ANALISIS MATEMATIS PENGELASAN *GREY CAST IRON* MENGGUNAKAN PROSES GTAW DENGAN DAN TANPA *PREHEAT*

Murti Marinah¹⁾, Doty Dewi Risanti²⁾, Irwansyah, Detak Yan Pratama³⁾, Asep Suharto⁴⁾,
Muhammad Fadila¹⁾

^{1,2,3)} Departemen Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya

⁴⁾ Maintenance & Utilities Dept. PT. Vale Indonesia Tbk, Sorowako

Email: risanti@ep.its.ac.id *)

ABSTRAK

Pemberian pemanasan awal pada proses pengelasan memberikan efek pengurangan tegangan, distorsi, retakan dan kekerasan pada daerah *Heat Affected Zone* (HAZ) dengan memperlambat laju pendinginan. Distribusi temperatur saat pengelasan didekati dengan menggunakan persamaan analitik Rosenthal pada logam *grey cast iron*. *Grey cast iron* termasuk sulit untuk dilas dan memerlukan perlakuan khusus. Pada penelitian ini, perhitungan distribusi temperatur dan laju pendinginan dibandingkan dengan struktur mikro dan kekerasan untuk *grey cast iron* yang dilas dengan menggunakan *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW). Persamaan Rosenthal dengan solusi Bessel hanya cocok untuk distribusi temperatur pada daerah lelehan, sedangkan solusi *quasi steady state* dapat digunakan untuk prediksi distribusi temperatur arah lateral dan transversal pada logam lasan. *Preheating* pada suhu 315 °C berpengaruh pada lebar HAZ yang dihasilkan menurut persamaan eksponensial terhadap *travel speed*, memperlambat laju pendinginan dan menurunkan kekerasan karena berkurangnya *carbon equivalent* (CE). Struktur mikro HAZ pada *grey cast iron* yang diberi *preheating* menunjukkan dominasi martensit nikel dan eutektik ledeburit, sedangkan tanpa *preheating* menghasilkan struktur mikro didominasi oleh eutektik ledeburit dan besi karbida dalam *white iron*.

Kata kunci: GTAW, Grey Cast Iron, Persamaan Rosenthal, Preheating, Laju Pendinginan

ABSTRACT

Preheating in the welding process reduces stress, distortion, cracks, and hardness in the Heat Affected Zone (HAZ) by slowing down the cooling rate. In this study, welding's temperature distribution is approximately using Rosenthal's analytical equation for grey cast iron. Grey cast iron is difficult to weld and requires special precautions. The calculated temperature distribution and cooling rate were compared with the obtained microstructure and hardness for grey cast iron samples welded using Gas Tungsten Arc Welding (GTAW). Rosenthal's equation using Bessel's solution is only suitable for temperature distribution in the melt pool; in contrast, the quasi-steady-state solution can be used to predict the lateral and transverse temperature distribution of the welded metal. Preheating at a temperature of 315 affects the resulting HAZ width according to the exponential equation for travel speed, slows down the cooling rate, and reduces hardness due to reduced carbon equivalent (CE). The microstructure of grey cast iron HAZ, which was given preheating, showed the dominance of nickel martensite and eutectic ledeburite; the microstructure was dominated by eutectic ledeburite and iron carbide within white iron.

Keywords: GTAW, Grey Cast Iron, Rosenthal Equation, Preheating, Cooling Rate

1. PENDAHULUAN

Grey cast iron merupakan besi tuang yang mikrostrukturnya terdiri dari grafit dalam bentuk *flake* yang berada di dalam matriks *ferrous*. Secara komposisi biasanya *grey cast iron* mengandung 2,5-4% karbon, 1-3% silikon dan 0,1-1,2% mangan. Kekuatan mekanik *grey cast iron* bergantung pada matriksnya yang mengandung grafit dalam bentuk karbon bebas. Matriksnya dapat berupa ferit hingga perlit dan kombinasi dari kedua fasa tersebut. Grafit *flake* dalam ukuran yang besar dapat menurunkan kekuatan dan keuletan (Singh, 2016).

