

Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) VIII

Universitas Diponegoro, Semarang 11-12 Agustus 2009

M3-022 DAMPAK PENAMBAHAN INDUKSI MAGNET PADA PENGELASAN LOGAM TIDAK SEJENIS TERHADAP CACAT LAS DAN LAJU RERAMBATAN RETAK FATIK

SUGIARTO

Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya
Jl. MT. Haryono 167 Malang
E-Mail : Sugik_mlg@yahoo.co.id

JAMASRI, M. WAZIS WILDAN

Jurusan Teknik Mesin Universitas Gadjah Mada

ABSTRAK

Tiap-tiap pengelasan selalu membawa permasalahan yang kompleks meskipun proses pengelasan sudah dirancang mengikuti setandar. Sambungan logam tidak sejenis lebih sulit mendapatkan homogenitas pada daerah sambungan dibanding sambungan logam sejenis. Hal tersebut menyebabkan sambungan logam tidak sejenis sangat rentan terhadap timbulnya cacat las, inklusi, daerah *unmixed* yang lebar, dan kegagalan sambungan. Selama pengelasan terjadi sirkulasi logam cair akibat pengaruh gaya konveksi pada kolam las, yang antara lain gaya *buoyancy*, gaya *marangoni* dan gaya elektromagnetik. Jika gaya konveksi semakin besar maka laju sirkulasi logam cair juga meningkat. Penelitian ini mencoba menambahkan induksi magnet eksternal untuk meningkatkan gaya elektromagnetik pada kolam las untuk dilihat dampaknya terhadap cacat las dan laju perambatan retak fatik pada daerah las.

Benda kerja dibuat dari plat baja ST 37 dan SUS 430 tebal 10 mm dengan filer las tipe AWS ER-309L diameter 2,4 mm, menggunakan las TIG dengan kecepatan las rata-rata 5,8 cm/menit. Variabel bebas berupa induksi magnet yang ditambahkan dari luar dengan mengalirkan arus DC pada lilitan kawat tembaga diameter 0,4 mm sebanyak 100 lilitan dengan variasi arus 0, 3, 5, 10, 12 dan 15 Ampere. Penambahan induksi magnet divariasikan dalam empat Pola pembangkitan.

Hasilnya adalah secara umum cacat las masih tetap muncul pada tiap-tiap spesimen dan penambahan induksi magnet dalam berbagai pola pembangkitan mampu mengurangi prosentase cacat las dibandingkan dengan spesimen tanpa pembangkitan induksi magnet. Prosentase cacat las tertinggi terjadi pada spesimen tanpa perlakuan yaitu sebesar 4.2 % sedangkan yang paling rendah pada Pola IV (induksi magnet dibangkitkan dari dua arah secara bergantian) dengan mengalirkan arus pembangkit medan magnet 15 A dengan cacat las sebesar 1,3 %. Sedangkan laju perambatan retak fatik yang paling rendah juga terjadi pada Pola IV dengan arus pembangkit medan magnet 15 A dan laju perambatan retak fatik yang paling besar diperoleh spesimen tanpa penambahan induksi magnet dari luar.

Kata kunci : induksi magnet, pengelasan logam tidak sejenis, cacat las, laju perambatan retak fatik.

A. PENDAHULUAN

Selama pengelasan terjadi sirkulasi logam cair akibat pengaruh gaya konveksi yang bekerja pada kolam las (*weld pool*). Gaya konveksi tersebut adalah gaya angkat permukaan (*buoyancy force*), gaya akibat tegangan permukaan (*marangoni force*) dan gaya elektromagnetik (*Lorenz force*). Jika gaya konveksi semakin besar maka sirkulasi logam cair juga akan meningkat. Sirkulasi pada kolam las dapat mempengaruhi geometri kampuh, homogenitas struktur, *hydrogen porosity* dan terlarutnya unsur-unsur lain (inklusi) pada kolam las (Messler, 1999: 298) yang selanjutnya akan berpengaruh terhadap sifat mekanik hasil lasan. Perilaku laju aliran logam cair selama pengelasan didominasi oleh gaya elektromagnetik dan gaya marangoni. Dalam banyak kasus, gaya konveksi ini menghasilkan loop sirkulasi ganda yang dapat menyebabkan segregasi dan sekaligus efektif dalam menguapkan gas yang terlarut dalam logam cair (Oreper, 1983: 307). Dengan laju sirkulasi yang tepat tentunya dapat meminimalkan terjadinya cacat las dan memperbaiki sifat mekaniknya. Berangkat dari permasalahan tersebut dapat diduga bahwa kualitas sambungan logam tidak sejenis banyak dipengaruhi oleh sirkulasi selama pencampuran logam cair akibat gaya konveksi yang bekerja pada kolam las.

