

Model Termal Proses Pengelasan Keliling *Multipass* Pada Sambungan Pipa API-X70

Djarot B. Darmadi

Fakultas Teknik Jurusan Mesin

MT Haryono, 167 – Malang (65145)

Telp. : (0341)-553286. Fax : (0341)-551430

E-mail : b_darmadi_djarot@ub.ac.id

Abstract

Thermal model is the first step in a welding model which may be coupled with mechanical and/or metallurgical model and mistakes in thermal model mislead the next steps. This paper discusses validated thermal model using transformed volumetric Goldak's heat source model. Birth and death technique was used to represents growing weld bead. Well matched temperature histories of the model and measurements confirmed the correctness of the proposed thermal model.

Keywords : *Thermal model, Transformed heat source, Birth and death technique*

PENDAHULUAN

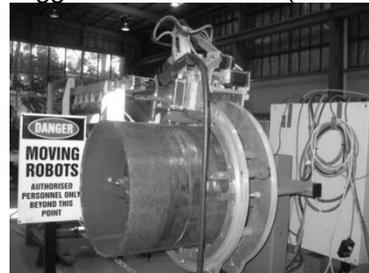
Proses pengelasan menyebabkan siklus thermal yang tidak seragam pada lasan yang merupakan pemicu masalah-masalah pada sambungan las seperti kegagalan fatik prematur, korosi-retak-tegangan (SCC), retak hidrogen (HICC) dan patahan [1]. Evaluasi distribusi temperatur transient pada lasan merupakan aspek penting dalam kontrol kualitas lasan dan merupakan alat bantu dalam penentuan prosedur standar pengelasan (WPS) [2].

Rosenthal [3] mengajukan penyelesaian analitik untuk model sumber panas berupa titik yang dapat digunakan untuk memprediksi siklus thermal pada proses pengelasan. Beberapa penyelesaian analitik diajukan setelah Rosenthal [4-7]. Dengan perkembangan baik aspek kecepatan maupun kapasitas dari komputer, penyelesaian fenomena pengelasan dengan metode numerik khususnya metode elemen hingga (MEH – FEM) semakin populer dibanding penyelesaian secara analitik. Salah satu kelebihan metode numerik dibanding cara analitik adalah kemampuannya untuk menyelesaikan jawaban bagi geometri dan kondisi batas yang kompleks yang sering sulit untuk diselesaikan dengan metode analitik. Parameter yang rumit, semisal sifat termal bahan yang tergantung dengan temperature juga dapat diselesaikan dengan metode numerik menggunakan teknik iterasi hingga diperoleh jawaban yang konvergen.

Isu sentral dari metode numerik adalah keakuratan dari model yang dikembangkan. Cara paling mudah untuk menguji keakuratan dari sebuah model adalah membandingkan hasil yang diperoleh dengan data eksperimen atau biasa disebut dengan validasi dari model.

METODE PENELITIAN EKSPERIMENTAL

Proses pengelasan keliling pada pipa dilakukan pada jig yang disiapkan khusus untuk kajian ini. Jig tersebut memungkinkan kontrol otomatis terutama untuk menjaga kecepatan pengelasan dan alur pengelasan. Sepasang pipa X70 (ferritic steel) berdiameter 420mm, panjang 210mm dan tebal 8mm disambung dengan las keliling seperti terlihat pada Gambar 1. Proses pengelasan menggunakan mesin GMAW Lincoln-STT (*Surface Tension Transfer*) dengan arus konstan. Prosedur pengelasan yang disarankan ditampilkan pada Tabel 1. Parameter pengelasan diukur secara “real-time” menggunakan AMV4000 (Gambar 2)



Gambar 1. Jig untuk pengelasan keliling.

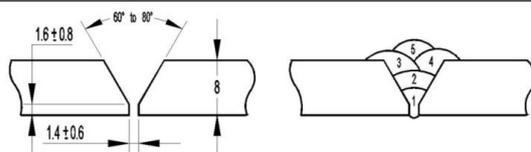


Gambar 2. AMV 4000

Siklus termal pada posisi tertentu diukur dengan sensor termokopel dengan menggunakan data logger USB 6211. Gap dipersiapkan mengikuti standar AS 2885.2 beserta rencana layer dari kampuh las seperti terlihat pada Gambar 3.

Tabel 1. Parameter pengelasan untuk baja paduan [8, 9].