Grey cast iron dengan struktur mikro grafit dalam matriks austenit tertransformasi dan semenit bersifat lunak. *Flake* grafit yang ada di dalam struktur

mikronya berbentuk seperti roset dalam 3 dimensi mempunyai densitas rendah yang mampu menahan penyusutan saat proses pengecoran (Singh, 2016).

Flake grafit mempunyai karakteristik peredaman dan *machineability* yang baik karena grafit bertindak sebagai *chip breaker* dan melumasi alat potong. Dalam aplikasi yang berhubungan dengan keausan, grafit berguna untuk menjaga pelumasan. Namun demikian grafit bersifat sebagai konsentrasi tegangan yang menurunkan ketangguhan (Singh, 2016).

Pada proses pengelasan pada umumnya, siklus pemanasan dan pendinginan menyebabkan material mengalami ekspansi dan kontraksi, yang menyebabkan tegangan tarik saat kontraksi terjadi.

Pada saat seperti itu, grafit dalam bentuk *flake* dapat menyebabkan terjadinya kegagalan. Pada saat proses pengelasan jumlah karbon yang tinggi akan berdifusi ke dalam fasa austenit, membentuk fasa yang keras dan getas yaitu martensit dan karbida pada antarmuka lasan (Bhatnagar & Gupta, 2016).

Salah satu cara untuk menghindari terbentuknya martensit dan karbida pada lasan adalah dengan mengendalikan laju pendinginan dan komposisi pada daerah lasan melalui pemilihan *filler metal* yang tepat. *Filler* dari nikel diketahui dapat mencegah terbentuknya martensit dan karbida (Pouranvari, 2010). Cara lain adalah dengan pemberian *preheating*. *Preheating* juga mengurangi *residual stress*, distorsi, mencegah *cold cracking* dan menurunkan hardness di daerah *heat affected zone* (HAZ) (Bhatnagar & Gupta, 2016).

Sebelumnya telah dilakukan studi eksperimental pengelasan pada *nodular cast iron* (Laisa, Sulistijono, & Awali, 2018) dan *grey cast iron* (Suharto, Risanti, & Sekartedjo, 2019) dengan menggunakan *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW). GTAW menghasilkan kualitas las yang baik karena adanya gas pelindung yang mempengaruhi efisiensi termal dan peleburan logam. Penelitian tentang aplikasi las GTAW dengan menggunakan *preheating* seperti pada (Suharto, Risanti, & Sekartedjo, 2019) dan (Arifin, 2013).

Faktor yang mempengaruhi perubahan struktur mikro lasan antara lain nilai *travel speed*. *Travel speed* yang besar akan memperkecil *heat input*, dengan demikian *cooling rate* akan meningkat. *Cooling rate* berhubungan dengan kekerasan dari lasan, semakin besar *cooling rate* semakin besar kekerasan yang mengakibatkan material akan menjadi semakin getas (Kumar, Arya, & Saxena, 2014). Oleh karena itu, pada studi ini akan dilakukan analisis secara matematis proses pengelasan *grey cast iron* dengan GTAW dengan menggunakan persamaan *Rosenthal* untuk variasi *preheating* dan *travel speed* pengelasan.

2. METODE PENELITIAN

2.1. Material Grey Cast Iron

Pada studi kali ini, identifikasi masalah dilakukan pada dimensi dan sifat material *grey cast iron* ASTM A48 Class 40 dengan komposisi pada Tabel 1. Elektroda pengelasan menggunakan ERNi-Cl (Cascade 17T) diameter 3,2 mm dengan komposisi seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi kimia material dasar (*base metal*) dan elektroda lasan yang digunakan (Suharto, Risanti, & Sekartedjo, 2019).