Penelitian ini mencoba menambahkan induksi magnet dari luar untuk meningkatkan gaya elektromagnetik yang bekerja pada kolam las. Selanjutnya dianalisis dampaknya terhadap cacat las dan laju perambatan retak fatik yang terjadi pada sambungan las dari dua logam yang tidak sejenis.

B. DASAR TEORI

Hidrogen difusi dan terlarutnya zat pengotor pada kolam las sangat dipengaruhi oleh terjadinya sirkulasi logam cair selama pencairan dan pencampuran antara logam cair dengan *filler*. Arus sirkulasi pada kolam las dipengaruhi oleh gaya angkat permukaan, gaya akibat tegangan permukaan dan konveksi karena gaya elektromagnetik. Dari ketiga gaya yang bekerja, ternyata gaya elektromagnetik memberi pengaruh paling dominan terhadap sirkulasi kolam las (Herrera, 2003: 8).

Hughes pada tahun 2000 melakukan pemodelan matematika dua dimensi terhadap efek gaya marangoni (*marangoni force*) dan gaya elektromagnetik pada kolam las. Dari hasil pemodelannya diketahui bahwa arus konveksi akibat gaya elektromagnetik cenderung menghasilkan penetrasi kolam las yang lebih curam dan dalam dibandingkan efek gaya marangoni.

Sugiarto, dkk. pada tahun 2005 meneliti pengaruh pembangkitan medan magnet terhadap ketahanan korosi hasil lasan plat baja SS 41 dengan las SMAW. Hasilnya adalah laju korosi hasil lasan plat baja SS 41 mengalami penurunan dengan pemberian arus listrik pembangkit medan magnet 3 sampai 10 ampere dan tegangan 32 volt. Selanjutnya laju korosi akan meningkat lagi dengan menaikkan kuat arus pembangkit medan magnet menjadi 15 ampere.

Sugiarto, dkk. pada tahun 2007 melakukan penelitian tentang pengaruh penambahan induksi magnet eksternal menggunakan las TIG terhadap sifat fisik sambungan *dissimilar metal* antara plat baja karbon rendah (ST 37) dengan plat *stainless steel* (SUS 430). Dengan menambahkan medan magnet dari luar menyebabkan struktur HAZ dan las lebih homogen yang ditandai dengan daerah *unmixed* (tidak bercampur) semakin sempit dan penetrasi yang lebih dalam jika dibandingkan dengan pengelasan tanpa penambahan medan magnet. Dampak lain adalah laju korosinya semakin rendah.

Konveksi pada Kolam Las Akibat Gaya Elektromagnetik

Pada kolam las (*weld pool*), terdapat tiga gaya yang menyebabkan konveksi pada logam cair, yaitu gaya angkat permukaan (F_b), gaya elektromagnetik (F_{em}), dan gaya marangoni (F_γ).

Pada pengelasan yang menggunakan busur listrik sebagai sumber panas, akan bekerja gaya elektromagnetik. Gaya elektromagnetik adalah gaya yang timbul akibat adanya medan elektromagnetik dari arus listrik busur las, di mana besarnya dapat digambarkan secara matematis sebagai berikut (Kou, S., 1987: 90):

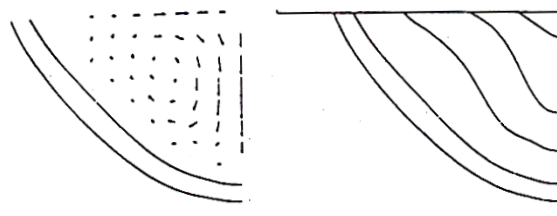
$$F_{em} = J \times B \quad (1)$$

dengan : F_{em} = gaya elektromagnetik.

J = rapat arus.

B = fluks medan magnet.

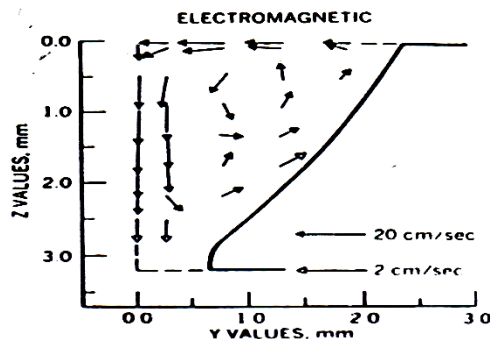
Perilaku aliran logam cair selama pengelasan diilustrasikan dengan pemodelan dua dimensi sebagaimana gambar 1 berikut.



Gambar 1. Arus konveksi karena pengaruh gaya elektromagnetik

Sumber : Messler, 1999 : 299.

