

Perubahan Laju Perambatan Retak *Dissimilar Welding* Akibat Penambahan Fluks Magnet

Sugiarto^{1,*}, Rudy Soenoko¹, Anindito Purnowidodo¹, Yudy Surya Irawan¹

¹ Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya,
Jl. MT. Haryono 167, Malang 65145, Indonesia

* E-mail : segik_mlg@yahoo.co.id atau sugik@ub.ac.id

Abstrak. Pengelasan dissimilar merupakan penyambungan dua logam yang memiliki karakteristik yang berbeda. Permasalahan yang sering muncul dalam proses penyambungan ini adalah pada daerah pengelasan rentan terhadap kegagalan las. Penyebab kegagalan tersebut antara lain pencampuran logam cair yang tidak sempurna dan timbulnya cacat las berupa retak. Salah satu cara mengurangi laju perambatan retak pada sambungan las adalah dengan cara menambahkan fluks magnet dari luar. Dalam penelitian ini fluks magnet dibangkitkan dengan mengalirkan arus listrik DC ke solenoida sebesar 0, 3, 5, 10, 12, dan 15 Ampere. Solenoida dibuat dari kawat tembaga 0,45 mm sebanyak 100 lilitan. Penyambungan menggunakan las GTAW dengan tegangan 32 Volt dan tipe sambungan butt joint. Material yang digunakan adalah ST 37 dan SUS 430 tebal 4 mm dengan elektrode las ER 309L diameter 1.9 mm. Arus listrik DC dialirkan ke solenoida dari dua sisi benda kerja. Hasilnya adalah penambahan fluks magnet selama pengelasan menyebabkan laju perambatan retak spesimen las menurun dibanding tanpa penambahan fluks magnet. Semakin besar fluks magnet yang ditambahkan menghasilkan laju perambatan retak spesimen las juga semakin menurun dan ketangguhan retak las semakin meningkat.

Kata Kunci: *Dissimilar Welding*, Fluks Magnet, Laju Perambatan Retak, ST 37, SUS 430

1. Pendahuluan

Dissimilar welding merupakan penyambungan dua logam yang memiliki karakteristik yang berbeda. Permasalahan yang sering muncul dalam proses penyambungan ini adalah struktur las kurang homogen karena proses pencampuran antara dua logam cair kurang sempurna sehingga rentan terhadap kegagalan. Cacat las berupa retak juga seringkali menjadi pemicu kegagalan sambungan. Retak tersebut akan merambat jika cacat yang ada mengalami pembebanan, terutama pembebanan dinamis. Melihat kenyataan tersebut perlu dipikirkan cara agar *Dissimilar welding* bisa tahan terhadap pembebanan dinamis.

Selama proses pengelasan pada daerah kolam las akan mengalami sirkulasi akibat gaya konveksi. Gaya konveksi pada kolam las berpengaruh terhadap homogenitas struktur, segregasi dan menguapkan gas-gas yang terlarut selama pengelasan. Gaya-gaya konveksi yang bekerja antara lain gaya buoyancy (*buoyancy force*), gaya akibat tegangan permukaan (*marangoni force*) dan gaya elektromagnetik (*lorenz force*) yang timbul akibat arus listrik las. Dari ketiga gaya yang bekerja, gaya elektromagnetik memberi pengaruh paling dominan terhadap sirkulasi kolam las [7].

Penelitian Yang Y.P., Dong P., Zhang J., and Tian X. 2000 dengan menggunakan spesimen *high-strength aluminum alloy* ditemukan bahwa untuk menghasilkan struktur yang lebih baik pada HAZ (*heat affected zone*) dapat dimanfaatkan gaya elektromagnetik pada busur las guna mendapatkan perubahan orientasi yang lebih baik pada saat solidifikasi logam las.

Laju konveksi pada *weld pool* dapat ditingkatkan dengan memperbesar gaya aktivasinya. Salah satunya adalah dengan memperbesar gaya elektromagnetik melalui penambahan besar induksi magnet di sekitar daerah las cair. Peletakan medan magnet di sekitar daerah lasan akan berpengaruh pada besar dan arah induksi magnet [4].

