjukkan gambar 4. Rumus masukan panas diperlukan agar persebaran panas yang sesuai dengan hasil eksperimen bisa didapatkan

KONDISI BATAS

1. *Shoulder* pahat dan benda kerja. Kondisi batas pada kontak *shoulder* pahat dan benda kerja adalah kondisi Neumann dan dapat dihitung dari panas akibat gesekan :

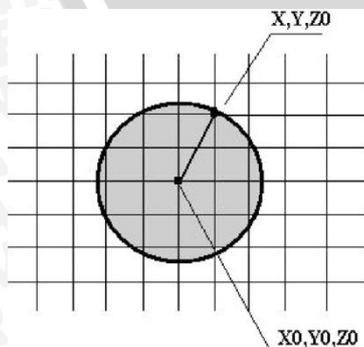
$$k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma} = q_i$$

2. Kondisi batas konveksi, dari benda kerja ke udara sekitar adalah kondisi Neumann. Pada *backing plate*, koefisien konveksi bisa disesuaikan :

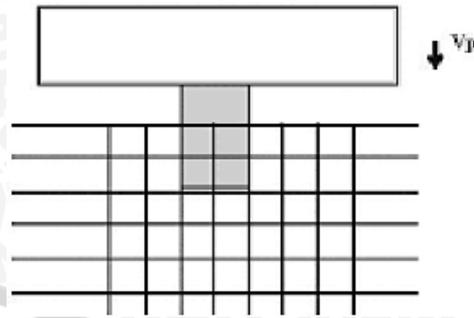
$$k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma} = h(T - T_0)$$