Gaya elektromagnetik ditengah kolam las akan mendorong logam las cair yang panas ke bawah sampai ke dasar kolam, sehingga perpindahan panas yang terjadi mengakibatkan sebagian dasar kolam las mencair dan kolam las semakin dalam (Messler, 1999: 300), sebagaimana Gambar 2 berikut:



Gambar 2. Penetrasi yang ditimbulkan gaya elektromagnetik

Sumber : Kou, Sindo, 1987 : 97

Gaya elektromagnetik dengan sirkulasi logam cair yang dihasilkan sangat berperan dalam proses pencampuran (*mixing*) dalam kolam las. Hal ini berpengaruh terhadap tingkat homogenitas komposisi dalam kolam las (Kou, Sindo, 1987: 100).

Peningkatan gaya elektromagnetik dengan memperbesar arus pengelasan kurang disukai mengingat penambahan arus pengelasan akan memperbesar masukan panas dan menimbulkan masalah baru seperti tegangan sisa, distorsi, dan perubahan pada struktur mikro (Messler, 1996 : 306).

Pengaruh Konveksi pada Pengelasan

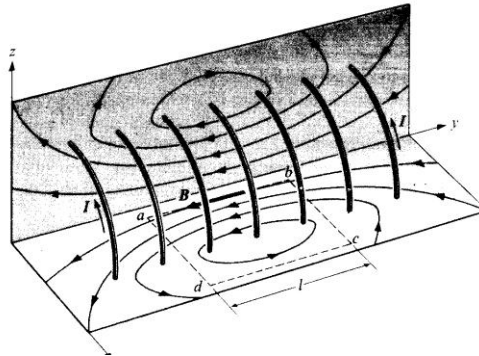
Konveksi bisa menimbulkan pengaruh yang merugikan dan menguntungkan. Pengaruh yang menguntungkan adalah komposisi logam las menjadi homogen karena proses sirkulasi selama konveksi berlangsung. Sedangkan yang merugikan adalah arus konveksi akan menyebabkan terjadinya interaksi antara logam cair panas dengan permukaan kolam las, yaitu logam induk, sehingga gas-gas yang terlarut pada logam cair akan bereaksi dengan logam induk dan menyebabkan lubang-lubang halus dan berdampak pada meningkatnya porositas las (Messler, 1999: 298).

Konveksi ini akan berpengaruh pada derajat homogenitas kimia dan solidifikasi manik las karena adanya proses sirkulasi selama konveksi berlangsung dan akhirnya dapat mempengaruhi hasil metalurgi dan sifat mekanik lasan.

Medan Magnet Solenoida

Solenoida dibuat dengan melilitkan kawat menjadi sebuah heliks di sekeliling permukaan suatu bentukan silinder biasanya yang penampangnya berbentuk lingkaran. Jarak antar lilitannya biasanya kecil (rapat) dan lebih dari satu lapisan sebagaimana gambar 3. Berdasarkan hukum ampere dapat dicari bahwa dengan jumlah lilitan (N) dan arus (I) serta panjang solenoida (l) maka medan magnetnya adalah (Zemansky, 1994:767) :

$B = \mu_0 \cdot I \cdot N/l$ (2)
 dengan: N = jumlah lilitan.

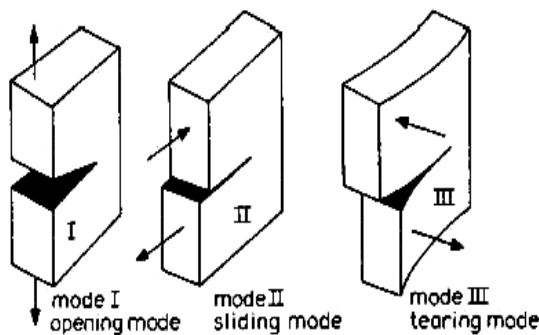


Gambar 3. Medan magnet pada solenoida
 Sumber : Zemansky, 1994: 767

Dalam penelitian ini digunakan magnet solenoida dengan arah medan magnet tegak lurus arah pengelasan, sehingga diharapkan muatan dalam *weld pool* terpengaruh oleh gaya elektromagnet secara maksimal (yaitu pada $\alpha = 90^\circ$).

Laju Perambatan Retak Fatik

Ada tiga macam retak yang diakibatkan oleh tiga macam pola pembebanan sebagaimana Gambar 4.