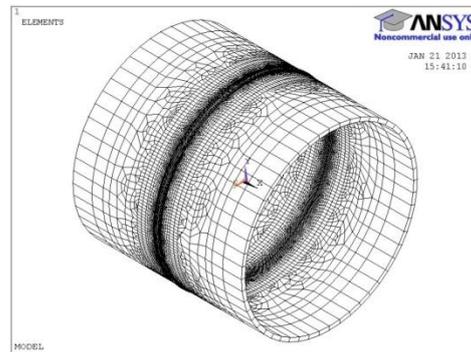
Included angle	60°
Root opening	1.6 – 2.8 mm
Root face (land)	1.6mm
Welding position down	5G vertical
Shielding gas	90%Argon
Backing gas	NA
Electrode (φ 1.2mm)	L-56 ER70S-6
Peak current	30A
Background current	55-65A
Tail-out current	0
Wire feed speed	3m/min



Gambar 3. V-gap dan desain kampuh las

MODEL ELEMEN HINGGA

Proses pengelasan pada tulisan ini disimulasikan menggunakan program paket ANSYS. Profil mesh dari pipa ditunjukkan pada Gambar 4. Pada daerah dekat dengan kampuh las perlu dilakukan meshing yang halus agar dapat memodelkan panas yang diinputkan oleh *welding-torch* dan karena alasan gradient temperature yang tinggi pada daerah ini. Model terdiri atas 78380 element SOLID70 dan 94976 nodal.

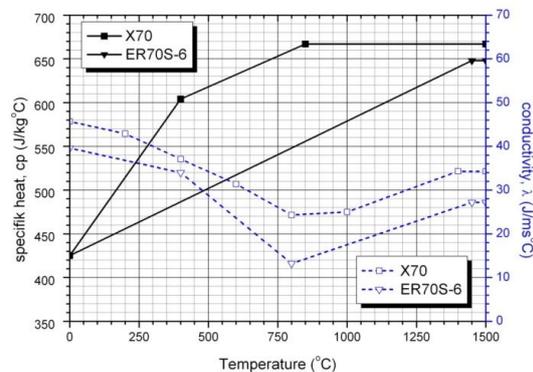


Gambar 4. Meshing pada model pipa

Sifat termis (*thermal properties*) dari material merupakan fungsi temperatur dan ditampilkan secara grafis pada Gambar 5 untuk logam induk maupun logam pengisi. Massa jenis dianggap konstan $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$. Penampang lintang kampuh las diprediksi berdasar desain pada Gambar 3 dan persamaan 1 untuk menghitung penampang lintang tiap-tiap pass.

$$A_{wb} = \frac{\pi d^2 \cdot wfs}{4 \cdot v} \tag{1}$$

d adalah diameter dari logam pengisi, wfs adalah kecepatan pengumpanan dari logam pengisi dan v adalah kecepatan pengelasan.



Gambar 5. Sifat thermis logam induk dan pengisi

Proses pengelasan dimodelkan dengan campuran model sumber panas uniform dan model panas volumetrik oleh Goldak [10]. Panas uniform mewakili panas yang diberikan oleh logam pengisi dan model Goldak untuk merepresentasikan input panas oleh busur las ke logam induk. Logam pengisi pada pengelasan busur bisa mencapai suhu

2400°C[11], sehingga laju panas yang diperlukan untuk memanaskan logam pengisi dari suhu ruang hingga 2400°C dapat dihitung dengan persamaan 2.

$$\dot{q}_{filler} = A_{wb} v c_p \Delta T \tag{2}$$

Perlu diingat bahwa c_p harganya berubah mengikuti temperatur, dan harga $A_{wb}v$ untuk layer tertentu berharga konstan sehingga harga \dot{q}_{filler} dihitung berdasar integral $A_{wb}v \int_{RT}^{2400} c_p dT$. Panas yang diterima oleh logam induk dari *welding torch* dapat dihitung berdasar persamaan 3.

$$\dot{q}_{torch} = EI - \dot{q}_{filler} \tag{3}$$

Nilai daya listrik EI dapat diperoleh dari data pengukuran AMV 4000. Tidak seperti panas oleh logam pengisi, panas yang diinputkan oleh busur las terdistribusi menurut persamaan Goldak seperti terlihat pada (4).

$$\dot{q}'''_{(t,n,l)} = \frac{6\sqrt{3}\dot{q}_{torch}}{\pi\sqrt{r_t r_n r_l}} \exp\left(-\frac{3t^2}{r_t^2} - \frac{3n^2}{r_n^2} - \frac{3l^2}{r_l^2}\right) \tag{4}$$

Besarnya panas yang diinputkan pada elemen tertentu dengan posisi relatif terhadap sumber panas (t,n,l) yakni jarak transversal, normal dan longitudinal tergantung terhadap posisi relatifnya dan karakteristik dari busur las (r_t, r_n, r_l) . Nilai r_t, r_n dan r_l secara berturut-turut adalah 5mm, 2mm dan 3mm[12].

