

Analisis Kemampuan Pendeteksian Pengujian *Eddy Current* terhadap Retak Memanjang Logam Las pada Sambungan *Tee Joint* Material Aluminium 5083 Dilapisi *Non-Conductive Coating* dengan Variasi Panjang dan Kedalaman Cacat

Henry Haidar Jati Andrian dan Wing Hendropasetyo Akbar Putra
Departemen Teknik Perkapalan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: winghendropasetyo@gmail.com

Abstrak—Material seringkali mengalami kerusakan atau retak yang diakibatkan oleh proses pengelasan, salah satunya berada di bawah lapisan pelindung material. Retak tersebut dapat diperiksa dengan metode *Eddy Current Testing*. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis sensitivitas dari *Eddy Current Testing* (ECT) dengan menggunakan variasi dimensi retak pada sambungan las *tee joint* material aluminium 5083. Penelitian ini menggunakan lima buah *test piece* material aluminium 5083 dengan masing-masing material berukuran 200 mm x 50 mm x 10 mm. Tiap material tersebut disambungkan dengan cara dilas. Retak buatan dibuat dengan menggunakan *Electrical Discharge Machining* (EDM) dengan variasi panjang dan kedalaman retak dengan 4 retak tiap *test piece*. Variasi panjang retak yang digunakan yaitu: 5.0 mm, 7.0 mm, 9.0 mm, dan 15.0 mm. Untuk variasi kedalaman retak yang digunakan yaitu: 0.5 mm, 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm dan 2.5 mm. Dengan menggunakan pengaturan parameter pengujian sebagai berikut. *Probe connector*: BNC; *Frequency mode*: Single; *Frequency*: 30 kHz; *Angle*: 352°; *H gain*: 59.8 dB; *V gain*: 68.9 dB; didapatkan hasil tinggi rata-rata indikasi sinyal retak pada pendeteksian kedalaman retak sebagai berikut. Untuk kedalaman retak 0.5 mm tinggi indikasi sinyal retaknya 4.5 mm; kedalaman 1.0 mm adalah 11.75 mm; kedalaman 1.5 mm adalah 19.75 mm; kedalaman 2.0 mm adalah 26.5 mm dan kedalaman 2.5 mm adalah 31.25 mm. Tingkat ketelitian yang didapat untuk pendeteksian kedalaman retak ialah 93.57%. Untuk pendeteksian panjang retak didapatkan hasil rata-rata panjang terukur retak buatan sebagai berikut: panjang retak aktual 5 mm memiliki nilai panjang retak terukur 6.32 mm; panjang retak aktual 7 mm memiliki nilai panjang retak terukur 7.18 mm; panjang retak aktual 9 mm memiliki nilai panjang retak terukur 8.8 mm dan panjang retak aktual 15 mm memiliki nilai panjang retak terukur 14.48 mm. Tingkat ketelitian yang didapat untuk pendeteksian panjang retak ialah 91.31%.

Kata Kunci—Aluminium 5083, *Eddy Current Testing*, Retak, *Tee-joint*.

I. PENDAHULUAN

Material akan mengalami kerusakan bila dilakukan proses pengelasan yang kurang baik. Bila ada beban pada pengelasan pada material secara terus menerus akan meningkatkan kerusakan pada cacat las. Kerusakan dapat terjadi pada permukaan serta dibawah permukaan las. Bila terjadi dibawah permukaan las, maka diperlukan metode *Non-Destructive Testing* (NDT) untuk mendeteksi kerusakan

tersebut.

Salah satu metode NDT untuk mendeteksi kerusakan dibawah permukaan material ialah *Eddy Current Testing* (ECT). ECT memiliki tingkat keakuratan tinggi juga dapat digunakan untuk material *feromagnetik* dan *non-feromagnetik* serta dapat mendeteksi kerusakan di bawah lapisan pelindung permukaan material. Berdasarkan permasalahan yang ada, maka dilakukan analisis pendeteksian panjang dan kedalaman retak menggunakan metode *Eddy Current Testing* (ECT) untuk material aluminium 5083 pada sambungan *tee joint*.