Elemen	Grey Cast Iron (wt%)	Elektroda (wt%)
C	5,135	0,037
Si	1,672	0,44
S	0,103	0,24
P	0,050	-

Mn	0,672	0,24
Ni	1,198	Bal.
Cr	0,278	-
Mo	0,436	-
Cu	0,251	0,02
Sn	0,030	-
Fe	Bal.	0,02

Adapun bentuk daerah lasan diilustrasikan seperti pada Gambar 1.

Gambar 1. Ilustrasi daerah *heat affected zone* (HAZ), *weld metal* (WM) dan *base metal* (BM) di sekitar *root pass* pada sampel #85 (tanpa *preheating*) dan #86 (dengan *preheating*).

Komposisi pada *root pass* dan daerah HAZ ditabulasikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Komposisi kimia pada *root pass* dan daerah HAZ yang digunakan (Suharto, Risanti, & Sekartedjo, 2019).

Elemen	Tanpa preheat (wt%)	Dengan preheat (wt%)
C	42,3	27,1
O	7,53	4,9
Si	1,06	0,44
Cr	0,20	0,24
Fe	47,86	63,79
Ni	0,47	0,72
Cu	0,19	0,34
Mo	0,39	1,43
Total	100	100

Perhitungan CE *cast iron* menggunakan persamaan (Winiczenko, Kaczorowski, & Skibicki, 2018):

$$CE = w_C + 0,31 \cdot w_{Si} + 0,33 \cdot w_P + 0,45 \cdot w_S - 0,028 \cdot w_{Mn} \quad (1)$$

Berdasarkan persamaan (1), nilai *carbon equivalent* (CE) dari material dasar, akar lasan dan daerah HAZ dihitung menggunakan data komposisi dari Tabel 2. Hasil perhitungan ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Nilai CE untuk masing-masing zona lasan dihitung dari pengujian komposisi

Daerah Lasan	Nilai CE
--------------	----------

BM	0,056
WM tanpa <i>Preheat</i>	0,104
WM dengan <i>Preheat</i>	0,062
HAZ tanpa <i>Preheat</i>	0,425
HAZ dengan <i>Preheat</i>	0,275

2.2. Model Matematis Yang Digunakan

Perhitungan untuk distribusi suhu sebelum pemanasan awal dan setelah pemanasan awal dilakukan dengan menggunakan persamaan Rosenthal (Nasiri & Enziger, 2019) dimana pada kasus pengelasan ini, diasumsikan sumber panas bergerak, sehingga solusi persamaan Rosenthal untuk distribusi temperatur yang dihasilkan oleh sumber panas bergerak dapat dituliskan menurut hukum konservasi energi:

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v \nabla T \right) = \nabla \cdot (k \nabla T) + \dot{Q} \quad (2)$$

Jika sumber panas bergerak sepanjang sumbu-x, sifat fisika dan distribusi suhu di sekitar sumber panas diasumsikan tetap, maka persamaan (2) dapat dituliskan dalam keadaan *quasi-steady state*:

$$w = x - vt \quad (3)$$

$$\frac{\rho c v}{k} \frac{\partial T}{\partial w} = \nabla^2 T + \frac{\dot{Q}}{k} \quad (4)$$

Menurut asumsi yang digunakan oleh Rosenthal (Rosenthal, 1948) maka solusi umum dari persamaan (3) pada pelat semi tak berhingga menjadi:

$$T - T_0 = \frac{q}{2\pi k d} e^{-\frac{v(w+R)}{2\alpha}} \quad (5)$$

dimana:

T = suhu ($^{\circ}\text{C}$)

T_0 = suhu awal pelat las ($^{\circ}\text{C}$)

q = input daya (Watt)

k = konduktivitas termal ($\frac{\text{W}}{\text{mK}}$)

R = jarak ke pusat pengelasan (*arc*) = $\sqrt{w^2 + y^2 + z^2}$

v = *travel speed* (m/s)

α = difusivitas termal material = $\frac{k}{\rho c_p}$

c_p = panas spesifik (J/kg.K)