Persamaan 4 pada pusat dari sumber panas (0,0,0) berharga maksimum seperti pada persamaan 5.

$$\dot{q}'''_{(max)} = \frac{6\sqrt{3}\dot{q}_{torch}}{\pi\sqrt{r_t r_n r_l}} \tag{5}$$

dan persamaan 4 dapat ditulis ulang dalam bentuk persamaan 6.

$$\dot{q}'''_{(t,n,l)} = \dot{q}'''_{(max)} \exp\left(-\frac{3t^2}{r_t^2} - \frac{3n^2}{r_n^2} - \frac{3l^2}{r_l^2}\right) \tag{6}$$

Secara ringkas parameter yang perlu diinputkan untuk tiap-tiap pass ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel2. Parameter model sumber panas

Layer	Power (V. A)	A _{wb} (mm ³)	H _{filler} (W)	Hgoldak (W)	q _{max} (GW/m ³)
1	1950	11.3	612.51	1337.49	83.21
2	2722	15.0	813.62	1908.38	118.72
3	2500	14.9	810.02	1689.98	105.13
4	2500	14.9	807.41	1292.59	105.30
5	1950	11.0	597.17	1352.83	84.16

Panas latent

Panas latent diperlukan tidak hanya saat transformasi dari padat ke cair tapi juga saat terjadi transformasi fasa. Saat berubah fase ke austenite dibutuhkan panas latent 4200 J/mol[13]. Komposisi dari logam induk dan logam lasan dapat dilihat pada Tabel 3. Dengan memperhatikan komposisinya, panas latent saat transformasi austenite dapat dihitung.

Tabel 3. Komposisi logam induk dan pengisi

	%C	%Mn	%Si	%S	%P
Wire	0.08-0.09	1.42-1.65	0.81-0.87	0.006-0.010	0.004-0.010
BM	0.053	1.9	0.19	0.0008	0.012
	%Cr	%Ni	%Mo	%V	%Cu
Wire	0.01-0.05	≤0.04	≤0.01	≤0.01	0.17-0.22
BM	0.01	0.17	0.24	0.044	0.01
	%Ca	%N	%Nb	%Ti	%Al
Wire	-	-	-	-	-
BM	0.0033	0.0047	0.043	0.023	0.042

$$\Delta H_M^{func} \left(\frac{J}{mol} \right) = 0.041T^2 - 0.078T - 5079.047 \tag{7}$$

Panas latent saat transformasi martensite dapat dihitung berdasar beda enthalpy pada temperatur M_s dan M_f yakni temperature saat dimulainya dan berakhirnya transformasi martensite. Enthalpy pada temperatur tertentu dapat dihitung berdasar persamaan yang diajukan oleh Lee[14] seperti terlihat pada persamaan (7).

Tabel 4. Panas latent

	Latent Heat (kJ/kg)		Temperature range (°C)	
	Base Metal	Filler	Base Metal	Filler
Martensite	75.07	66.51	456 - 200	427 - 200
Austenite	25.35	26.27	760 - 760	920 - 920
Melting		270	1450 - 1450	1500 - 1500

Temperatur awal transformasi martensite dapat dihitung berdasar komposisinya seperti terlihat pada persamaan (8) yang telah diusulkan oleh Andrew[15]; sedangkan M_f dianggap sama dengan 200°C.

$$M_s = 539 - 423C - 30.4Mn - 12.1Cr - 17.7Ni - 7.5Mo \tag{8}$$

Panas latent saat terjadi transformasi dari fase padat ke fase cair adalah 270 kJ/kg pada rentang temperature 1450°C - 1727°C [16].

Secara ringkas panas latent diTabelkan seperti terlihat pada Tabel 4.