Permasalahan yang akan dikaji ialah bagaimana perbandingan pengaruh variasi kedalaman dan panjang retak terhadap tingkat sensitivitas retak memanjang dari metode *Eddy Current Testing* (ECT) terhadap material las aluminium 5083 dilapisi *non-conductive coating* dengan *tee joint* pada weld metal. Tujuan penelitian ini untuk mengetahui perbandingan pengaruh variasi kedalaman dan panjang retak terhadap tingkat sensitivitas retak memanjang dari metode *Eddy Current Testing* (ECT) terhadap material las aluminium 5083 dilapisi *non-conductive coating* dengan *tee joint* pada weld metal.

II. URAIAN PENELITIAN

A. Pengujian *Eddy Current*

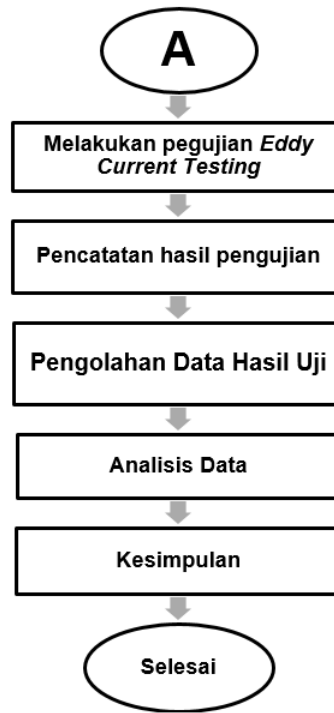
Pengujian *Eddy Current* didasarkan pada interaksi antara sumber medan magnet dan bahan uji. Pengujian *eddy current* memungkinkan pendeteksian retak dalam berbagai macam bahan konduktif, baik *feromagnetik* atau *non-feromagnetik* [1].

B. Prinsip *Eddy Current*

Prinsip uji metode *eddy current* didasarkan pada fenomena fisika induksi elektromagnetik. Bila pada *probe eddy current* diberi arus bolak balik maka arus akan mengalir melalui kumparan kawat dan menghasilkan medan magnetik. Bila *probe* mendekati bahan komnduktif akan timbul arus pusar pada logam akibat medan magnet *probe*. Ketika *probe* melewati cacat pada material akan terjadi perubahan impedansi ditunjukkan dari besar amplitude dan sudut fase dimana amplitude menunjukkan besaran cacat dan sudut fase



Gambar 1. Diagram alir pengerjaan tugas akhir.



Gambar 2. Diagram alir pengerjaan tugas akhir (lanjutan).

menunjukkan kedalaman cacat [2]. *Probe* bereaksi dengan arus bolak-balik (50 Hz-5 mHz ~ 100 mA) yang menghasilkan medan magnet utama di sekitar *coil*. Ketika bahan konduksi listrik dibawa mendekati kumparan ini, *arus dari eddy current* diinduksi dalam material sesuai dengan hukum Faraday [3].

C. Faktor Penting Dalam Pengujian Eddy Current

Faktor Penting dalam pengujian *Eddy Current* ialah:

1. Konduktivitas Listrik, yakni kemampuan material menghantarkan arus listrik. Semakin besar konduktivitas listrik, semakin besar arus *Eddy* pada permukaan material [4].
2. Permeabilitas Magnetik, yakni kemampuan bahan untuk memusatkan garis magnet atau kemudahan bahan dapat dimagnetisasi. Logam *non-ferrous* seperti aluminium memiliki permeabilitas relatif numerik yaitu 1 [4].
3. *Lift-off*, ketika permukaan kumparan dialiri arus *eddy* kumparan berada di atas penghantar, adanya variasi jarak diantara kumparan dan penghantar akan mengubah impedansi kumparan. Pengaruh *lift-off* tinggi karena variasi jarak kecil dapat menutupi banyak indikasi [5].