Berangkat dari beberapa penelitian terdahulu bahwa gaya elektromagnetik yang bekerja pada kolam las cenderung meningkatkan homogenitas hasil las. Semakin tinggi arus pengelasan yang diberikan, maka semakin besar gaya elektromagnetik yang bekerja sehingga semakin cepat pula aliran logam las cair, dan homogenitas hasil las juga akan meningkat.

2. Tinjauan Pustaka

Baja karbon rendah ST 37 adalah salah satu dari baja yang memiliki unsur paduan dengan kandungan karbon 0.28%, kromium 0.11%, silikon 0.4%, dan mangan 0.53%. Baja ST 37 ini memiliki *weldability* yang baik. Karena mempunyai kadar karbon yang rendah tentu memiliki kepekaan retak las yang rendah pula.

Stainless steel SUS 430 adalah salah satu jenis baja paduan tinggi yang memiliki unsur paduan karbon 0.14%, kromium 14.3%, silikon 0.4% dan mangan 0.99%. SUS 430 ini tergolong *Ferritic Stainless Steel* yang memiliki sifat *weldability* yang kurang baik apabila dibandingkan dengan *austenitic stainless steel*, karena butiran HAZ yang kasar menyebabkan kekuatan material menurun.

2.1. Dissimilar Welding

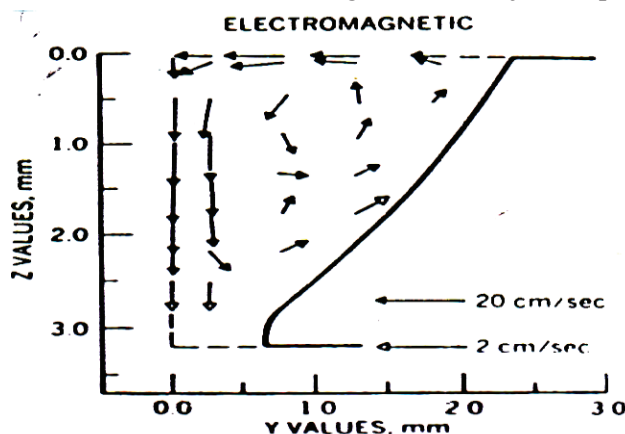
Dissimila welding adalah proses pengelasan, atau penggabungan dua logam yang tidak sejenis yang memiliki sifat fisik dan karakteristik material yang berbeda. Macam-macam pengelasan *dissimila* dengan *stainless steel* :

- Pengelasan *dissimilar* antara *austenitic stainless steel* dengan *low alloy steel* atau *carbon steel*.
- Pengelasan *dissimilar* antara *martensitic stainless steel* dengan *low alloy steel* atau *carbon steel*.
- Pengelasan *dissimilar* antara *ferritic stainless steel* dengan *low alloy steel* atau *carbon steel*.

2.2. Konveksi Pada Kolam Las

Selama pengelasan menggunakan las busur listrik (*arc welding*) akan timbul gaya konveksi pada kolam las yang mengakibatkan pergerakan logam cair. Gaya konveksi tersebut antara lain gaya buoyancy, gaya marangoni dan gaya elektromagnetik. Besarnya gaya elektromagnetik (gaya Lorentz) dirumuskan: $F = J \times B$ [6], dengan J adalah vektor rapat arus listrik dan B merupakan vektor fluks magnetik. Gaya elektromagnetik yang terjadi mengakibatkan arus konveksi logam las cair yang berlawanan dengan arus konveksi yang ditimbulkan oleh pengaruh gaya *bouyancy* maupun gaya marangoni [6].

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 [5] sebagaimana ditunjukkan pada gambar berikut:



Gambar 1. Penetrasi yang ditimbulkan gaya elektromagnetik

Sumber : Kou, Sindo, 1987 : 97

Gaya elektromagnetik dengan sirkulasi logam cair yang dihasilkan sangat berperan dalam proses pencampuran (*mixing*) kolam las. Hal ini berpengaruh terhadap tingkat homogenitas komposisi dalam kolam las [5].