Persamaan lain yang digunakan sebagai pembanding adalah persamaan Rosenthal dengan solusi radial *quasi-stasioner* fungsi Bessel termodifikasi (Nunes, 1983):

$$T - T_0 = \frac{q}{2\pi k d} e^{-\frac{v}{2\alpha} x} K_0\left(\frac{v}{2\alpha} R\right) \quad (6)$$

dengan:

K_0 = Fungsi Bessel orde nol jenis ketiga

d = setengah dari tebal plat pengelasan (Messler, 2004) = 6 mm

Input daya sendiri didefinisikan sebagai:

$$q = \eta EI \quad (7)$$

dengan η adalah efisiensi pengelasan, E adalah tegangan yang digunakan saat pengelasan (volt) dan

I adalah arus yang digunakan saat pengelasan (ampere). Simulasi untuk distribusi temperatur dilakukan dengan menggunakan persamaan (5) dan (6) pada kondisi dengan dan tanpa pemanasan awal (315°C) serta variasi kecepatan pengelasan antara 0,5 dan 5 mm/s. Sedangkan untuk input daya, efisiensi *arc*, arus dan tegangan yang digunakan selama pengelasan ini adalah 0,7 (Stenbacka, 2013), 150 A dan 14,6 volt (Suharto, Risanti, & Sekartedjo, 2019), secara berurutan.

Waktu yang diperlukan untuk proses pendinginan pada rentang temperatur 500°C - 800°C dinyatakan dalam persamaan berikut (Poorhaydari & Patchett, 2005) (Dong, et al., 2017):

$$\Delta t_{8-5} = \frac{q/v}{2\pi\alpha\theta_1} \quad (8)$$

$$\frac{1}{\theta_1} = \left(\frac{1}{500-T_0} - \frac{1}{800-T_0} \right) \quad (9)$$

untuk pelat tebal dan

$$\Delta t_{8-5} = \frac{(q/v)^2}{4\pi\alpha c d^2 \theta_2} \quad (10)$$

$$\frac{1}{\theta_2} = \left(\frac{1}{(500-T_0)^2 - (800-T_0)^2} \right) \quad (11)$$

untuk pelat tipis.

Karakteristik *grey cast iron* yang digunakan pada perhitungan ditunjukkan pada tabel 4.

Tabel 4. Sifat dari *grey cast iron* yang digunakan (Kopeliovich, 2012)

Sifat	Nilai
Konduktivitas termal	53 W/mK
Density	7990 kg/m ³
Titik lebur	1260 $^{\circ}\text{C}$
Koefisien muai panas	$9 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
Panas spesifik	490 J/kgK

2.3. Metalografi dan Uji Keras

Metalografi dilakukan pada daerah WM, BM, dan HAZ (Gambar 1) dengan proses *grinding* dan *polishing* serta etza dengan larutan nital (5% HNO_3). Kekerasan diukur dengan menggunakan mikro Vickers dengan beban 200 g dan waktu tahan 10 detik dengan indenter berlian bersudut 136° . Pengukuran kekerasan diambil pada daerah BM, HAZ dan WM, masing-masing sejumlah 6 titik (Tabel 5). Standar deviasi pengukuran kekerasan sebesar 0-72 HV.

Tabel 5. Hasil pengukuran kekerasan pada daerah WM, HAZ dan BM (Suharto, Risanti, & Sekartedjo, 2019).

Tanpa <i>preheat</i>			Dengan <i>preheat</i>		
WM	HAZ	BM	WM	HAZ	BM
214,7	682,8	217,2	256	578,7	230,5

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil Simulasi Variasi *Travel Speed* Dengan MATLAB

Hasil Simulasi dengan Matlab menggunakan persamaan (5) dengan data dari Tabel 4 ditunjukkan pada Gambar 2. Dari hasil simulasi terlihat bahwa jangkauan panas dari *torch* ke logam dasar menjadi semakin luas jika *travel speed* semakin lambat dan logam diberi *preheating*. Terlihat pula saat *travel speed* semakin cepat pola sebaran temperatur berubah dari radial menjadi elipsoid.