D. Kedalaman Penembusan Standar

Kedalaman penembusan standar didefinisikan sebagai kedalaman dimana kerapatan *eddy current* kurang lebih 37% kerapatannya di permukaan. Rumus kedalaman penembusan menggunakan hambatan, frekuensi, dan permeabilitas dinyatakan di bawah ini [4]:

$$\delta = K \sqrt{\frac{\rho}{f \mu_{rel}}}$$

Dimana:

- δ : Kedalaman penembusan standar
- K : 50 (untuk millimeter) atau 1.98 (untuk inci)
- ρ : Resistivitas (micro-ohm-centimeter)

f : Frekuensi (hertz)

μ_{rel} : 1 (untuk material *nonferromagnetic*)

$$SDP = 2 \sqrt{\frac{\rho}{f}}$$

$$3 \times SDP = l/e_3 = 5\% = EDP$$

Kedalaman penembusan standar dan efektif menunjukkan distribusi arus *eddy* dalam material dan kuat pengaruhnya pada daerah perhatian [4].

E. Aluminium

Aluminium didapat dari tanah liat jenis *bauxit* yang dipisahkan lebih dahulu dari unsur-unsur yang lain dengan menggunakan larutan tawas murni sampai menghasilkan oksida aluminium (Al_2O_3). Penelitian ini menggunakan aluminium 5083, yang memiliki performa yang sangat baik dalam lingkungan yang ekstrem. Aluminium paduan 5083 juga mempunyai sifat *weldability* yang sangat baik serta kekuatan tinggi diantara jenis aluminium *non-heat treatable* [6].

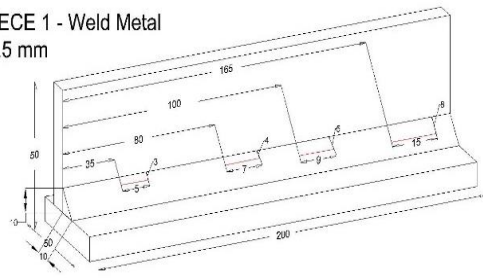
F. Pengelasan Gas Metal Arc Welding (GMAW)

Proses pengelasan ini dikenal sebagai pengelasan dengan elektroda tak terputus dimana kawat elektrodanya bersifat *consumable electrode* sebagai pembangkit busur listrik dan logam pengisi [7]. Prinsip GMAW bahwa peleburan oleh busur listrik secara berlanjut dan mekanisme efek *joule*. Pengelasan dibuat dengan transfer logam las pada kolam las dengan gas pelindung argon dan helium untuk menghindari kontaminasi oleh oksigen dan nitrogen pada logam las [6].

G. Electrical Discharge Machining

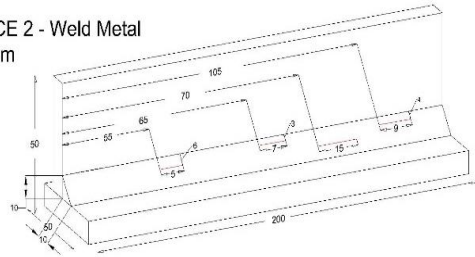
Electrical Discharge Machining merupakan proses permesinan, dimana pahatnya yang berupa elektroda akan mengikis material benda kerja sesuai dengan bentuk pahatnya

TEST PIECE 1 - Weld Metal
Depth: 0.5 mm



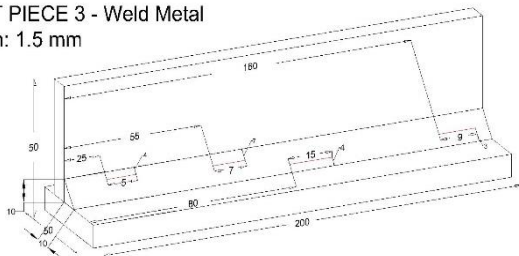
Gambar 3. Posisi retak buatan test piece 1.