Gambar 4. Mode bukaan retak
 Sumber: Broek D., 1978: 8

Opening mode atau *mode I* akibat pola pembebanan normal terhadap retak, *sliding mode* atau *mode II* akibat pola pembebanan geser terhadap retak dan *tearing mode* atau *mode III* akibat pola pembebanan menyobek retak. (Broek D. 1986 : 8)

Faktor intensitas tegangan (ΔK) pada pembebanan normal (*mode I*) untuk specimen CT (*Compact Tension*), digunakan persamaan sebagai berikut,

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{BW^{1/2}} \times \frac{2+\alpha}{1-\alpha^{3/2}} \times \quad (3)$$

$$0.886 + 4.64\alpha - 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4$$

Dengan :

ΔK = faktor intensitas tegangan
(MPa.m^{1/2})

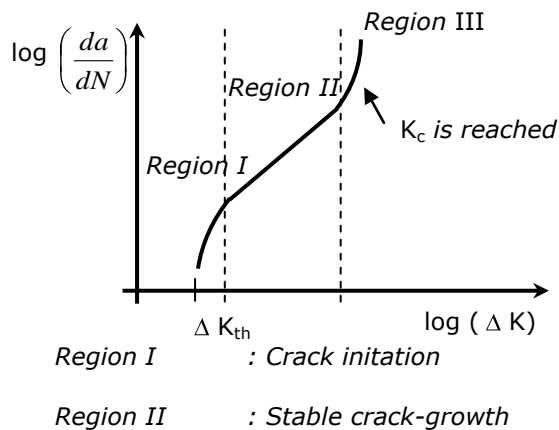
P = gaya luar (Pa)

B = tebal plat (mm)

W = lebar plat (mm)

α = a/W dimana $a/W \geq 0.2$

Karakteristik perambatan retak fatik untuk bahan logam dapat dibagi menjadi tiga daerah.



Gambar 5. Kurva laju pertumbuhan retak

Sumber: Bannantine, J.A.1990: 291

Daerah I (*Region I*) disebut daerah ambang fatik (*fatigue treshold*) yang terjadi pada laju perambatan retak sekitar 10^{-10} m/siklus. Di bawah laju ini tidak terjadi perambatan retak. Daerah II menunjukkan suatu hubungan linier antara $\log da/dN$ dan $\log \Delta K$, sedangkan untuk daerah III laju perambatan retak sangat cepat dan sedikit sekali terjadi perambatan fatik, biasanya daerah ini

tidak dipertimbangkan dalam perancangan struktur. Daerah ini terutama dikendalikan oleh parameter ketangguhan bahan terhadap retak. (Djamasri. 1997)

Paris menguraikan bahwa pertumbuhan retak akan dihasilkan ketika pembebanan yang diterapkan bervariasi, walaupun tegangan maksimum lebih rendah dari pada tegangan kritis. Paris merumuskan bahwa pertumbuhan retak setiap siklus pembebanan adalah suatu fungsi dari intensitas tegangan (ΔK), yang dirumuskan secara sederhana sebagai berikut,

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^n \quad (4)$$

dengan,

n = koefisien eksponensial

C = konstanta bahan

a = panjang retak (mm)

N = jumlah siklus pembebanan
(siklus)

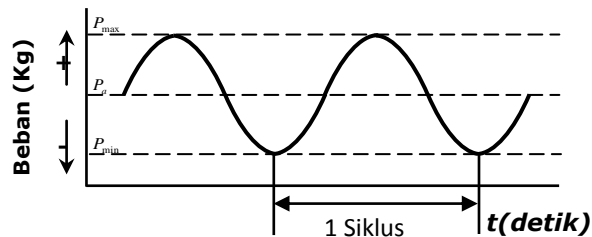
da/dN = laju perambatan retak fatik
(mm/siklus)

Dengan C dan n merupakan konstanta yang ditentukan secara eksperimen, dan ΔK merupakan selisih faktor tegangan maksimum (K_{maks}) dan faktor tegangan minimum (K_{min}) yang dapat ditulis sebagai berikut,

$$\Delta K = K_{maks} - K_{min} \quad (\text{MPa.m}^{1/2}) \quad (5)$$

Pola pembebanan yang digunakan adalah sinusoidal seperti Gambar 6. dengan beban siklik amplitudo konstan berupa P_{maks} dan P_{min} . maka tegangan yang ada berupa σ_{maks} dan σ_{min} dan daerah tegangannya adalah,

$$\Delta\sigma = \sigma_{maks} - \sigma_{min} \quad (6)$$



Gambar 6. Siklus Pembebanan Pengujian Laju Perambatan Retak Fatik

Tegangan maksimum yang diberikan pada waktu pengujian diambil 0,3 – 0,5 dari tegangan *ultimate*-nya. Dalam pengujian perambatan retak fatik ini digunakan variabel perbandingan tegangan atau beban. Dengan adanya perbandingan tegangan ini maka dalam suatu

pengujian hanya diperlukan variabel tegangan atau beban maksimum. Perbandingan atau rasio tegangan dapat dihitung dengan persamaan, (Broek, D. 1986 : 27)

$$R = \frac{K_{\min}}{K_{\max}} = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = \frac{P_{\min}}{P_{\max}} \quad (7)$$