(a)

(b)

(c)

(d)

Gambar 2. Jejak trayektori dari pengelasan dilihat dari atas dan dari penampang dengan kondisi (a) *travel speed* = 0,5 mm/s tanpa *preheating*, (b) *travel speed* = 5 mm/s tanpa *preheating*, (c) *travel speed* = 0,5 mm/s dengan *preheating*, dan (d) *travel speed* = 5 mm/s dengan *preheating*.

Gambar 3 berikut ini adalah hasil simulasi dengan menggunakan persamaan (6) untuk kedua kondisi yakni dengan dan tanpa *preheating*. Nilai difusivitas termal diperoleh dari (Omerod, Taylor, & Edwards, 1978) untuk *cast iron* dengan grafit berbentuk *flake*. Bentuk *flake* telah diketahui mempunyai karakteristik tersendiri yang menentukan difusivitas termal dari *grey cast iron* (Hecht, Dinwiddie, & Wang, 1999). Dari literatur tersebut diperoleh nilai persamaan $\alpha(T)$:

$$\alpha = 1,504 - 0,00132T + 1,4884 \times 10^{-7}T^2 \quad (12)$$

Dengan demikian untuk tanpa *preheat* ($T = 25$ °C) didapatkan α sebesar 1471 dan dengan *preheat* ($T = 315$ °C) didapatkan α sebesar 1103 m²/s. Secara umum dari Gambar 3, dapat dilihat bahwa yang paling signifikan berubah terhadap *travel speed* adalah temperatur puncak dari *torch*.

Gambar 3. Distribusi temperatur pengelasan dengan kondisi (a) *travel speed* = 0,5 mm/s tanpa *preheating*, (b) *travel speed* = 5 mm/s tanpa *preheating*, (c) *travel speed* = 0,5 mm/s dengan *preheating*, dan (d) *travel speed* = 5 mm/s dengan *preheating*.

Secara umum semua temperatur puncak pada Gambar 3 berada pada temperatur di atas liquidus (Tabel 4). Solusi menggunakan fungsi Bessel radial yang ditampilkan pada Gambar 3 merupakan distribusi temperatur pada daerah *weld metal* (WM). Sedangkan Gambar 2 lebih ke solusi daerah HAZ. *Preheating* bertujuan untuk menstabilkan suhu sampel agar tidak terjadi kerusakan pada saat dan setelah pengelasan akibat adanya *thermal shock*, pada Gambar 2 dan 3 terlihat bahwa sampel yang diberi *preheating* menghasilkan temperatur puncak yang lebih tinggi dibandingkan dengan sampel tanpa *preheating* pada semua nilai kecepatan las. Di samping itu temperatur puncak berkurang dengan semakin besarnya kecepatan las, hal ini berhubungan dengan *heat input* dari las yang berbanding lurus dengan daya las dan berbanding terbalik dengan kecepatan las (Kutelu, Seidu, Eghabor, & Ibitoye, 2018) (Gambar 4).

Gambar 4. Distribusi temperatur pengelasan dengan kondisi (a) *travel speed* = 0,5 mm/s tanpa *preheating*, (b) *travel speed* = 5 mm/s tanpa *preheating*, (c) *travel speed* = 0,5 mm/s dengan *preheating*, dan (d) *travel speed* = 5 mm/s dengan *preheating*.

Kecepatan las berbanding terbalik dengan luas penampang lasan, kedalaman penetrasi dan lebar lasan. Namun demikian nisbah kedalaman penetrasi terhadap lebar lasan tidak terlalu dipengaruhi oleh kecepatan lasan itu sendiri. Sehingga dapat dikatakan bahwa kecepatan lasan hanya berpengaruh pada volume material yang mencair (Kutelu, Seidu, Eghabor, & Ibitoye, 2018).