TEST PIECE 2 - Weld Metal
Depth: 1 mm



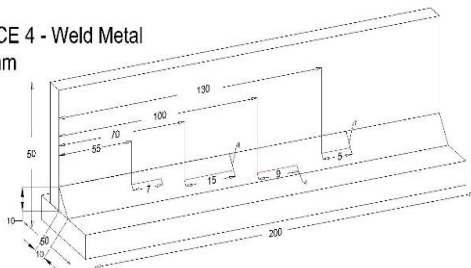
Gambar 4. Posisi retak buatan test piece 2.

TEST PIECE 3 - Weld Metal
Depth: 1.5 mm



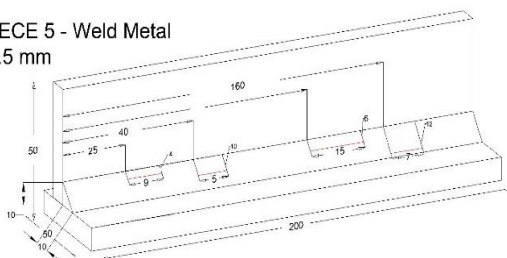
Gambar 5. Posisi retak buatan test piece 3.

TEST PIECE 4 - Weld Metal
Depth: 2 mm



Gambar 6. Posisi retak buatan test piece 4.

TEST PIECE 5 - Weld Metal
Depth: 2.5 mm



Gambar 7. Posisi retak buatan test piece 5.

[8]. Proses EDM dilakukan dengan sistem yang mempunyai dua komponen yaitu mesin dan power supply. Mesin mengendalikan pahat elektroda yang mengikis material dan menghasilkan serangkaian loncatan bunga api listrik yang berfrekuensi tinggi (*spark*). *Spark* dihasilkan dari pembangkit pulse antara elektroda dan material, yang keduanya dicelupkan dalam cairan dielektrik, akan menimbulkan pengikisan material dari material dengan erosi panas atau penguapan [9].

III. METODOLOGI

A. Diagram Alir

Gambar 1 dan Gambar 2 menunjukkan keseluruhan proses pengerjaan penelitian ini. Berisi metode dan alur pengerjaan penelitian.

B. Persiapan Material dan Alat Pembuatan Test Piece

Dilakukan persiapan dari penyediaan material dan alat pembuatan *test piece*. Persiapan yang dilakukan ialah membentuk pelat aluminium sesuai dengan dimensi *test piece* agar dapat dilakukan pengelasan pada pelat aluminium.

C. Proses Pengelasan Test Piece

Pelat *test piece* dilakukan pengelasan dengan sambungan *tee-joint* sesuai dengan dimensi yang telah ditetapkan. Sebelum dilakukan pengelasan, diberikan *stopper* pada plat material agar tidak terjadi deformasi selama pengelasan. Setelah dilakukan pengelasan, dilakukan pembersihan pada *test piece* dari *stopper* yang menempel pada *test piece*.

D. Pembuatan Retak Buatan

Retak buatan dipahat pada *test piece* dengan alat EDM. Gambar 3 - Gambar 7 merupakan dimensi retak buatan pada seluruh *test piece*.

E. Pemberian Lapisan Non-Conductive Pada Test Piece

Permukaan las setiap *test piece* diberikan lapisan *non-conductive* berupa lakban kertas tebal 200 mikron. Ketebalan lapisan dapat diukur menggunakan alat *thickness gauge*. Setelah seluruh permukaan las *test piece* telah diberi lapisan pelindung maka bisa dilakukan pengujian *eddy current*.