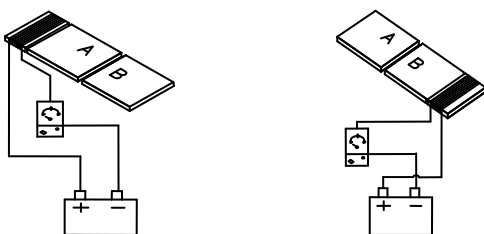
Hipotesis

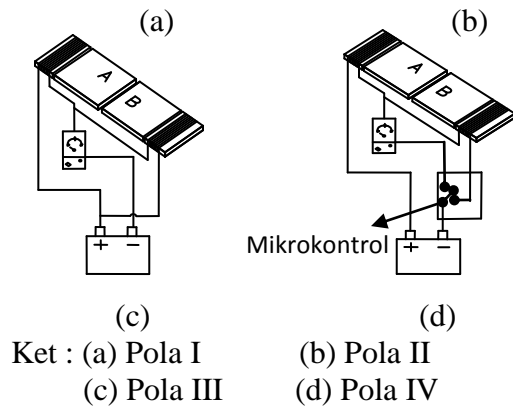
Penambahan induksi magnet dari luar selama pengelasan akan meningkatkan gaya elektromagnetik pada kolam las. Selanjutnya laju sirkulasi logam cair akan meningkat. Dengan meningkatnya laju sirkulasi logam cair akibat meningkatnya gaya elektromagnetik dan dengan mengalirkan induksi magnet dari dua arah secara bergantian diduga akan menghasilkan pengadukan logam cair yang lebih efektif sehingga pencampuran antara logam SUS 430, ST 37 dan logam filler lebih homogen. Dampaknya adalah cacat lasnya menurun dan laju perambatan retak fatik daerah las semakin menurun.

C. METODOLOGI PENELITIAN

Metode yang digunakan adalah penelitian skala laboratorium dengan variabel terikat berupa cacat las dan laju perambatan retak fatik. Benda kerja dibuat dari plat baja ST 37 dan SUS 430 tebal 10 mm dengan filler las tipe AWS ER-309L diameter 2,4 mm, menggunakan las TIG dengan kecepatan las rata-rata 5,8 cm/menit. Variabel bebas berupa induksi magnet yang ditambahkan dari luar dengan mengalirkan arus DC pada lilitan kawat tembaga diameter 0,4 mm sebanyak 100 lilitan dengan variasi arus 0, 3, 5, 10, 12 dan 15 Ampere. Penambahan induksi magnet divariasikan dalam empat Pola pembangkitan yaitu :

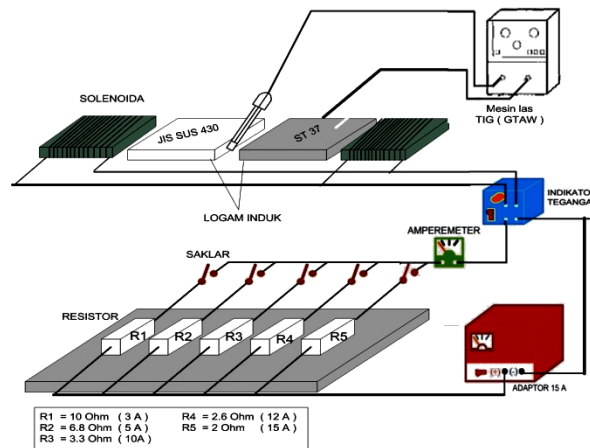
- Pola I : hanya benda kerja A (SUS 430) saja yang dialiri magnet
- Pola II : hanya logam B (ST 37) saja yang dialiri magnet
- Pola III : logam A dan B dialiri magnet secara bersamaan
- Pola IV : logam A dan B dialiri magnet secara bergantian (*intermittant*), sebagaimana ditunjukkan Gambar 7.





Gambar 7. Pola pembangkitan arus medan magnet.

