

## **PEMBUATAN ALAT UKUR KONDUKTIVITAS LISTRIK KONDUKTOR LOGAM MENGGUNAKAN METODE INDUKSI DAN PENABIRAN MAGNETIK**

**Ikhsan Setiawan<sup>1</sup>, Kamsul Abraha, dan Agung B.S. Utomo**

*Jurusan Fisika, FMIPA, Universitas Gadjah Mada*

*Sekip Utara, Yogyakarta 55281*

### **ABSTRAK**

Pengukuran besaran konduktivitas listrik konduktor logam secara akurat tidaklah mudah, dan biasanya menggunakan teknik jembatan ganda atau teknik probe empat titik. Pada makalah ini, dipaparkan tentang pembuatan alat ukur konduktivitas listrik sederhana yang didasarkan pada metode induksi Faraday dan penabiran magnetik. Alat ini terdiri dari sebuah solenoid yang dialiri arus ac berfrekuensi rendah ( $< 2,5 \text{ kHz}$ ) sehingga menghasilkan medan induksi magnetik *ac* berfrekuensi rendah. Di dalam solenoid, besar medan induksi magnetik ini mengalami pengurangan ketika sampel konduktor logam yang berbentuk tabung terbuka diletakkan di dalam dan sesumbu dengan solenoid akibat dari adanya penabiran magnetik yang ditimbulkan oleh sampel tersebut. Dengan mengukur besar medan induksi magnetik di sumbu solenoid ketika ada sampel maupun tidak ada sampel, maka besar konduktivitas listrik sampel dapat dihitung. Pengujian alat ukur ini dilakukan melalui pengukuran konduktivitas listrik sampel aluminium dan kuningan. Hasil pengukurannya memiliki perbedaan kurang dari 9% dari nilai referensi. Hal ini terutama disebabkan oleh adanya perbedaan suhu saat pengukuran dilakukan dengan suhu referensi.

**Kata kunci:** Konduktivitas listrik, induksi Faraday, penabiran magnetik

## **CONSTRUCTION OF A MEASUREMENT SYSTEM OF ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF METALLIC CONDUCTOR USING INDUCTION AND MAGNETIC SCREENING METHOD**

### **ABSTRACT**

Measurement of the electrical conductivity of metallic conductor accurately is not so easy, and usually using double bridges or four-point probe techniques. In this paper, we describe the construction of a simple electrical conductivity measurement system based on the Faraday induction and magnetic screening method. The system consists of a solenoid in where the ac current of low frequency ( $< 2,5 \text{ kHz}$ ) flows so that it produces a low frequency of ac magnetic induction. Inside the solenoid, the magnitude of magnetic induction is reduced when a sample of an opened tube metallic conductor is inserted coaxially inside the solenoid because of the presence of magnetic screening produced by the sample. By measuring the magnetic induction at the axis of the solenoid with sample and without sample, the value of the electrical conductivity of sample can be calculated. The measurement system was tested by measuring the electrical conductivities of aluminium and brass. The results have a discrepancies less than 9% compared to the reference values. This is mainly because of the difference from the temperature reference and to this work.

**Keywords:** electrical conductivity, Faraday induction, magnetic screening

---

<sup>1</sup> E-mail: ikhsan\_s@ugm.ac.id, Website: <http://setiawan.synthasite.com>

## 1. PENDAHULUAN

Salah satu besaran atau sifat penting material (bahan), khususnya material konduktor logam, adalah konduktivitas listrik. Konduktivitas listrik material nonkonduktor dapat dengan mudah diukur dengan metode pengukuran arus dan tegangan listrik. Sedangkan pengukuran konduktivitas listrik bahan konduktor yang baik (logam) tidak dapat dilakukan dengan cara tersebut karena yang akan terjadi adalah hubung pendek (*short circuit*). Pengukuran konduktivitas listrik bahan konduktor secara akurat biasanya tidaklah mudah, dan kerap memerlukan penggunaan teknik rangkaian jembatan (jembatan Hartshorn, jembatan Wheatstone, jembatan Kelvi) atau teknik probe empat titik (Kraftmakher, 2000; Schuetze, 2004; Iniguez dkk, 2005; Bowler dan Huang, 2005; Hong-min dkk, 2007).