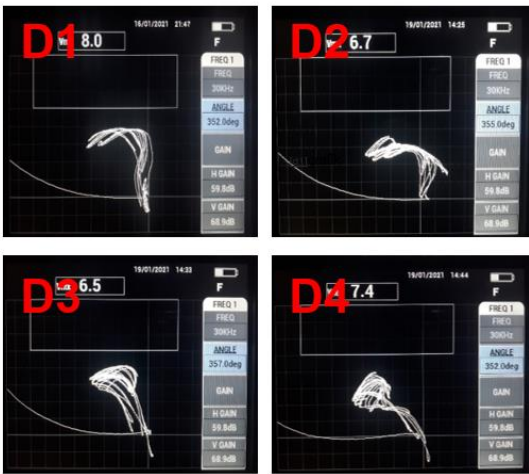
F. Pengujian Eddy Current

Sebelum memulai pengujian, diperlukan persiapan alat *Eddy Current* beserta kelengkapan lainnya sebagai berikut:

1. Blok Kalibrasi Aluminium
2. *Probe Ether NDE, type right angle probe, coil normal/single, frequency 30 kHz*
3. *Eddy Current Testing Machine Nortec 600*

Setelah peralatan siap, dilakukan tahapan pengujian *Eddy Current* sebagai berikut:

1. Material yang akan diuji dan blok kalibrasi disiapkan di meja kerja. Meja kerja yang terbuat dari bahan *non-conductive* agar tidak memengaruhi arus *eddy* saat pengujian.
2. Melapisi blok kalibrasi serta *weld metal test piece* dengan lapisan *non-conductive* dengan ketebalan 200 mikron. Lapisan *non-conductive* dapat menggunakan kertas atau plastik.
3. Melakukan kalibrasi alat menggunakan blok kalibrasi yang telah dibuat dan yang sudah dipersiapkan.
4. Kalibrasi dilakukan setiap akan memulai pengujian sesuai dengan kondisi *test piece* uji.
5. Kemudian dilakukan pengujian terhadap *test piece* uji. Pengujian hanya dilakukan pada daerah retak buatan pada *weld metal*.
6. Sebelum melakukan *scanning*, harus dilakukan *nulling*, yaitu proses menyamakan impedansi antara *probe* dan impedansi internal dari alat *Eddy Current Testing* dengan posisi *probe* menempel pada *test piece* uji.



Gambar 12. Tinggi sinyal kedalaman retak test piece 4.

Tabel 2.
Tabel ketinggian sinyal kedalaman retak test piece

Nama	Kode	Tinggi Sinyal (mm)
Test Piece 1	A1	4
	A2	5
	A3	5
	A4	4
Test Piece 2	B1	10
	B2	10
	B3	13
	B4	14
Test Piece 3	C1	19
	C2	20
	C3	20
	C4	20
Test Piece 4	D1	27
	D2	25
	D3	28
	D4	26
Test Piece 5	E1	32
	E2	32
	E3	31
	E4	30



Gambar 13. Tinggi sinyal kedalaman retak test piece 5.

Tabel 3.
Panjang retak terukur test piece 1

Kode Retak	Panjang Aktual (mm)	Panjang Terukur (mm)
A1	5	6.04
A2	7	6.9
A3	9	9.6
A4	15	15.12

Tabel 4.
Panjang retak terukur test piece 2

Kode Retak	Panjang Aktual (mm)	Panjang Terukur (mm)
B1	5	6.47
B2	7	7.32
B3	9	8.85
B4	15	14.5

Tabel 5.
Panjang retak terukur test piece 3

Kode Retak	Panjang Aktual (mm)	Panjang Terukur (mm)
C1	5	6.16
C2	7	7.41
C3	9	8.4
C4	15	16.03

5) Hasil Pengujian Kedalaman Retak Test Piece 5

Hasil pengujian kedalaman retak test piece 5 ditunjukkan pada Gambar 13.

Berdasarkan ketinggian sinyal yang didapat maka dapat diketahui tinggi sinyal masing-masing retak buatan. Tabel 2 menunjukkan ketinggian sinyal pengujian seluruh test piece.