3. Kondisi awal.

$$T(x, y, z, 0) = T_i$$



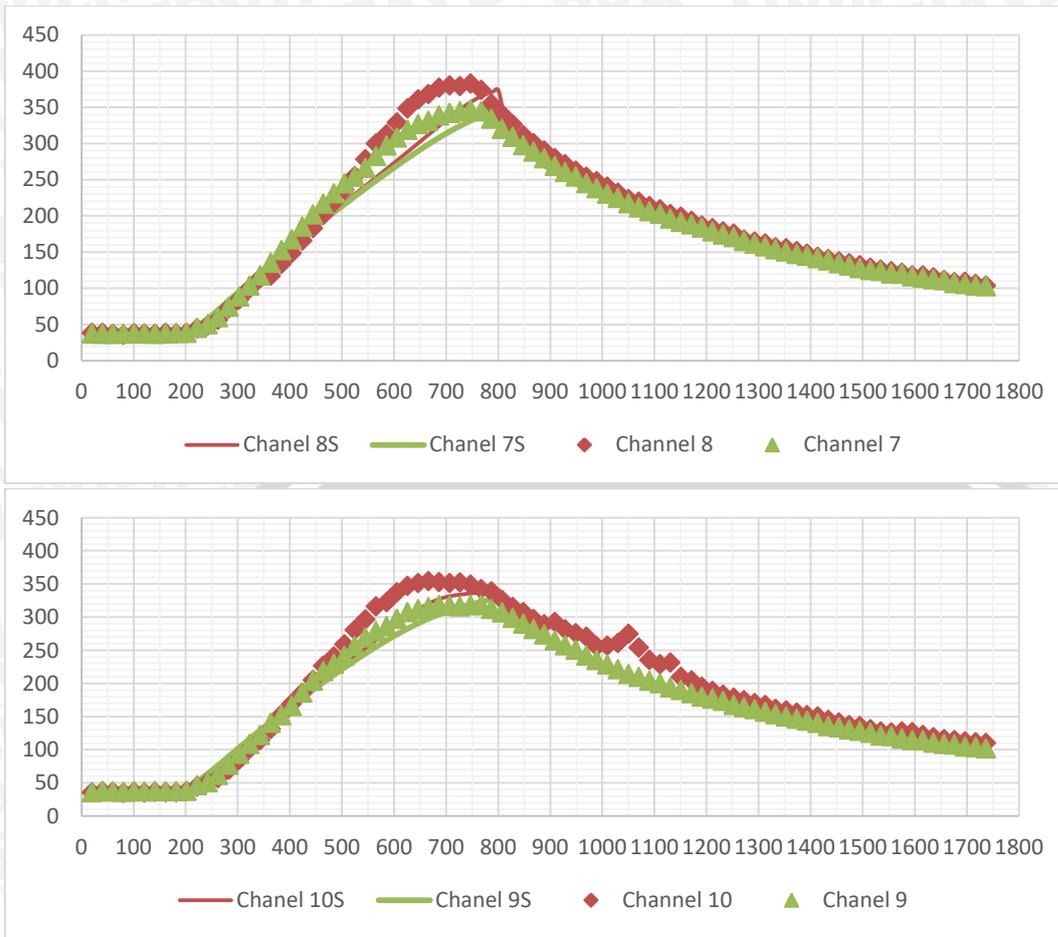
Gambar 5. Masukan panas *shoulder*



Gambar 6. Sumber panas volumetrik pada pin pahat

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam *paper* kali ini akan dibahas beberapa kecenderungan grafik persebaran suhu dari simulasi dan eksperimen proses FSW. Dalam penelitian eksperimen, terdapat sejumlah chanel termokopel untuk melakukan pengamatan besarnya nilai suhu yang ada pada posisi tersebut. Akan dibandingkan dengan hasil yang didapatkan dari hasil simulasi komputer, dengan hasil yang akan dijelaskan sbb :



Gambar 6. Perbandingan hasil eksperimen & simulasi chanel 7-10

Gambar 6 menunjukkan tren pemanasan dan pendinginan (*heating and cooling*) dari grafik persebaran suhu FSW secara eksperimen maupun simulasi memiliki kemiripan. Ini bisa disebabkan karena parameter yang mempengaruhi pemanasan dan pendinginan, seperti koefisien konveksi (h) pada simulasi sudah mendekati nilai h pada eksperimen

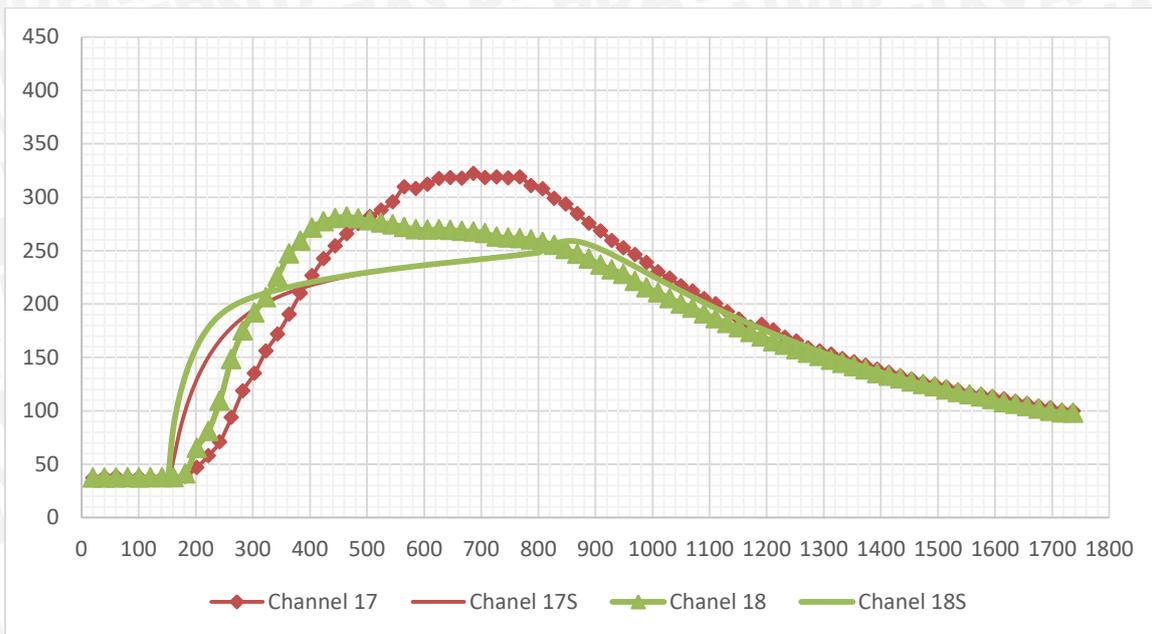
Suhu puncak dan waktu terjadinya pada eksperimen chanel 7 & 8 berturut – turut adalah $346,55\text{ }^{\circ}\text{C}$ pada 747 s dan $382,684\text{ }^{\circ}\text{C}$ pada 747 s. Sementara pada simulasi adalah $347,5528\text{ }^{\circ}\text{C}$ pada 800 s dan $374,1452\text{ }^{\circ}\text{C}$ pada 800 s.