MacLatchy dkk (1993) menggunakan prinsip induksi dalam eksperimen pengereman magnetik yang dialami sebuah magnet yang bergerak di dalam pipa konduktor. Isono dan Kotani (1995) mengukur konduktivitas listrik secara nirlsentuh dengan mengamati osilasi arus di dalam konduktor yang bervibrasi. Hahn dkk (1998) mempelajari redaman arus eddy pada sebuah magnet yang berosilasi dalam pipa konduktor yang dilengkapi dengan koil pemacu dan koil sinyal dengan memanfaatkan induksi Faraday. Sedangkan Iniguez dkk (2004) mempelajari konduktivitas listrik tabung logam dengan menganalisis hambatan yang dialami magnet yang dijatuhkan ke dalam pipa konduktor secara vertikal. Selanjutnya, Iniguez dkk (2005) melakukan pengukuran konduktivitas listrik tabung logam dengan mempelajari efek penabiran magnetik.

Pada makalah ini disajikan tentang penyusunan dan pengujian alat ukur konduktivitas listrik konduktor logam berdasarkan pada induksi Faraday dan penabiran magnetik yang paparkan oleh Iniguez dkk (2005). Dalam hal ini, bahan sampel yang digunakan adalah aluminium dan kuningan, dan dibatasi hanya dalam rentang frekuensi induksi magnetik yang rendah di bawah 2,5 kHz agar efek kulit (*skin effect*) dapat diabaikan (Wiederick dan Gauthier, 1983; Iniguez dkk, 2005).

## 2. DASAR TEORI

Sebuah solenoid yang dialiri arus listrik bolak-balik (*ac*)  $I_0 \cos \omega t$  akan menghasilkan induksi magnetik *ac* di sepanjang sumbu solenoid, yang diungkapkan sebagai

$$B_s(t) = \frac{\mu_0 N_s}{l_s} I_0 \cos \omega t \quad (1)$$

dengan  $I_0$  dan  $\omega$  adalah amplitudo dan frekuensi sudut arus *ac*,  $N_s$  adalah cacah lilitan solenoid,  $l_s$  adalah panjang solenoid, dan  $\mu_0$  adalah permeabilitas vakum atau udara. Sedangkan, Induksi magnetik rerata di sumbu solenoid adalah

$$\bar{B}_s = \frac{\mu_0 N_s}{l_s} \bar{I} \quad (2)$$

dengan  $\bar{I}$  adalah arus rerata.

Jika sampel konduktor yang berbentuk tabung silindris berongga dimasukkan sesumbu ke dalam solenoid tersebut, maka akan muncul arus induksi tabung  $I_t$  yang mengalir bolak-balik sepanjang keliling selimut tabung (Gambar 1). Arus induksi ini menghasilkan induksi magnetik tabung  $B_t$  yang melawan induksi magnetik solenoid  $B_s$ , dan hal inilah yang disebut sebagai penabiran magnetik

Untuk tabung konduktor nonmagnetik, dengan arus listrik induksi (sesaat)  $I_t$  dalam arah mengelilingi lingkaran, resistansinya adalah

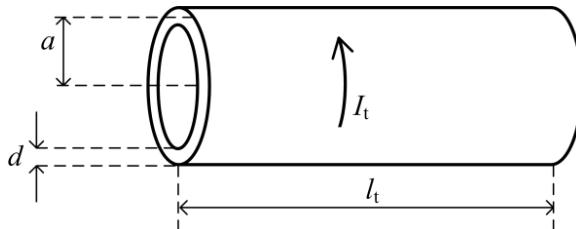
$$R = \frac{2\pi a}{\sigma l_t d} \quad (3)$$

dengan  $a$ ,  $d$ , dan  $l_t$  berturut-turut adalah jejari rerata, tebal, dan panjang tabung,  $\square$  adalah konduktivitas bahan tabung, dengan induktansi diri konduktor tabung ini adalah

$$L = \mu_0 \frac{\pi a^2}{l_t} \quad (4)$$

Jika dianggap bahwa tabung merupakan kumparan lilitan tunggal ( $N_t = 1$ ) dan panjang tabung sama dengan panjang solenoid  $l_t = l_s = l$ , maka induktansi bersama ( $M$ ) tabung dan solenoid ini dapat diperoleh sebagai

$$M = \mu_0 N_s \left( \frac{\pi a^2}{l} \right) = N_s L \quad (5)$$



**Gambar 1.** Geometri sampel berupa tabung silindris terbuka dengan penampang lingkaran. Di sini,  $a$ ,  $d$ , dan  $l_t$  berturut-turut adalah jejari rerata, tebal, dan panjang tabung, sedangkan  $I_t$  adalah arus induksi pada tabung.