C. Pengujian Panjang Retak Buatan

Pada pengujian ini dilakukan pendeteksian panjang retak buatan menggunakan Alat Eddy Current. Panjang retak dapat ditentukan dengan mencari ujung satu dan ujung lain suatu retak menggunakan alat Eddy Current yang kemudian diukur kedua jarak ujung tersebut. Ujung retak dapat ditemukan ketika titik tinggi sinyal tertinggi pada retak turun sebesar 6 dB atau 50% tinggi sinyal tersebut.

1) Hasil Pengujian Panjang Retak Buatan Test Piece 1

Tabel 3 merupakan hasil pengukuran panjang retak terukur pada test piece 1.

2) Hasil Pengujian Panjang Retak Buatan Test Piece 2

Tabel 4 merupakan hasil pengukuran panjang retak terukur pada test piece 2.

3) Hasil Pengujian Panjang Retak Buatan Test Piece 3

Tabel 5 merupakan hasil pengukuran panjang retak terukur pada test piece 3.

4) Hasil Pengujian Panjang Retak Buatan Test Piece 4

Tabel 6 merupakan hasil pengukuran panjang retak terukur pada test piece 4.

5) Hasil Pengujian Panjang Retak Buatan Test Piece 4

Tabel 7 merupakan hasil pengukuran panjang retak terukur pada test piece 5.

D. Nilai Sensitivitas Pengujian Eddy Current Terhadap Test Piece

Nilai sensitivitas didapatkan dengan melihat rasio dari jumlah retak yang terdapat pada test piece dengan retak yang terdeteksi oleh pengujian Eddy Current (Tabel 8).

Berdasarkan data pada Tabel 8, alat Eddy Current dapat mendeteksi seluruh retak pada semua test piece, maka nilai sensitivitas alat Eddy Current sebesar 100%.

E. Perbandingan Ketinggian Sinyal Berdasarkan Kedalaman Retak Buatan

Berdasarkan proses pengujian kedalaman retak yang telah dilakukan, selanjutnya dilakukan analisis pengaruh variasi kedalaman retak buatan. Berdasarkan hasil ketinggian sinyal, didapat hasil pada Tabel 9 dan Gambar 14.

Tabel 6.
Panjang retak terukur *test piece* 4

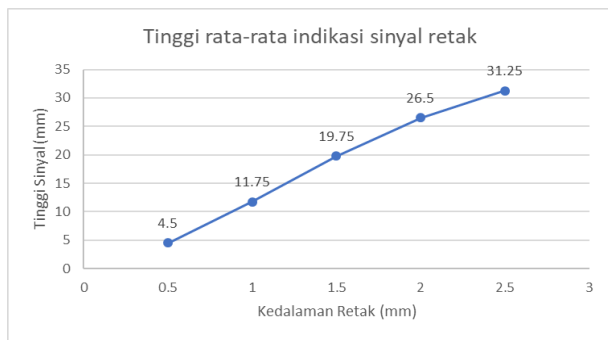
Kode Retak	Panjang Aktual (mm)	Panjang Terukur (mm)
D1	5	7.18
D2	7	6.63
D3	9	9.49
D4	15	13.64

Tabel 7.
Panjang retak terukur *test piece* 5

Kode Retak	Panjang Aktual (mm)	Panjang Terukur (mm)
E1	5	5.77
E2	7	7.66
E3	9	7.87
E4	15	13.13

Tabel 8.
Hasil perhitungan nilai sensitivitas pengujian *eddy current*

Nama <i>Test Piece</i>	<i>Test</i>	Jumlah Retak Aktual	Jumlah Retak Terdeteksi
<i>Test Piece</i> 1	4	4	4
<i>Test Piece</i> 2	4	4	4
<i>Test Piece</i> 3	4	4	4
<i>Test Piece</i> 4	4	4	4
<i>Test Piece</i> 5	4	4	4
Jumlah	20	20	20



Gambar 14. Grafik tinggi rata-rata sinyal kedalaman retak.