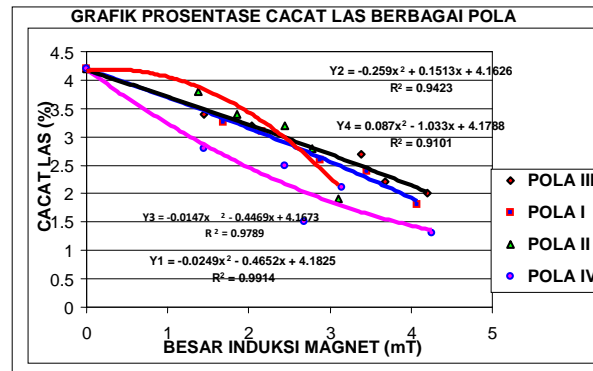
Instalasi Penelitian



Gambar 8. Instalasi Penelitian

D. HASIL PENELITIAN Hasil Pengujian Cacat Las

Prosentase cacat las untuk spesimen tanpa penambahan induksi magnet sebesar 4,2 %. Sedangkan data prosentase cacat las akibat penambahan induksi magnet ditampilkan dalam Gambar 9 berikut :

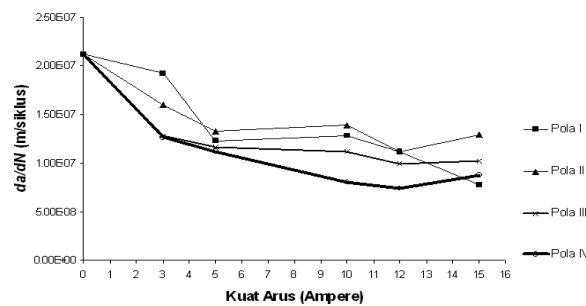


Gambar 9. Grafik Prosentase Cacat Las Pada Berbagai Pola Pembangkitan

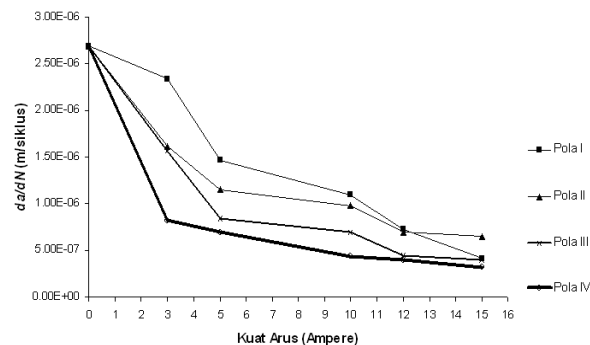
Dari gambar 9 terlihat bahwa secara umum penambahan induksi magnet dari luar dalam berbagai pola pembangkitan dapat mengurangi prosentase cacat las. Prosentase cacat las tertinggi terjadi pada spesimen tanpa perlakuan atau dengan penambahan induksi magnet 0 mT sebesar 4.2 %. Sedangkan yang paling rendah pada Pola IV dengan penambahan induksi magnet 4,26 mT sebesar 1,3 %.

Hal tersebut disebabkan oleh laju sirkulasi logam cair yang rendah, sehingga perpindahan logam cair dari dalam ke permukaan relatif lambat dan pengadukan kolam las kurang efektif. Akibatnya gas dan inklusi masih banyak yang terjebak pada daerah las saat solidifikasi. Sedangkan pada Pola IV terjadi pengadukan logam cair yang lebih efektif karena gaya konveksi berupa gaya elektromagnetik diperbesar dari kedua arah secara bergantian. Akibatnya pencampuran antara logam cair SUS 430, ST 37 dan logam filler ER-309L menjadi lebih homogen. Dan dengan gaya elektromagnetik yang semakin besar menyebabkan laju sirkulasi logam cair semakin tinggi sehingga pelepasan gas ke permukaan semakin efektif pula. Karena Gaya konveksi mempengaruhi laju aliran logam cair yang membawa gas terlarut ke permukaan sehingga tidak terperangkap saat pembekuan logam. Hal ini yang menghasilkan tingkat porositas yang lebih rendah.

Data Hasil Pengujian Laju Perambatan Retak



Gambar 10. Grafik da/dN terhadap penambahan induksi magnet pada berbagai pola pada ΔK rendah = 6 MPa(m)^{1/2}



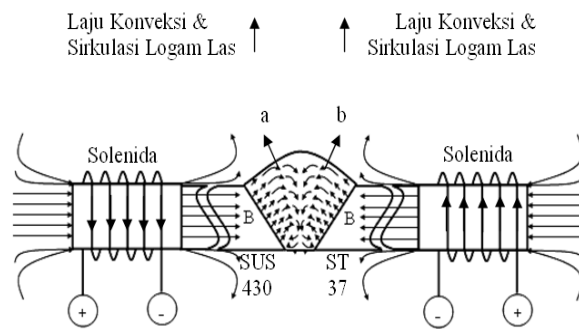
Gambar 11. Grafik da/dN terhadap penambahan induksi magnet pada berbagai pola pada ΔK tinggi = $12 \text{ MPa(m)}^{1/2}$