Dalam hal ini, tegangan gaya gerak listrik (*electromotive force, emf*) terinduksi rerata pada tabung dapat diperoleh dari rumus  $\bar{\mathcal{E}} = \bar{B}_s A_t \omega N_t$ , dengan  $A_t$  adalah luas penampang tabung ( $= \pi a^2$ ). Menggunakan persamaan (2) dan persamaan (5), serta mengingat  $N_t = 1$ , maka diperoleh *emf* terinduksi rerata sebagai  $\bar{\mathcal{E}} = \omega M \bar{I}$  yang dapat dinyatakan dalam notasi kompleks sebagai

$$\bar{\mathcal{E}} = -i\omega M \bar{I} \quad (6)$$

Hal ini dikarenakan tabung memiliki impedansi kompleks  $Z = R + i\omega L$  dengan argumen sudut  $\varphi$  memenuhi hubungan

$$\tan \varphi = \frac{\omega L}{R} \quad (7a)$$

dengan  $\omega = 2\pi f$  dan  $f$  adalah frekuensi arus *ac*, sehingga dengan persamaan (3) dan persamaan (4) diperoleh

$$\tan \varphi = \pi \mu_0 \sigma a d f \quad (7b)$$

Arus induksi rerata pada tabung, yaitu  $\bar{I}_t = \bar{\mathcal{E}}/Z$ , dapat diperoleh sebagai

$$\bar{I}_t = -\frac{i\omega M}{R + i\omega L} \bar{I} \quad (8)$$

Arus induksi ini menimbulkan medan induksi magnetik di sumbu tabung ( $\bar{B}_t$ ) yang dapat dinyatakan sebagai

$$\bar{B}_t = \mu_0 \frac{\bar{I}_t}{l} = -\frac{\mu_0}{l} \left( \frac{i\omega M}{R + i\omega L} \right) \bar{I} \quad (9)$$

Dengan adanya medan induksi magnetik dari tabung tersebut, maka medan induksi magnetik total di dalam dan di sepanjang sumbu bersama tabung dan solenoid adalah

$$\bar{B}_s + \bar{B}_t = \frac{\mu_0}{l} \left( N_s - \frac{\omega M(\omega L + iR)}{R^2 + \omega^2 L^2} \right) I \quad (10)$$

Di lain pihak, koefisien penabiran magnetik didefinisikan sebagai (Iniguez dkk, 2005)

$$\eta = \frac{|\bar{B}_s| - |\bar{B}_s + \bar{B}_t|}{\bar{B}_s} \quad (11)$$

Sehingga dari persamaan-persamaan (2), (10), dan (11), diperoleh

$$\eta = 1 - \frac{R}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \quad (12)$$

dan, dari persamaan (7) serta persamaan (12) dapat diperoleh ungkapan

$$\eta = 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + k^2 f^2}} \quad (13)$$

dengan  $k = \mu_0 \pi \sigma ad$ .

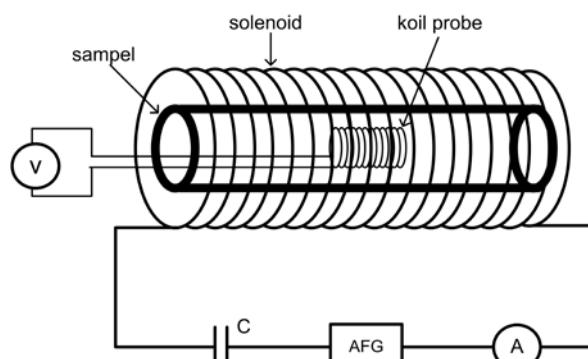
Dari uraian di atas, dengan diperolehnya koefisien penabiran magnetik ( $\eta$ ) melalui pengukuran besar medan induksi magnetik saat tanpa sampel tabung ( $\bar{B}_s$ ) dan saat dengan sampel tabung ( $\bar{B}_s + \bar{B}_t$ ) untuk berbagai variasi frekuensi arus, maka konstanta  $k$  dalam persamaan (13) dapat ditentukan dan koefisien konduktivitas sampel tabung ( $\sigma$ ) dapat dihitung melalui persamaan