Suhu puncak dan waktu terjadinya pada eksperimen chanel 9 & 10 berturut – turut adalah $318,284\text{ }^{\circ}\text{C}$ pada 747 s dan $354,243\text{ }^{\circ}\text{C}$ pada 666 s. Sementara pada simulasi adalah $329,1859\text{ }^{\circ}\text{C}$ pada 800 s dan $341,1412$ pada 800 s. Perbedaan nilai suhu puncak antara eksperimen dan simulasi merupakan hal yang wajar.

Sangat sulit sekali untuk memperoleh nilai yang benar – benar sama, bisa dikarenakan nilai parameter kondisi nyata saat eksperimen berbeda dengan masukan kondisi batas pada simulasi yang dilakukan, sehingga menghasilkan nilai yang berlainan. Juga, hal ini bisa disebabkan karena pada eksperimen peletakan termokopel tidak sesuai pada tempatnya, sehingga mempengaruhi nilai

Namun, baik pada eksperimen maupun simulasi, suhu puncak pada chanel 8 **lebih tinggi** daripada chanel 7. Hal ini disebabkan karena letak titik pengamatan suhu chanel 8 lebih dekat dengan sumber panas daripada chanel 7, sehingga masih banyak panas yang terdapat pada lokasi tersebut, yang mengakibatkan terjadinya kenaikan suhu

Juga, seiring pergerakan translasi pengelasan, suhu juga semakin menurun. Bisa dilihat perbandingannya pada chanel 7 dan 9 serta chanel 8 dan 10.



Gambar 7. Perbandingan hasil eksperimen & simulasi chanel 17&18

Gambar 7 menunjukkan tren pemanasan dan pendinginan (*heating and cooling*) dari grafik persebaran suhu FSW secara eksperimen maupun simulasi memiliki kemiripan. Ini bisa disebabkan karena parameter yang mempengaruhi pemanasan dan pendinginan, seperti koefisien termal (h) pada simulasi sudah mendekati nilai h pada eksperimen

Didapatkan hasil antara eksperimen dan simulasi **berbeda** di antara variasi waktu pengamatan. Suhu puncak dan waktu terjadinya pada eksperimen chanel 17 & 18 berturut – turut adalah 322,204 °C pada 686 s dan 281,866 °C pada 464 s. Sementara pada simulasi adalah 258,8765 °C pada 800 s dan 258,9981 °C pada 800 s.

Perbedaan nilai suhu puncak antara eksperimen dan simulasi merupakan hal yang wajar. Sangat sulit sekali untuk memperoleh nilai yang benar – benar sama, bisa dikarenakan nilai parameter kondisi nyata saat eksperimen berbeda dengan masukan kondisi batas pada simulasi yang dilakukan, sehingga menghasilkan nilai yang berlainan. Juga, hal ini bisa disebabkan karena pada eksperimen peletakan termokopel tidak

sesuai pada tempatnya, sehingga mempengaruhi nilai suhu yang didapat

Namun, pada eksperimen, suhu puncak pada chanel 17 **lebih tinggi** daripada chanel 18. Hal ini merupakan sebuah penyimpangan dimana seharusnya chanel genap lebih tinggi daripada chanel yang ganjil mengingat posisinya terhadap sumber panas. Kejadian seperti ini bisa disebabkan karena adanya eror pada termokopel pada saat pengukuran. Sementara itu, keluaran simulasi sudah menunjukkan hasil yang sesuai dengan teori.