F. Perbandingan Panjang Retak Buatan

Berdasarkan proses pengujian panjang retak yang telah dilakukan, selanjutnya dilakukan analisis pengaruh variasi panjang retak buatan. Berdasarkan hasil ketinggian sinyal, didapat hasil pada Tabel 10.

G. Pembahasan

Untuk menemukan kedalaman penembusan standar dan kedalaman penembusan efektif, dilakukan perhitungan dengan rumus *SDP* (*Standard Depth Penetration*) dan *EDP* (*Effective Depth Penetration*) sebagai berikut:

$$\delta = K \sqrt{\frac{\rho}{f \mu_{rel}}} = 50 \sqrt{\frac{5.95}{30000 \times 1}} = 0.704 \text{ mm}$$

$$EDP = 3 \times SDP = 3 \times 0.704 = 2.112 \text{ mm}$$

Nilai kedalaman penembusan standar sebesar 0.704 mm serta nilai kedalaman penembusan efektif sebesar 2.112 mm untuk penggunaan material aluminium 5083 dengan *probe* 30 kHz.

Dari hasil analisis data pengujian yang telah dilakukan, pengujian *Eddy Current* memiliki ketelitian yang baik serta dapat mendeteksi setiap retak buatan yang ada pada *test*

Tabel 9.
Tabel rata-rata ketinggian sinyal kedalaman retak

Kedalaman Retak (mm)	Tinggi Rata-Rata Indikasi Sinyal Retak (mm)
0.5	5
1.0	11.75
1.5	19.75
2	26.5
2.5	31.25

Tabel 10.
Rata-rata panjang retak terukur

Panjang Retak (mm)	Rata-Rata Panjang Terukur (mm)
5	6.32
7	7.18
9	8.80
15	14.48

Tabel 11.
Rata-rata ketelitian kedalaman retak

Nama <i>Test Piece</i>	<i>Test</i>	Kedalaman Retak (mm)	Persentase Ketelitian	Rata-Rata Ketelitian
<i>Test Piece</i> 1	0.5		87.5%	
<i>Test Piece</i> 2	1.0		98.0%	
<i>Test Piece</i> 3	1.5		96.1%	93.57%
<i>Test Piece</i> 4	2		94.0%	
<i>Test Piece</i> 5	2.5		92.3%	

Tabel 12.
Rata-rata ketelitian panjang retak

Panjang Retak Aktual (mm)	Panjang Retak Terukur (mm)	Persentase Ketelitian	Rata-Rata Ketelitian
5	6.324	73.52%	
7	7.184	97.37%	91.31%
9	8.802	97.80%	
15	14.484	96.56%	

piece. Pada perhitungan berikut merupakan persentase tingkat ketelitian untuk kedalaman retak dan panjang retak:

1) Kedalaman Retak

Tabel 11 merupakan rata-rata persentase ketelitian pendeteksian kedalaman retak dengan alat *Eddy Current*.

Bila dalam pengujian ditemukan tinggi sinyal yang masih dalam rentang grafik Gambar 14 tersebut, tetapi tidak tepat berada pada titik kedalaman retak yang diuji, kedalaman retak dapat diperkirakan dengan menggunakan metode interpolasi polinomial sebagai berikut:

$$y = (9.846 \times 10^{-7})x^4 + (1.096 \times 10^{-5})x^3 - (2.113 \times 10^{-3})x^2 + 0.104x + 0.029$$

Dimana:

- y : Kedalaman retak yang dicari
- x : Tinggi sinyal yang ditemukan antara rentang kedalaman retak

Dengan menggunakan interpolasi polinomial dapat ditemukan persamaan di atas, untuk mencari kedalaman retak berdasarkan tinggi sinyal hasil pengujian.

2) Panjang Retak

Tabel 12 merupakan rata-rata persentase ketelitian pendeteksian panjang retak dengan alat *Eddy Current*.