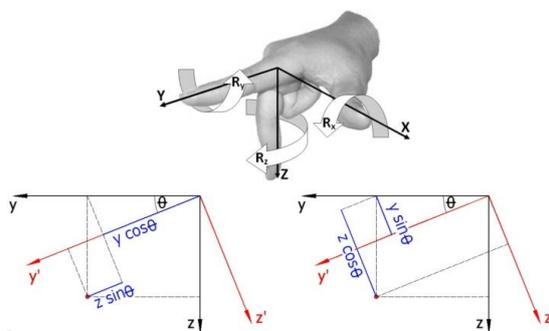
Teknik Birth and Death

Kampuh las secara aktual tumbuh sesuai dengan posisi *welding torch* dan pass dari pengelasan. Untuk geometri yang tumbuh seperti itu bisadilakukan dengan model geometri yang benar-benar tumbuh dan dilakukan meshing ulang (*remeshing*). Teknik meshing ulang seperti itu memerlukan program yang lebih rumit dan waktu simulasi yang lebih lama. Pada tulisan ini digunakan teknik *birth and death*, yakni dengan menonaktifkan seluruh elemen kampuh las kemudian elemen yang sesuai diaktifkan kembali.

Transformasi koordinat

Untuk dapat diaplikasikan dalam pengelasan pipa, model sumber panas serta teknik *birth and death* harus ditransformasikan dalam koordinat silindris.

Aturan koordinat Cartesian mengikuti kaidah tangan kanan seperti pada Gambar 6. Membandingkan Gambar 4 dan Gambar 6 dapat disimpulkan koordinat silindris adalah koordinat Cartesian yang diputar terhadap sumbu x (R_x).



Gambar 6. Transformasi koordinat.

Hubungan antara koordinat Cartesian dengan koordinat silindris dapat diperoleh dari persamaan 9.

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & \sin\theta \\ 0 & -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \tag{9}$$

Model panas Goldak pada persamaan 4 menyatakan posisi elemen relatif terhadap pusat sumber panas setelah ditransformasikan dengan menggunakan persamaan 7. Koordinat Cartesian pada Gambar 4 biasa disebut dengan koordinat global dan koordinat relatif terhadap sumber panas biasa disebut dengan koordinat lokal. Jika sumber panas dalam koordinat global adalah (x_c, y_c, z_c) sedangkan sembarang elemen memiliki koordinat (x, y, z) maka dalam koordinat lokal posisi elemen tersebut dapat dinyatakan sebagai:

$$\begin{pmatrix} t \\ n \\ l \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & \sin\theta \\ 0 & -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x - x_c \\ y - y_c \\ z - z_c \end{pmatrix} \tag{10}$$

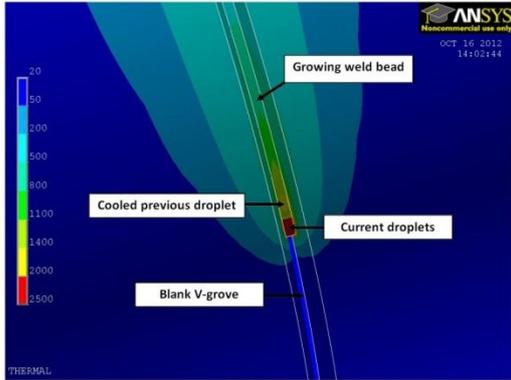
Dengan θ diperoleh dari persamaan 11.

$$\theta = \arcsin \frac{z_c}{\sqrt{y_c^2 + z_c^2}} \tag{11}$$

Menggunakan teknik *birth and death* dengan contoh geometri model pada saat tertentu ditampilkan pada Gambar 7. Mengaplikasikan sumber panas dari persamaan 2 dan 4 diperoleh distribusi temperatur seperti ditampilkan pada Gambar 8. Berdasar Gambar 8 dapat disimpulkan dengan transformasi koordinat dan teknik *birth and death* diperoleh model proses pengelasan yang masuk akal.



Gambar 7. Geometri dengan *birth and death*



Gambar 8. Profil temperatur pada pipa

Tabel 5. Koordinat transversal termokopel dan nodal dari model FEM.

Termokopel	measured (mm)	GCS (mm)	Nodes	GCS (mm)
Tc1	1.86	2.86	4	1.000
Tc2	3.30	4.30	47055	2.800
Tc3	3.70	4.70	47056	4.600
			47057	6.400
Tc4	1.50	6.54	27908	6.328
Tc5	2.20	7.24	46397	7.552
Tc6	3.20	8.24	46398	8.776
Tc7	3.60	8.64	46068	10.000