Gambar 5. Pengaruh *travel speed* pada lebar HAZ untuk kondisi dengan dan tanpa *preheat*.

Gambar 5 menunjukkan perubahan lebar HAZ yang diukur dari Gambar 2 terhadap *travel speed*. HAZ di sini merupakan daerah yang temperaturnya di bawah temperatur lebur (Tabel 4) hingga ke temperatur kritis (Poorhaydari & Patchett, 2005). Pada *travel speed* yang rendah didapatkan HAZ yang lebar dan terlihat efek *preheat* tidak signifikan sampai dengan *travel speed* 1 mm/detik. Efek *preheat* menjadi terlihat saat *travel speed* di atas 1 mm/detik dengan *preheat* menghasilkan HAZ yang lebih besar daripada tanpa *preheat*.

3.2. Hasil Perhitungan Laju Pendinginan

Gambar 6 adalah hasil perhitungan laju pendinginan dari temperatur 800-500 °C dengan menggunakan persamaan (8-11). Laju pendinginan

ini dapat digunakan untuk prediksi transformasi fasa (Poorhaydari & Patchett, 2005).

Gambar 6. Pengaruh *travel speed* pada laju pendinginan dengan simbol penuh untuk pelat tebal dan simbol terbuka untuk pelat tipis.

Dari Gambar 6 terlihat bahwa angka laju pendinginan pada *grey cast iron* ini untuk asumsi pelat tipis satu orde lebih besar dibandingkan dengan untuk pelat tebal. *Preheat* secara umum membuat laju pendinginan lebih lambat daripada tanpa *preheat*. Laju pendinginan pada lasan bersifat tidak homogen dalam arah radial pada penampang melintangnya (asumsi pelat tebal), di sisi lain laju pendinginan lebih cepat pada permukaan atas pelat dekat dengan sisi *weld bead* (asumsi pelat tipis) daripada di bagian bawah *weld bead*, oleh karena itu lebar HAZ di permukaan lebih sempit (Gambar 1).

3.3. Analisis Perubahan Struktur Mikro dan Hasil Uji Keras

Gambar 7 menunjukkan gambar struktur mikro daerah lelehan (WM). Secara umum struktur mikro *grey cast iron* tanpa *preheat* menghasilkan struktur mikro yang lebih kecil dibandingkan dengan *preheat*. Struktur mikro berupa eutektik ledeburit ($\gamma - Fe + Fe_3C$) yang tersusun atas *white iron* dengan besi karbida dan perlit tanpa grafit untuk tanpa *preheat* dan dengan sedikit grafit untuk dengan *preheat*. Terbentuknya grafit dalam bentuk spheroid ini menunjukkan bahwa grafit terbentuk selama proses *undercooling* ini muncul karena proses pendinginan cepat (Ishida, 1985).

Gambar 7. Pengaruh *preheat* pada struktur mikro daerah WM: (a) tanpa dan (b) dengan *preheat* (Suharto, Risanti, & Sekartedjo, 2019).

Gambar 8 menunjukkan struktur mikro daerah HAZ. Struktur mikro pada daerah ini tersusun

atas ledeburit dan besi karbida, juga terdapat martensit nikel berbentuk seperti jarum dan perlit halus di sekitar batas garis fusi (Ishida, 1985) (Suharto, Risanti, & Sekartedjo, 2019).

Gambar 8. Pengaruh *preheat* pada struktur mikro daerah HAZ: (a) tanpa dan (b) dengan *preheat* (Suharto, Risanti, & Sekartedjo, 2019).