Meningkatkan gaya elektromagnetik dengan memperbesar arus pengelasan akan memperbesar masukan panas dan menimbulkan tegangan sisa, distorsi dan perubahan pada struktur mikro [6].

Dengan meningkatnya gaya elektromagnetik, maka laju konveksi logam las cair semakin besar. Dampaknya adalah nilai efektif konduktifitas termal logam las cair (k_L) menjadi lebih besar sehingga temperatur kolam las menjadi lebih rendah [5].

2.3. Pengaruh Konveksi pada Pengelasan

Konveksi yang terjadi pada kolam las cair selama proses pengelasan berlangsung akan mempengaruhi aliran fluida yang akan berpengaruh pada bentuk kolam las sebagai akibat pengikisan fluida yang disebabkan oleh distribusi panas, pencampuran yang akan menentukan tingkat homogenitas kimia sebagai hasil *macrosegregation* dan distribusi porositas akibat gas yang terlarut [6].

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.

2.4. Medan Magnet Solenoida

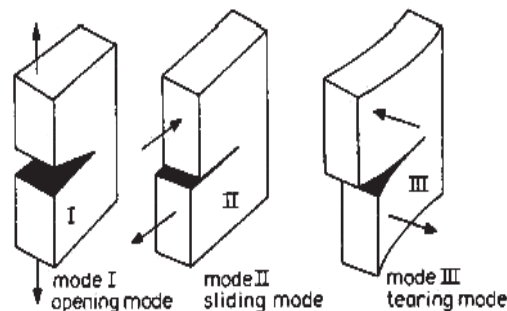
Medan magnet dapat didefinisikan sebagai area di sekitar magnet atau sebuah penghantar yang dialiri arus listrik. Sedangkan vektor magnet dinamakan induksi magnet (*magnetic induction*), yang dapat dinyatakan dengan garis-garis induksi (*line of induction*).

Solenoida merupakan kumparan atau lilitan kawat yang membungkus inti logam dan menghasilkan medan magnet apabila arus listrik dialirkan padanya. Arah garis medan magnet tergantung pada arah aliran arus listrik dalam kumparan (solenoida). Apabila kedalam solenoida dimasukan bahan ferromagnetik seperti besi, baja, silikon, maka medan magnet yang dihasilkan akan bertambah besar. Peningkatan medan magnet yang terjadi pada solenoida merupakan penjumlahan antara medan magnet yang dihasilkan solenoida dan medan magnet eksternal yang dihasilkan inti solenoida yang menjadi magnet. Peningkatan medan magnet yang terjadi tersebut dinamakan induksi magnetik atau rapat fluks magnetik dan diberi simbol B.

2.5. Laju Perambatan Retak Fatik

Ada tiga model bukaan retak yang terjadi pada logam, diakibatkan oleh tiga macam pola pembebanan.

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 [2].



Sumber: David Broek, 1978: 8

Gambar 2. Mode bukaan retak

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

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{BW^{1/2}} \times \frac{(2 + \alpha)}{(1 - \alpha)^{3/2}} \times (0.886 + 4.64\alpha - 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4)$$

dengan,

K = faktor intensitas tegangan ($\text{MPa.m}^{1/2}$)

P = gaya luar (gaya tarik) (Pa)

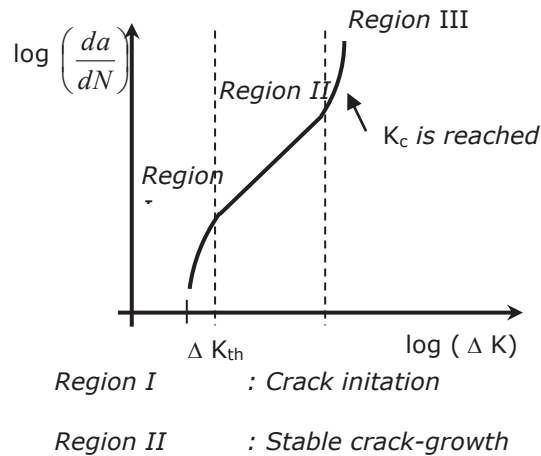
B = tebal plat (mm)

W = lebar plat (mm)

$\alpha = a/W$ dimana $a/W \geq 0.2$

(standard test method for measurement of fatigue crack growth rates¹⁾)

Secara umum karakteristik perambatan retak fatik untuk bahan metal dapat dibagi menjadi tiga daerah.