Pada Gambar 10 dan Gambar 11 terlihat bahwa secara umum laju perambatan retak semakin turun dengan naiknya arus pembangkit induksi magnet yang ditambahkan dari luar. Pada ΔK rendah = $6 \text{ MPa(m)}^{1/2}$ laju perambatan retak paling rendah terjadi pada spesimen pola IV dengan nilai rata-rata laju perambatan retak 9.60×10^{-8} m/siklus, kemudian diikuti oleh spesimen pola III dengan nilai rata-rata laju perambatan retak 1.114×10^{-7} m/siklus, spesimen pola I dengan nilai rata-rata laju perambatan retak 1.264×10^{-7} m/siklus, spesimen pola II dengan nilai rata-rata laju perambatan retak 1.346×10^{-7} m/siklus, dan spesimen tanpa perlakuan 2.123×10^{-7} m/siklus. Pada ΔK tinggi = $12 \text{ MPa(m)}^{1/2}$ laju perambatan retak tertinggi terjadi pada spesimen pola IV dengan nilai rata-rata laju perambatan retak 5.332×10^{-7} m/siklus kemudian diikuti oleh spesimen pola III sebesar 7.891×10^{-7} m/siklus, spesimen pola II sebesar 1.019×10^{-6} m/siklus, spesimen pola I sebesar 1.208×10^{-6} m/siklus, dan spesimen tanpa perlakuan 2.689×10^{-6} m/siklus.

Jadi pada ΔK rendah = $6 \text{ MPa(m)}^{1/2}$ urutan laju perambatan retak dari yang tertinggi terjadi pada spesimen tanpa perlakuan panas, kemudian pola II, pola I, pola III, dan laju perambatan retak yang terkecil terjadi pada pola IV. Sedangkan pada ΔK tinggi = $12 \text{ MPa(m)}^{1/2}$ urutan laju perambatan retak dari yang tertinggi ke paling rendah berturut-turut adalah spesimen tanpa perlakuan panas, kemudian pola I, pola II, pola III, dan pola IV. Perbedaan laju perambatan retak pada logam las ini terjadi karena pada masing-masing pola pembangkitan menghasilkan besar induksi magnet yang berbeda-beda. Hal tersebut menyebabkan laju sirkulasi logam cair juga berbeda-beda. Spesimen tanpa perlakuan memiliki laju perambatan retak tertinggi disebabkan karena selama proses pengelasan tidak ditambahkan induksi magnet dari luar, sehingga laju sirkulasi logam cair juga rendah yang mengakibatkan proses pencampuran logam cair pada kolam las kurang efektif sehingga laju perambatan retak pada daerah logam las tinggi.

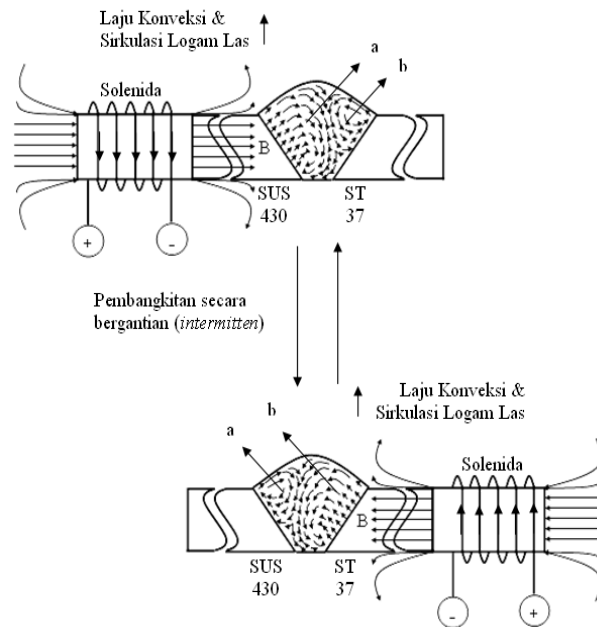
Pada pola I (SUS430 diberi induksi magnet) dan pola II (ST37 diberi induksi magnet) laju perambatan retak sedikit menurun dibanding spesimen tanpa penambahan induksi magnet. Penurunan laju perambatan retak terjadi akibat kenaikan induksi magnet yang ditambahkan. Hal ini disebabkan karena pada pola I dan Pola II hanya diberikan penambahan induksi magnet dari satu sisi logam saja. Karenanya proses pencampuran pada kolam las hanya efektif pada daerah yang dekat dengan sumber induksi magnet saja.