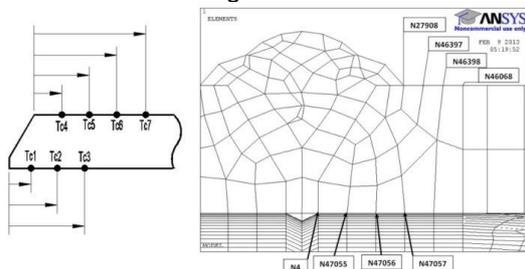
Validasi Model

Validasi adalah membandingkan hasil model dengan data eksperimen. Data eksperimen adalah siklus termal dari posisi tertentu yang dimonitor dengan menggunakan termokopel. Pada Gambar 9 ditampilkan perbandingan data termokopel dan prediksi dari model FEM. Dengan alasan kondisi praktis, jarak transversal dari termokopel diukur dari tepi gap seperti terlihat pada Gambar 9 yang kemudian ditransformasikan dalam koordinat global seperti terlihat pada Tabel 5.

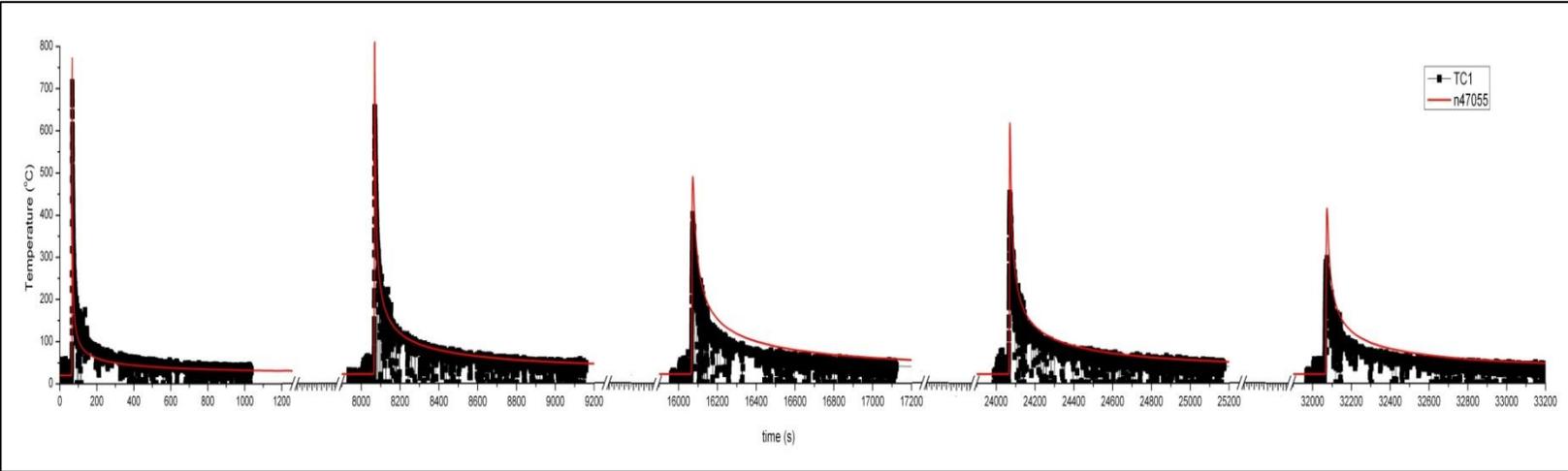
Pada Gambar 9 juga diperlihatkan meshing dari model FEM dengan beberapa nodal pada posisi disekitar termokopel. Posisi transversal nodal-nodal tersebut dalam koordinat global ditampilkan pada Tabel 3 untuk dibandingkan dengan posisi termokopel. Dari Tabel 3 dapat dilihat Tc1 dapat dibandingkan dengan nodal 47055, Tc2 dan Tc3 dengan nodal 47056, Tc4 dengan nodal 27908, Tc5 dan Tc6 dengan nodal 46397 dan Tc7 dengan nodal 46398.