Sumber: Bannantine, Julie A., 1990: 291

Gambar 3. Kurva laju pertumbuhan retak

Daerah I (*Region I*) disebut daerah ambang fatik (*fatigue threshold*) 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 terjadi perambatan fatik, biasanya daerah ini tidak dipertimbangkan dalam perancangan struktur. Daerah ini terutama dikendalikan oleh parameter ketangguhan bahan terhadap retak [3].

Paris menjelaskan bahwa pertumbuhan retak akan dihasilkan saat pembebanan yang diberikan 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,

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

dengan,

n = koefisien eksponensial

C = konstanta bahan

a = panjang retak (mm)

N = jumlah siklus pembebanan (siklus)

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

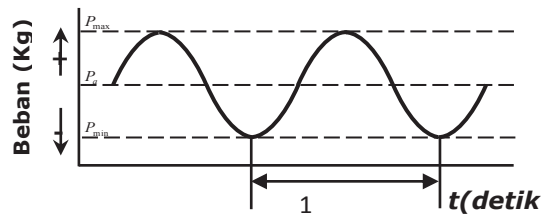
da/dN = laju perambatan retak fatik (mm/siklus)

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 ditulis,

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

Pola pembebanan yang digunakan adalah sinusoidal sebagaimana Gambar.4. dengan beban siklis amplitudo konstan berupa P_{maks} dan P_{min} . maka tegangan yang ada berupa σ_{maks} dan σ_{min} dan daerah tegangannya adalah,

$$\Delta \sigma = \sigma_{maks} - \sigma_{min}$$



Gambar 4. Siklus pembebanan pada pengujian perambatan retak fatik

Sumber : Fuchs H.O. 1980: 82

Tegangan maksimum yang diberikan pada waktu pengujian diambil 0,3 – 0,5 dari tegangan *ultimate*-nya. Dalam pengujian ini digunakan variabel perbandingan tegangan atau beban. Dengan adanya perbandingan tegangan ini maka dalam suatu pengujian hanya diperlukan variable tegangan atau beban maksimum. Perbandingan atau rasio tegangan dapat dihitung dengan persamaan,

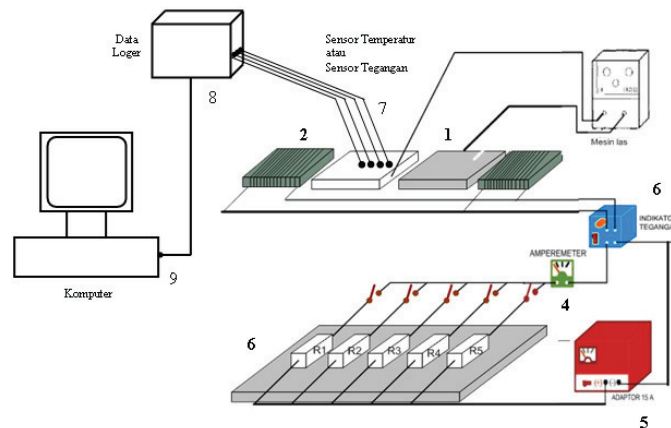
$$R = \frac{K_{\min}}{K_{\max}} = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = \frac{P_{\min}}{P_{\max}} \quad (\text{Broek, D. 1986 : 27})$$

2.6. Hipotesis

Berdasarkan permasalahan dan teori yang ada maka dapat diambil hipotesa, bahwa semakin besar kuat arus yang dialirkan ke solenoida selama pengelasan akan semakin besar pula gaya elektromagnet yang bekerja pada kolam las sehingga laju sirkulasi logam cair pada kolam las juga semakin meningkat. Dampaknya adalah struktur logam las semakin homogeny dan laju perambatan retak logam las semakin rendah.

3. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental skala laboratorium. Material yang disambung adalah baja karbon rendah ST37 dengan *stainless steel* SUS 430. Proses pengelasan menggunakan las GTAW dengan jenis sambungan tumpul. Jumlah lilitan solenoida adalah 100 menggunakan kawat tembaga diameter 0.45 mm. Fluks magnet dibangkitkan dengan mengalirkan arus DC ke solenoida sebesar 0 Ampere, 3 Ampere, 5 Ampere, 10 Ampere, 12 Ampere dan 15 Ampere. Arus DC dialirkan secara bersamaan ke solenoida dari dua sisi benda kerja (logam A dan Logam B) sebagaimana instalasi penelitian berikut ini.



Gambar 5. Instalasi Penelitian

Keterangan:

- | | |
|----------------------|-------------------------|
| 1. Logam induk | 2. Solenoida |
| 3. Mesin las MIG | 4. Ampere meter |
| 5. Adaptor 15 A. | 6. Indikator tegangan |
| 7. Sensor Temperatur | 8. Data logger atau ADC |
| 9. Komputer | |

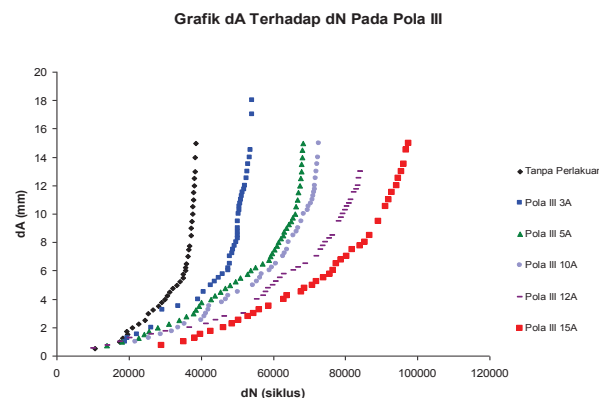
4. Hasil dan Pembahasan

4.1. Data Hasil Pengujian Induksi Magnet

Hasil pengukuran data fluks magnet rata-rata menggunakan Teslameter dari perubahan arus pembangkit 0, 3, 5, 10, 12 dan 15 Ampere berturut turut adalah 0 mT; 1,59 mT; 1,71 mT; 3,62 mT; 3,9 mT dan 4,32 mT.

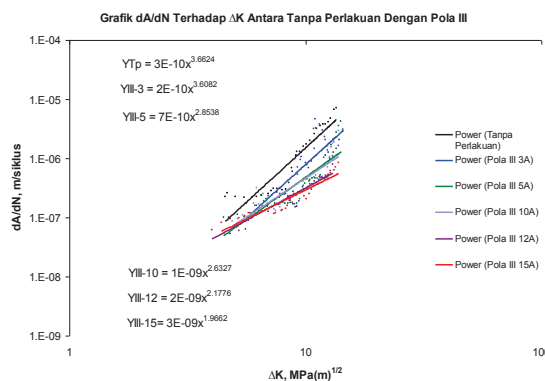
4.2. Hasil Pengujian Laju Perambatan Retak

Dari gambar 6 diketahui bahwa penambahan fluks magnet mampu menurunkan laju perambatan retak lelah. Penurunan tersebut terlihat pada grafik da (pertambahan panjang retak (mm)) terhadap dN (pertambahan siklus). Semakin besar fluks magnet yang ditambahkan menghasilkan perambatan retak lelah yang semakin lambat yang ditandai dengan bentuk grafik yang semakin landai.



Gambar 6. Grafik da (mm) terhadap dN (siklus)

Selanjutnya dari Gambar 7 tampak bahwa semakin besar penambahan fluks magnet menghasilkan bentuk grafik yang semakin landai. Hal tersebut disebabkan karena penambahan fluks magnet dari kedua sisi logam SUS 430 dan ST 37 menyebabkan garis-garis medan magnet mengarah ke pusat las dan memperbesar gaya elektromagnet pada kolom las. Naiknya gaya elektromagnet pada kolom las menyebabkan laju sirkulasi logam cair meningkat dan proses pencampuran logam las pada kolom las semakin efektif. Laju sirkulasi logam cair yang semakin meningkat menghasilkan laju perambatan retak pada logam las semakin rendah.