Pada pola III (SUS430 dan ST37 diberi induksi magnet secara bersama-sama) laju perambatan retak cenderung menurun lebih efektif dibanding pola I dan Pola II. Hal ini dikarenakan pada pola III penambahan induksi magnet diberikan dari kedua sisi logam secara bersama-sama sehingga proses pencampuran logam cair terjadi pada kedua sisi (sisi SUS430 dan ST37) seperti yang terlihat pada Gambar 12. Akibatnya pola pengadukan yang terjadi semakin merata keseluruhan bagian kolam las akan mengakibatkan proses pencampuran logam cair juga semakin efektif.



Gambar 12. Permodelan laju sirkulasi logam cair pada spesimen pola III

Dari beberapa pola pembangkitan yang dilakukan ternyata pola IV dengan penambahan induksi magnet secara bergantian (*intermitten*) menghasilkan laju perambatan retak yang paling rendah dibandingkan ketiga pola yang lain. Hal tersebut dikarenakan pada pola IV diberikan penambahan induksi magnet dari kedua sisi logam secara bergantian (*intermitten*) seperti terlihat pada Gambar 13.



Gambar 13. Permodelan laju sirkulasi logam cair pada spesimen pola IV

Penambahan induksi magnet yang diberikan dari dua sisi secara bergantian akan menyebabkan pengadukan logam cair semakin acak sehingga pencampurannya lebih efektif. Hal tersebut mengakibatkan homogenitas logam las semakin meningkat sehingga laju perambatan retak pada logam las menurun.

E. KESIMPULAN

Kesimpulan yang dapat diambil dari hasil penelitian ini adalah :

1. Penambahan induksi magnet dari luar pada berbagai pola pembangkitan dapat mengurangi prosentase cacat las dibandingkan dengan spesimen tanpa pembangkitan induksi magnet. Prosentase cacat las tertinggi terjadi pada spesimen tanpa perlakuan yaitu sebesar 4.2 % sedangkan yang paling rendah pada Pola IV dengan penambahan induksi magnet 4,26 mT sebesar 1,3 %.
2. Penambahan induksi magnet pada keempat pola yang diberikan selama proses pengelasan dapat menurunkan laju perambatan retak. Semakin besar arus pembangkit induksi magnet yang diberikan menyebabkan laju perambatan retak pada daerah las semakin menurun.
3. Dari keempat pola pembangkitan yang diberikan, ternyata pada pola IV menghasilkan laju perambatan retak rata-rata yang paling rendah. Pada ΔK rendah $6 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ dihasilkan laju perambatan retak rata-rata $9.60 \times 10^{-8} \text{ m/siklus}$ dan pada ΔK tinggi $12 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ dihasilkan laju perambatan retak rata-rata $5.332 \times 10^{-7} \text{ m/siklus}$

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Bannantine, J. A. *Fundamental of Metal Fatigue Analysis*. New Jersey: Prentice Hall Englewood Cliffs, 1990
- [2] Broek David, *Elementary Engineering Fracture Mechanics* Martinus Nijhoff Publisher : Netherlands, 1987
- [3] De Herrera, Naomi.. *Computer Calculation of Fusion Zone Geometry Considering Fluid Flow and Heat Transfer During Fusion Welding*. Welding Journal, The University of Texas at El Paso, 2003.
- [4] Hughes M., Taylor G.A., and Pericleous K., *Thermocapillary and Magnetohydrodynamic Affects in Modelling the Thermodynamics of Stationary Welding Processes*, Welding Journal, Centre for Numerical Modelling and Process Analysis, University of Greenwich, London, UK, 2000.
- [5] Jamasri, *Diktat Perpatahan dan Kelelahan*. FT. Universitas Gadjja Mada: Yogyakarta, 1999.
- [6] Kou, Sindo, *Welding Metalurgy*, New Jersey : Wiley-interscience. 1987.
- [7] Messler, Robert.W..*Principles of Welding*. John Wiley & Sons : Canada, 1999
- [8] Oreper G.M., Eagar T.W., and Szekely J. *Convection in Arc Weld PoolsI*. Departement of Materials Science and Engineering, M.I.T., Cambridge, Mass, 1983.
- [9] Sugiarto, Widhiyanuriyawan, D, *Meningkatkan Ketahanan Korosi Hasil Lasan SMAW Baja Karbon Rendah dengan Pembangkitan Medan Magnet*, Laporan Penelitian, Tidak dipublikasikan, Fakultas Teknik UB, Malang, 2005.
- [10] Sugiarto, Siswanto Eko, Jamasri, Wildan Wazis, *Meningkatkan Kualitas Hasil Lasan Dissimilar Metal Dengan Pembangkitan Medan Magnet*, Laporan Penelitian, Tidak Dipublikasikan, Lemlit UB, Malang. 2007
- [11] Zemansky, Sears, *Fisika Untuk Universitas 2*, Terjemahan, Binacipta, Bandung, 1994.