PEMBAHASAN

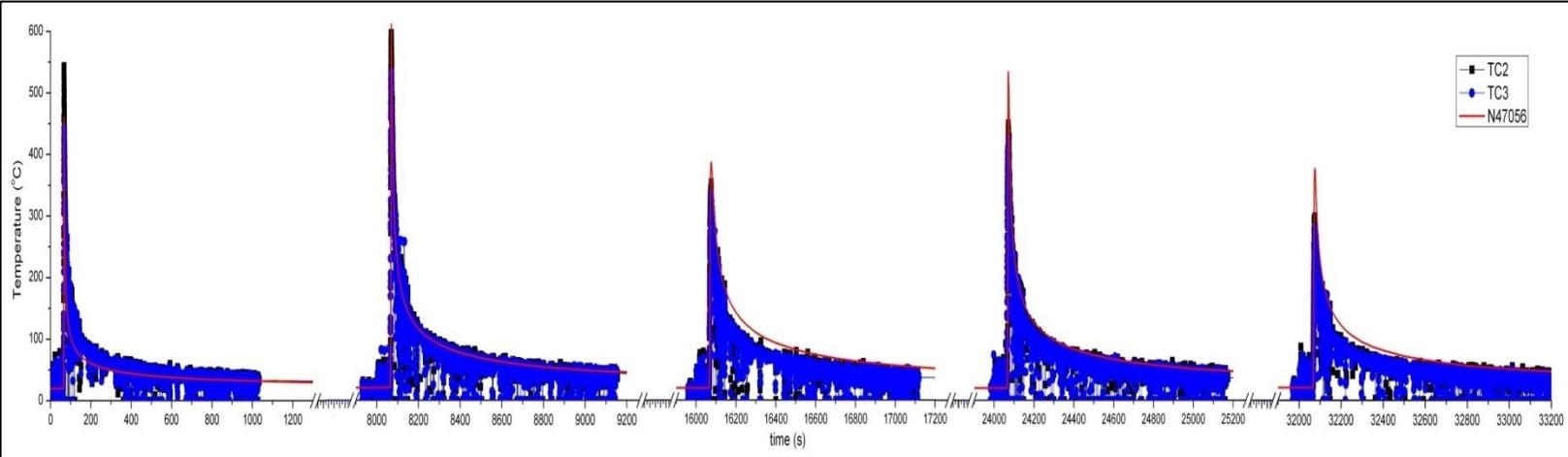
Seperti telah dinarasikan pada bagian pendahuluan, isu sentral dari pemodelan adalah akurasi dari model. Cara termudah untuk menguji akurasi dari sebuah model adalah dengan membandingkan hasil simulasi dari sebuah model dengan hasil pengukuran atau sering disebut dengan validasi. Validasi dari model termal pada tulisan ini adalah dengan membandingkan siklus termal hasil simulasi dari model FEM dengan siklus termal dari pengukuran dengan termokopel. Titik-titik yang dibandingkan dengan termokopel yang bersesuaian dapat dilihat pada Tabel 5. Hasil validasi ditampilkan pada Gambar 9. Perlu dicatat disini bahwa termokopel Tc4 terlepas saat dilakukan pengelasan pada pass 4, sehingga data Tc4 tidak dipergunakan untuk validasi.



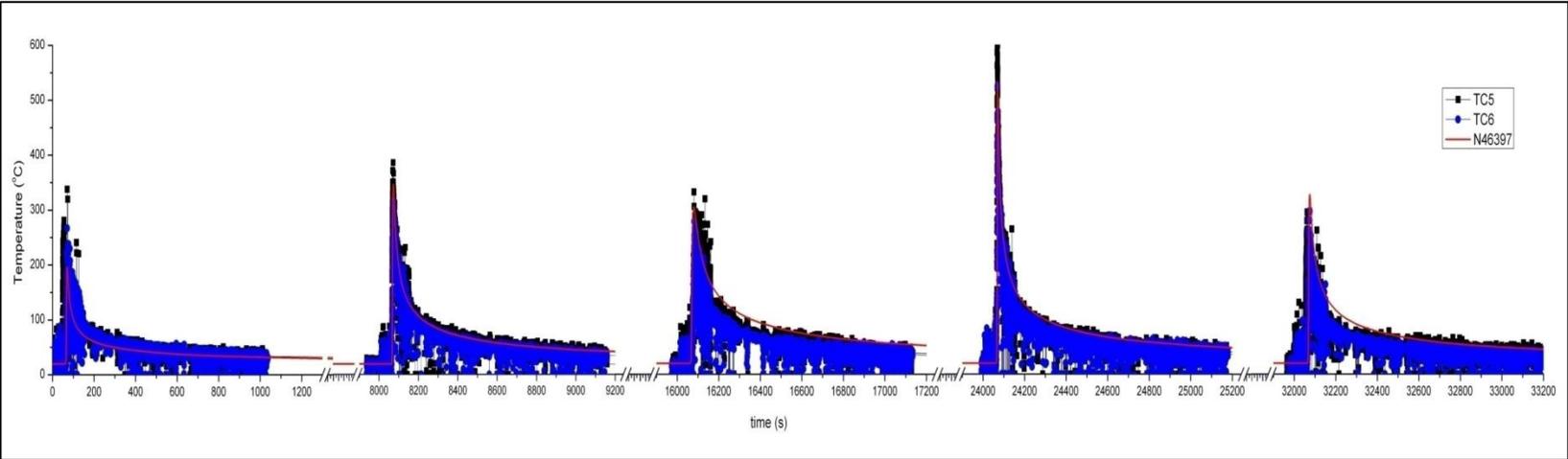
Gambar 9. Mengukur posisi termokopel (kiri) dan posisi nodal yang setara pada model FEM.