Daerah batas antara WM dan HAZ pada Gambar 8 disebut dengan daerah leleh sebagian. Pada daerah ini, terdapat banyak grafit *flake*. Hal ini dapat membentuk struktur yang rapuh di sepanjang garis fusi las. Matriks austenit yang mengelilingi karbida ini juga dapat berubah menjadi martensit pada suhu yang lebih rendah pada laju pendinginan cepat. Urutan transformasi fasa selama pendinginan daerah batas ini dapat diringkas sebagai berikut (Suharto, Risanti, & Sekartedjo, 2019):

Dari Tabel 3 dan Tabel 5, terlihat bahwa semakin tinggi CE maka kekerasan dari logam juga semakin tinggi. CE yang diperoleh berhubungan dengan laju pendinginan, yakni: laju pendinginan lambat membuat struktur mikro didominasi dengan reaksi eutektik austenit dan grafit, sedangkan laju pendinginan lambat didominasi oleh austenit dan karbida dalam *white iron* (Devletian, 1978). Pada penelitian ini, terlihat bahwa keadaan tanpa *preheat* mengandung lebih tinggi CE dan didominasi eutektik ledeburit dan besi karbida dalam *white iron* menunjukkan pendinginan lebih lambat. Hal yang sama juga ditunjukkan pada Gambar 6, dimana kondisi tanpa *preheat* menghasilkan laju pendinginan yang lebih lambat daripada dengan *preheat*.

Preheating bergantung pada CE pada lasan, ukuran lasan, dan *heat input* (Devletian, 1978). CE yang tinggi menyebabkan grafitisasi dan feritisasi pada lasan, dengan demikian diperlukan temperatur *preheat* rendah (atau laju pendinginan yang cepat) untuk mendapatkan kekerasan yang diinginkan. Dari (Devletian, 1978) terlihat bahwa, untuk temperatur *preheating* 315 °C diperlukan laju pendinginan kurang lebih 10 °C/detik, sedangkan pada penelitian ini laju pendinginan sebesar 10 dapat diperoleh jika *travel speed* dari lasan > 5 mm/detik (Gambar 6).

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Dari hasil simulasi dan eksperimen di atas dapat disimpulkan bahwa persamaan Rosenthal dengan solusi Bessel hanya cocok untuk distribusi temperatur pada daerah lelehan, sedangkan solusi *quasi steady state* dapat digunakan untuk prediksi

distribusi temperatur arah lateral dan transversal pada logam lasan. *Preheating* pada suhu 315 °C berpengaruh pada lebar HAZ yang dihasilkan menurut persamaan eksponensial terhadap *travel speed*, memperlambat laju pendinginan dan menurunkan kekerasan karena berkurangnya *carbon equivalent* (CE). Struktur mikro HAZ pada *grey cast iron* yang diberi *preheating* menunjukkan dominasi martensit nikel dan eutektik ledeburit, sedangkan tanpa *preheating* menghasilkan struktur mikro

didominasi oleh eutektik ledeburit dan besi karbida dalam *white iron*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Departemen Teknik Fisika FTIRS-ITS yang telah mendanai penelitian ini dengan skema Penelitian Dana Departemen Tahun 2019.