Secara umum, *temperature history* dari pengukuran eksperimen menggunakan termokopel dibandingkan dengan hasil simulasi komputer menunjukkan perbedaan pada tiap titik. Namun, dilihat dari kecenderungan grafik, keduanya memiliki kemiripan pada kurva naik dan turunnya (*heating and cooling*). Maka, hasil simulasi ini bisa diterima.

Perbedaan nilai suhu puncak antara eksperimen dan simulasi merupakan hal yang wajar. Sangat sulit sekali untuk memperoleh nilai yang benar – benar sama, bisa dikarenakan kondisi nyata saat eksperimen berbeda dengan masukan

kondisi batas pada simulasi yang dilakukan, sehingga menghasilkan nilai yang berbeda

Selain itu, ada faktor lain yang dapat menyebabkan ketidakcocokan antara nilai yang didapat dari hasil eksperimen dengan nilai yang didapat dari hasil simulasi. Antara lain, ketidaksesuaian letak pemasangan termokopel pada benda kerja eksperimen, sehingga mengakibatkan lokasi panas yang diobservasi pada penelitian eksperimen dan simulasi menjadi berbeda, dan menghasilkan nilai yang berbeda pula.

KESIMPULAN

Dari penelitian yang telah dilakukan dan dari analisis data hasil penelitian serta pembahasan grafik yang sudah diuraikan sebelumnya, maka didapatkan kesimpulan bahwa :

1. Pemodelan Volumetrik dari Proses FSW (*Friction Stir Welding*) dengan menggunakan Simulasi *Moving Heat Source* yang ada di penelitian kali ini bisa diaplikasikan pada pemodelan proses perpindahan panas dalam FSW
2. Panas dari gesekan pahat (*shoulder*) dengan benda kerja dapat dimodelkan sebagai *Surface HeatFlux* dan panas akibat deformasi plastis pada pin dapat dimodelkan sebagai *Volumetric HeatGen*
3. Pada penelitian kali ini, perbandingan antara panas yang dihasilkan akibat proses FSW masing – masing pada *shoulder* dan pin adalah 470 : 97 (W) atau 4.8 : 1
4. Tren pemanasan dan pendinginan (*heating & cooling*) dari keluaran simulasi hampir menyerupai tren *heating & cooling* dari hasil eksperimen, kecuali pada chanel 19 ke atas.

5. Terdapat penyimpangan data dari dasar teori pada beberapa chanel dikarenakan ketidakakuratan termokopel dalam melakukan pengukuran suhu akibat berbagai macam faktor

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Amini A. & Asadi P. 2014. *Friction Stir Welding Applications in Industries*. Teheran : Payame Noor University, Iran
- [2] Malde Thesis. 2006. *Thermomechanical Modeling Optimazation Of Friction Stir Welding*. Lousiana: Lousianan State University Press.
- [3] Khaled, Terry. 2005. *An Outsider Looks at FSW*. ANM-112N-05-06-Juli 2005
- [4] Suardi, Samsi. 2008. Pengembangan Sistem FSW pada Material AC4CH. Jakarta : Universitas Indonesia Press
- [5] Rahayu, Deden. 2011. Analisa Proses FSW pada Plat Tipis Aluminium. Jakarta : Universitas Indonesia Press.
- [6] Song & Kovecevic. 2003. *Numerical and Experimental Study of Heat Transfer Process in FSW*. Proc. Instn Mech. Engrs Part B: J. Engineering Manufacture. Vol. 217 : 73-86
- [7] Chao, Qi, dan Tang . 2003. *Heat Transfer In Friction Stir Welding*. Journal Of Manufacturing Science and Engineering Vol 125 : 138-145.
- [8] H. N. B. Schmidt. 2010. *Modelling Thermal Properties in FSW*. HBS Engineering, Denmark
- [9] Colegrove P.A.2003. *Modelling of Friction Stir Welding*. Cambridge : University of Cambridge Press