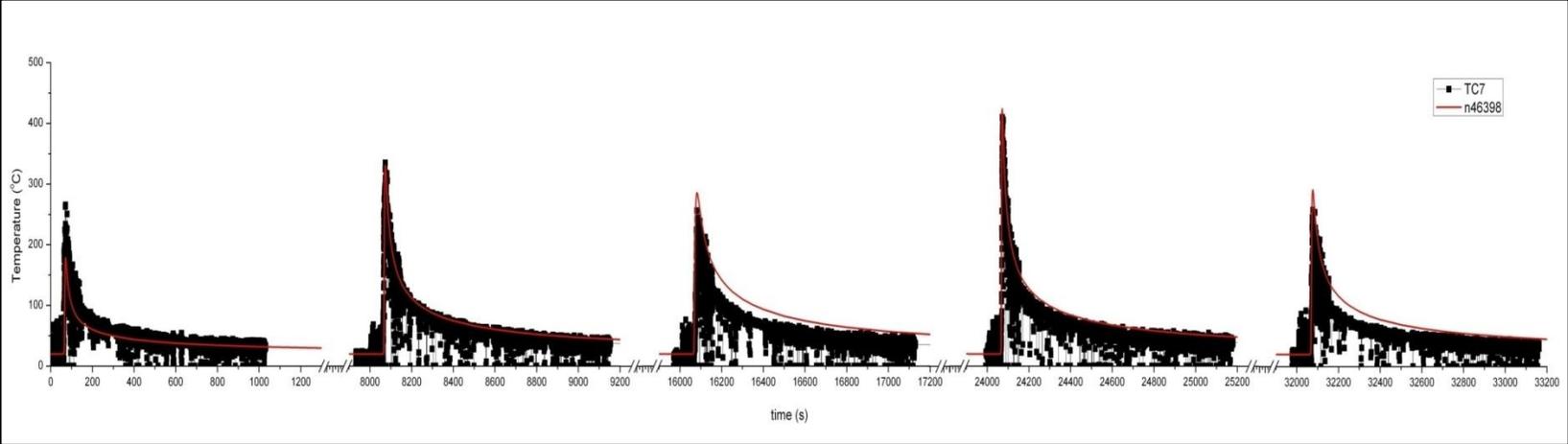
(a)



(b)



(c)



(d)

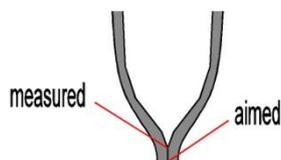
Gambar 9. Validasi dari siklus termal untuk nodal (a) 47055, (b) 47056, (c) 46397, (d) 46398.

Dari Gambar 9 dapat dikatakan model FEM menghasilkan prediksi untuk siklus termal yang cukup baik. Penyimpangan yang terjadi disebabkan beberapa penyederhanaan pada model FEM dan ketidakakuratan pada metode eksperimen. Beberapa penyederhanaan pada model FEM tersebut antara lain:

- Kontak antara jig dan pipa tidak dimodelkan. Dengan adanya kontak tersebut pada kondisi aktual sebagian panas dipindahkan ke jig menyebabkan laju pendinginan yang lebih tinggi.
- Input panas pada model FEM diwakili dengan nilai rata-ratanya sedangkan input panas aktual bervariasi sepanjang lasan.

Dari sisi metode eksperimen (pengukuran) beberapa kekurangan yang terjadi antara lain disebabkan oleh:

- Perbedaan antara penampang lintang lasan yang direncanakan dengan penampang lintang aktual.
- Sedikit kesalahan dalam mengidentifikasi posisi termokopel dan karena posisi termokopel sangat dekat dengan kampuh las, sedikit kesalahan tersebut menyebabkan perbedaan temperatur puncak yang cukup signifikan.