V. KESIMPULAN

Kesimpulan yang dapat ditarik dari penelitian ini diantaranya; (1) Metode pengujian *Eddy Current* memiliki

nilai sensitivitas 100% untuk mendeteksi retak pada material aluminium 5083 karena dapat mendeteksi seluruh retak buatan pada semua *test piece*. (2) Nilai *Standard Depth Penetration* (SDP) dan *Effective Depth Penetration* (EDP) masing-masing ialah 0.704 mm dan 2.112 mm. (3) Pengujian *Eddy Current* untuk pendeteksian kedalaman retak memiliki hasil bahwa semakin dalam retak yang ada pada material maka semakin tinggi sinyal yang dihasilkan oleh alat *Eddy Current*. (4) Persentase ketelitian pengujian *Eddy Current* untuk mendeteksi kedalaman retak pada material aluminium 5083 dengan sambungan *tee joint* dengan lapisan pelindung setebal 200 mikron ialah 93.57%. (5) Bila dalam pengujian kedalaman retak untuk material aluminium 5083 memiliki kondisi sama dengan *test piece* yang telah diuji, diperoleh tinggi sinyal yang tidak tepat berada pada tinggi sinyal hasil pengujian, tetapi masih dalam rentang tinggi sinyal yang telah didapatkan hasil pengujian, maka kedalaman retak dapat diprediksi menggunakan persamaan yang ada. (6) Pengujian *Eddy Current* untuk pendeteksian panjang retak memiliki hasil bahwa alat *Eddy Current* dapat mendeteksi ujung satu dan ujung lainnya pada retak. Hal ini dapat ditentukan ketika titik tertinggi sinyal suatu retak pada alat *Eddy Current* turun sebesar 6 dB atau 50% tinggi sinyal retak. (7) Persentase ketelitian pengujian *Eddy Current* untuk mendeteksi panjang retak pada material aluminium 5083 dengan sambungan *tee joint* dengan lapisan pelindung setebal 200 mikron ialah

91.31%.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. García-Martín, J. Gómez-Gil, and E. Vázquez-Sánchez, "Non-destructive techniques based on eddy current testing," *Sensors*, vol. 11, no. 3, pp. 2525–2565, 2011.
- [2] F. Lingvall and T. Stepinski, "Automatic detection of defects in riveted lap-joints using eddy current," *7th Eur. Conf. Non-destructive Test.*, vol. 3, no. 9, p. 7, 1998.
- [3] B. P. C. Rao, "Eddy current testing: basics," *J. Non Destruct. Test. Eval.*, vol. 10, pp. 1–16, 2011.
- [4] D. J. Hagemaier, *Fundamentals of Eddy Current Testing*, 1st ed. United States of America: The American Society for Nondestructive Testing Inc, 1990.
- [5] K. Narsaiah, A. K. Biswas, and P. K. Mandal, "Nondestructive methods for carcass and meat quality evaluation," in *Meat Quality Analysis*, India: Elsevier, 2020, pp. 37–49.
- [6] N. Kaewsakul, R. Putrontaraj, and K. Kimapong, "The effects of GMAW parameters on penetration, hardness and microstructure of AS3678-A350 high strength steel," *Int. J. Adv. Cult. Technol.*, vol. 3, no. 1, pp. 169–178, 2015.
- [7] F. Priyantoro, B. Santosa, and H. Supomo, "Analisa pengaruh luasan scratch permukaan terhadap laju korosi pada pelat baja A36 dengan variasi sistem pengelasan," *J. Tek. ITS*, vol. 1, no. 1, pp. G20–G24, 2012.
- [8] D. F. Dauw, C. A. Brown, J. P. Van Griethuysen, and J. Albert, "Surface topography investigations by fractal analysis of spark-eroded, electrically conductive ceramics," *CIRP Ann.*, vol. 39, no. 1, pp. 161–165, 1990.
- [9] D. Brink, *Principles of Operation*, 1st ed. United Kingdom: EDM Technology Transfer, 2007.