$$\sigma = \frac{k}{\mu_0 \pi ad} \quad (14)$$

### 3. METODE EKSPERIMEN

Sistem pengukuran konduktivitas listrik logam ini secara skematis disusun seperti tampak pada Gambar 2 dan terdiri dari solenoid, sampel tabung, *audio function generator* (AFG), kapasitor C, koil probe, voltmeter digital (V), dan amperemeter digital (A). Solenoid dibuat dari kawat tembaga berdiameter 1,5 mm yang digulung secara rapat pada pipa PVC yang berdiameter 20 cm (8 in.) dan panjang 50 cm, sehingga memiliki 280 lilitan. Induktansi solenoid ini diukur dengan menggunakan henrymeter dan diperoleh sebesar 6,3 mH. Sedangkan kapasitor C dipilih memiliki kapasitansi 4,5  $\mu$ F, sehingga solenoid dan kapasitor ini membentuk rangkaian LC yang secara teoretis memiliki frekuensi resonansi sekitar 950 Hz.

Sebuah *audio function generator* (model GFG 8016G) digunakan untuk memberikan arus *ac* sinusoidal kepada solenoid, dan besarnya arus diukur dengan sebuah amperemeter digital. Arus *ac* yang mengalir pada solenoid menghasilkan medan induksi magnetik *ac* di sumbu solenoid seperti dinyatakan oleh persamaan (1) atau persamaan (2). Sedangkan apabila sampel tabung logam dimasukkan sesumbu ke dalam solenoid, maka medan induksi di sumbu



**Gambar 2.** Diagram skematis susunan sistem alat ukur konduktivitas tabung logam. AFG adalah *audio function generator*, C adalah kapasitor, A adalah amperemeter digital, dan V adalah voltmeter digital.

solenoid berkurang dan dinyatakan oleh persamaan (10) karena adanya penabiran magnetik oleh sampel. Besarnya induksi magnetik di sumbu solenoid diukur secara tidak langsung dengan menggunakan voltmeter digital dan sebuah koil probe yang diletakkan di bagian tengah solenoid. *Emf* terinduksi rerata pada koil probe ( $\bar{\mathcal{E}}_k$ ) yang terbaca pada voltmeter berhubungan dengan besar induksi magnetik rerata melalui persamaan

$$\bar{\mathcal{E}}_k = \bar{B} A_k \omega N_k \quad (15)$$

dengan  $A_k$  dan  $N_k$  berturut-turut adalah luas penampang dan jumlah lilitan koil probe, sedangkan  $\bar{B}$  mewakili induksi magnetik ketika dengan tabung sampel ( $\bar{B}_t$ ) ataupun tanpa sampel ( $\bar{B}_s$ ). Pada sistem ini, koil probe memiliki panjang 16,3 cm dan diameter sekitar 1,7 cm, dibuat dari kawat tembaga berdiameter 0,5 mm, dengan jumlah lilitan sebanyak 318.

Pengujian sistem pengukuran ini dilakukan dengan mengukur konduktivitas listrik dua jenis sampel yaitu aluminium dan kuningan. Tabel 1 merangkum data ukuran kedua sampel tersebut. Eksperimen dilakukan dengan mengukur besar induksi magnetik di sumbu solenoid saat dengan sampel maupun tanpa sampel dan menghitung besar penabiran magnetik menurut persamaan (11) untuk variasi frekuensi arus ( $f$ ). Jika  $\bar{\mathcal{E}}_{k,s}$  dan  $\bar{\mathcal{E}}_{k,t}$  berturut-turut adalah *emf* induksi rerata pada koil probe ketika tanpa tabung sampel (solenoid saja) dan ketika dengan tabung sampel, maka dari persamaan (11) dan persamaan (15) diperoleh besar penabiran magnetik sebagai

$$\eta = 1 - \frac{\bar{\mathcal{E}}_{k,t}}{\bar{\mathcal{E}}_{k,s}} \quad (16)$$

Dalam hal ini, besar penabiran magnetik dapat dihitung langsung dari data *emf* induksi rerata yang terbaca oleh voltmeter menurut persamaan (16), dan informasi tentang luas penampang ( $A_k$ ) dan jumlah lilitan ( $N_k$ ) koil probe tidak diperlukan dalam perhitungan ini.  $A_k$  dan  $N_k$  yang besar diperlukan untuk menghasilkan *emf* induksi yang besar agar mudah dibaca oleh voltmeter. Selanjutnya, dari persamaan (13) dapat ditulis

$$y_\eta = k^2 f^2 = (\mu_0 \pi \sigma a d)^2 f^2 \quad (17)$$

dengan  $y_\eta = \frac{1}{(1-\eta)^2} - 1$ , sehingga besar konduktivitas sampel dapat diperoleh dari kemiringan grafik  $y_\eta$  versus  $f^2$  dan dengan menggunakan persamaan (14).