DAFTAR PUSTAKA

- Arifin, A. (2013). *Pengaruh Preheat Terhadap Struktur Mikro, Sifat Mekanis dan Kekuatan Creep Sambungan Las GTAW Material Baja Paduan 12Cr1MoV yang Digunakan pada Superheater Boiler*. Tesis S2, Teknik Mesin. Jogjakarta: Universitas Gadjah Mada.
- Bhatnagar, K. R., & Gupta, G. (2016). A Review on Weldability of Cast Iron. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 7(5), 126-131. <https://www.ijser.org/researchpaper/A-REVIEW-ON-WELDABILITY-OF-CAST-IRON.pdf>
- Devletian, J. (1978). Weldability of Gray Iron Using Fluxless Gray Iron Electrodes for SMAW. *The Welding Journal*, 183s-188s. https://app.aws.org/wj/supplement/WJ_1978_07_s183.pdf
- Dong, L.-M., Qiu, X.-B., Liu, T.-Y., Lu, Z.-Y., Fang, F., & Hu, X.-J. (2017). Estimation of Cooling Rate from 800 °C to 500 °C in the Welding of Intermediate Thickness Plates Based on FEM Simulation. *Journal of Materials Science and Engineering B*, 7(11-12), 258-267. <https://davidpublisher.org/Public/uploads/Contribute/5a823c8e65130.pdf>
- Hecht, R., Dinwiddie, R., & Wang, H. (1999). The effect of graphite flake morphology on the thermal diffusivity of gray cast irons used for automotive brake discs. *Journal of Materials Science*, 34, 4775-4781. <https://doi.org/10.1023/A:1004643322951>
- Ishida, T. (1985). A Microstructural Study of Local Melting of Gray Cast Iron with a Stationary Plasma Arc. *The Welding Journal*, 232s-241s. http://files.aws.org/wj/supplement/WJ_1985_08_s232.pdf
- Kopeliovich, D. (2012, June 02). *Grey cast iron ASTM 40*. Retrieved from SubSTech: https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=grey_cast_iron_astm_40
- Kumar, R., Arya, K. H., & Saxena, K. R. (2014). Experimental Determination of Cooling Rate and its Effect on Microhardness in Submerged Arc Welding of Mild Steel Plate (Grade c-25 as per IS 1570). *Journal of Material Sciences & Engineering*, 3(2), 1-4. <https://doi.org/10.4172/2169-0022.1000138>
- Kutelu, B., Seidu, S., Eghabor, G., & Ibitoye, A. (2018). Review of GTAW Welding Parameters. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 6, 541-554. <https://doi.org/10.4236/jmmce.2018.65039>
- Laisa, M. I., Sulistijono, S., & Awali, J. (2018). Effect of Heat Input with Current Variation on Weld Overlay GTAW Method with ERNi-CI and ERNiFe-CI Fillers on Mechanical Properties and Micro Structure of Main Cap Product. *IPTEK Journal of Proceedings Series*, 4, 33-38. <http://iptek.its.ac.id/index.php/jps/article/view/3842>
- Messler, R. (2004). *Principles of Welding: Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy*. Singapore: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Nasiri, M., & Enziger, N. (2019). An analytical solution for temperature distribution in fillet arc welding based on an adaptive function. *Welding in the World*, 63, 409-419. <https://doi.org/10.1007/s40194-018-0667-6>
- Nunes, A. (1983). An Extended Rosenthal Weld Model: *Welding Research Supplement*, 165-170. http://files.aws.org/wj/supplement/WJ_1983_06_s165.pdf
- Omerod, J., Taylor, R., & Edwards, R. (1978). Thermal diffusivity of cast irons. *Metals Technology*, 5(1), 109-113. <https://doi.org/10.1179/mt.1978.5.1.109>

- Poorhaydari, K., & Patchett, B. I. (2005). Estimation of Cooling Rate in the Welding of Plates with Intermediate Thickness. *The Welding Journal*, 84(10), 149s-155s. <https://app.aws.org/wj/supplement/10-2005-POORHAYDARI-s.pdf>
- Pouranvari, M. (2010). On the weldability of grey cast iron using nickel based filler metal. *Materials & Design*, 31(7), 3253-3258. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.02.034>
- Rosenthal, D. (1948). The theory of moving source of heat and its application to metal transfer. *ASME Trans.*, 43, 849-866.
- Singh, R. (2016). *Applied Welding Engineering*. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Stenbacka, N. (2013). On arc efficiency in gas tungsten arc welding. *Soldagem & Inspeção*, 18(4), 380-390. <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-92232013000400010>
- Suharto, A., Risanti, D. D., & Sekartedjo. (2019). On welding gray cast iron using SMAW and GTAW process. *AIP Conference Proceedings*, 2088, 060002-1-10. <https://doi.org/10.1063/1.5095350>
- Winiczenko, R., Kaczorowski, M., & Skibicki, A. (2018). The microstructures, mechanical properties, and temperature distributions in nodular cast iron friction-welded joint. *J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, 40, 347. <https://doi.org/10.1007/s40430-018-1261-y>