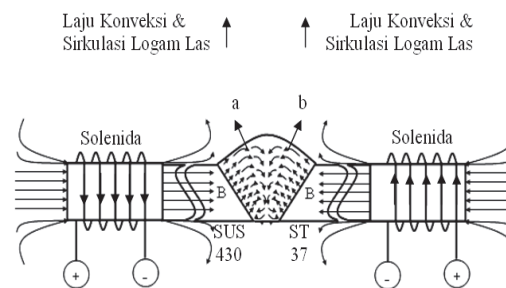


Gambar 7. Grafik da/dN vs ΔK

Spesimen tanpa perlakuan memiliki laju perambatan retak tertinggi. Hal ini disebabkan karena pada proses pengelasan tidak ditambahkan fluks magnet dari luar sehingga gaya elektromagnetik hanya ditimbulkan dari arus las saja. Akibatnya sirkulasi logam cair kurang cepat dan proses pengadukan yang terjadi pada kolom las juga kurang sempurna.

Semakin rendah tingkat pencampuran yang terjadi akan semakin rendah pula laju sirkulasi pada kolam las. Laju sirkulasi logam cair yang rendah menyebabkan homogenitas struktur logam las juga kurang dan laju perambatan retak logam las tinggi.

Penambahan induksi magnet dari kedua sisi logam selama pengelasan yaitu dari sisi SUS430 dan ST37 sebagaimana gambar 8 akan meningkatkan proses pencampuran pada kolam las. Karena proses pencampuran tersebut terjadi pada kedua sisi logam secara terus-menerus sehingga pola pengadukan yang terjadi semakin merata ke seluruh bagian kolam las sehingga pencampuran logam cair SUS 304 dengan ST37 semakin efektif. Semakin tinggi laju sirkulasi logam cair menyebabkan proses pencampuran logam cair juga semakin efektif dan akibatnya adalah mikrostruktur logam las semakin homogen serta laju perambatan retak fatik logam las semakin rendah.



Gambar 8. Ilustrasi sirkulasi logam cair pada spesimen dengan penambahan fluks magnet dari kedua sisi SUS430 dan ST37.

5. Kesimpulan

5.1. Kesimpulan

Kesimpulan dari penelitian ini adalah:

1. Penambahan fluks magnet selama proses pengelasan mampu menurunkan laju perambatan retak.
2. Semakin besar fluks magnet yang ditambahkan dari luar dari kedua sisi material menyebabkan laju perambatan retak logam las semakin menurun.

5.2. Saran

Penelitian perlu dilanjutkan dengan menguji HAZ dan *unmixed zone* karena kedua daerah ini termasuk yang rentan terhadap kegagalan retak.

6. Daftar Referensi

- [1] Bannantine, J. A. 1990. *Fundamental of Metal Fatigue Analysis*. New Jersey: Prentice Hall Englewood Cliffs.
- [2] Broek David. 1987. *Elementary Engineering Fracture Mechanics* Martinus Nijhoff Publisher : Netherlands.
- [3] Jamasri. 1999. *Diktat Perpatahan dan Kelelahan*. FT. Universitas Gadjra Mada: Yogyakarta.
- [4] Kostov, Andonov A. et al. 2005. *Modelling Of Magnetic Fields Generated By Cone-Shape Coils For Welding With Electromagnetic Mixing*.
- [5] Kou, Sindo. 1987. *Welding Metalurgy*, New Jersey : Wiley-interscience.
- [6] Messler, Robert.W. 1999. *Principles of Welding*. John Wiley & Sons : Canada.
- [7] Oreper G.M., Eagar T.W., and Szekely J. 1983. *Convection in Arc Weld PoolsI*. Departement of Materials Science and Engineering, M.I.T., Cambridge, Mass.
- [8] Yang Y.P., Dong P., Zhang J., and Tian X. 2000. *A Hot Cracking Mitigation Technique for Welding High-Strength Aluminum Alloy*. The Center for Welded Structure Research Battelle: Columbus.