Gambar 10. Kesalahan akibat pemasangan termokopel

- Perbedaan posisi dari temperatur terukur disebabkan pemasangan termokopel seperti ditunjukkan pada Gambar 10. Seperti terlihat, temperatur terukur sedikit bergeser dari posisi yang diharapkan. Selain perbedaan posisi, temperatur terukur juga memiliki kondisi yang berbeda dengan posisi yang diharapkan yang menyebabkan koefisien panas konveksi yang berbeda. Semakin besar diameter termokopel semakin besar pergeseran jarak posisi target dengan posisi terukur. Dengan termokopel yang digunakan pada metode eksperimen ini, yakni termokopel berdiameter 0,5mm,

terjadi pergeseran yang bervariasi dalam rentang 1-1,5 mm.

KESIMPULAN

Analisa panas pada proses pengelasan keliling pipa telah dapat dimodelkan dengan baik. Sumber panas oleh lasan dapat dimodelkan dengan campuran antara sumber panas uniform yang mewakili logam pengisi dan model panas Goldak yang mewakili panas yang diinputkan oleh busur las.

Kampuh lasan yang berubah seiring dengan waktu dapat dimodelkan dengan menggunakan teknik *birth and death* tentu setelah dilakukan transformasi koordinat dari koordinat global ke koordinat silinder.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] PJ Withers, *Residual stress and its role in failure*, Reports on Progress in Physics, vol.70, pp. 2211 – 2264, 2007.
- [2] Viorel Deaconu, *Finite Element Modeling of Residual Stress – A Powerful Tool in The Aid of Structural Integrity Assessment of Welded Structures*. 5th Int. Conference Structural Integrity of Welded Structures, Romania, 2007.
- [3] D. Rosenthal (1946) *The Theory of Moving Source of Heat and Its Application to Metal transfer*. Trans. ASME, Vol.43 no.11.
- [4] H.S. Carslaw and J.C. Jaeger (1959) *Conduction of Heat in Solid*. Clarendon Press, Oxford.
- [5] Paley, Zvi; Lynch, J.N. and Adam C.M. JR. (1964) *Heat Flow in Welding Heavy Steel Plate*, Welding Research Supplement, pp.71-79.
- [6] N. Christensen, V. Davies and K. Gjermundsen (1965) *Distribution of Temperature in Arc Welding*. British Welding Journal 12(2), pp. 54-75.
- [7] C.L. Tsai (1982) *Heat Flow in Fusion Welding*. Proceeding of The Conference on Trends in Welding Research in the United States, ASM International, New Orleans, pp.91 – 108.
- [8] Lincoln Electric, *SuperArc L-56 – Mild Steel, Copper Coated AWS ER70S-6 & EH11K*, http://www.lincolnelectric.com/assets/en_us/Products/Consumable_

- MIGMAW Wires-SuperArc-SuperArcL-56/c4105.pdf.
- [9] The Lincoln Electric Company, *MIG & TIG GMAW/GTAW consumable*, <http://www.iwsc.co.kr/data/goodsimages/520110530155236.pdf>.
- [10] John Goldak, Aditya Chakravarti and Malcolm Bibby (1982) *A New Finite Element Model for Welding Heat Sources*, Metallurgical Transactions B, Vol.15B, pp.299 – 305.
- [11] M.J. Painter and M.H. Davies, *Numerical Modeling of The Gas Metal Arc Welding Process*, Annual Report – CRC Project: 93.04; 1994.
- [12] Djarot B. Darmadi, Anh Kiet Tieu and John Norrish, *A validated thermal model of bead-on-plate welding*, Heat and Mass Transfer, vol.48, pp.1219 – 1230, 2012.
- [13] R.A. Jaramillo, G.M. Ludtka, R.A. Kisner, D.M. Micholson, J.B. Wilgen, G. Mackiewicz-Ludka, N. Bembridge and P.N. Kalu (2005), *Investigation of phase transformation kinetics and microstructural evaluation in 1045 and 52100 steel under large magnetic field, Solid-to-solid phase transformations in inorganic materials: Diffusional transformations*, edited by J.M. Howe, D.E. Laughlin, J.K. Lee, U. Dahmen, W.A. Soffa, The Minerals, Metals and Materials Society, pp. 893-898.
- [14] Seok-Jae Lee and Young-Kook Lee (2009), *Latent heat of martensitic transformation in a medium-carbon low-alloy steel*, Scripta Materialia, vol. 60, pp. 1016 – 1019.
- [15] K.W. Andrews (1960), *Empirical formulae for the calculation of some transformation temperature*, J. Iron Steel Res. Int. 203, pp. 721 – 727.
- [16] RWK Honeycombe and HKDH Bhadeshia (1995), *Steels microstructure and properties*, 2nd edition, Gray Publishing, UK.