**Tabel 1.** Data ukuran sampel

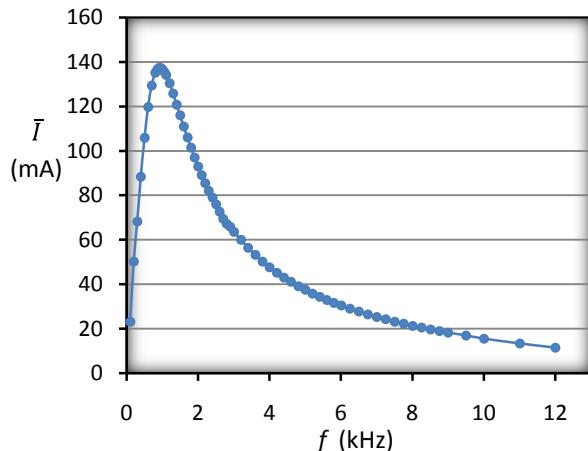
Sampel	Panjang ( $l_t$ ), cm	Jejari rerata ( $a$ ), cm	Tebal ( $d$ ), cm
Kuningan	50	1,17	0,15
Aluminium	50	1,00	0,10

#### 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

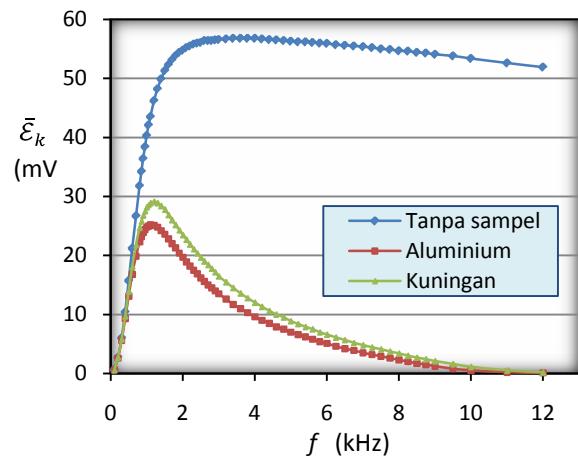
Gambar 3 memperlihatkan grafik karakteristik arus rerata ( $\bar{I}$ ) yang mengalir dalam solenoid sebagai fungsi frekuensi arus ( $f$ ) yang diatur menggunakan AFG. Dalam hal ini, amplitudo arus keluaran AFG telah dibuat maksimum. Tampak pada Gambar 3 bahwa arus rerata maksimum pada solenoid adalah sekitar 138 mA yang dicapai saat terjadi resonansi dengan frekuensi sekitar 950 Hz sebagaimana telah diperkirakan. Secara perhitungan, arus rerata maksimum ini menghasilkan induksi magnetik rerata ( $\bar{B}_s$ ) maksimum pada sumbu solenoid sekitar 0,8 gauss.

Besar *emf* terinduksi rerata pada koil probe ( $\bar{\mathcal{E}}_k$ ) sebagai fungsi frekuensi arus solenoid ditampilkan oleh Gambar 4, baik ketika tanpa sampel maupun saat dengan sampel aluminium dan kuningan. Besar  $\bar{\mathcal{E}}_k$  ini sebanding dengan besar induksi magnetik di sumbu sole-noid menurut persamaan (15). Meskipun besar induksi magnetik ini sangat bergantung pada frekuensi, hal ini tidak menjadi masalah karena yang diperlukan dalam perhitungan koefisien penabiran magnetik ( $\eta$ )

hanyalah selisih besar induksi magnetik ketika tanpa sampel dan dengan sampel. Dalam eksperimen ini, koefisien penabiran magnetik dihitung dengan meng-gunakan persamaan (16). Kehadiran sampel aluminium memberikan  $\bar{\mathcal{E}}_k$  yang lebih kecil dari pada  $\bar{\mathcal{E}}_k$  yang diperoleh pada saat menggunakan sampel kuningan. Hal tersebut menunjukkan bahwa sampel aluminium menghasilkan penabiran magnetik yang lebih besar dari pada pena-biran magnetik yang dihasilkan oleh sampel kuningan. Hal ini terjadi karena arus terinduksi pada sampel aluminium lebih besar daripada arus terinduksi pada sampel kuningan, dan berarti konduktivitas listrik aluminium lebih besar daripada konduktivitas kuningan.



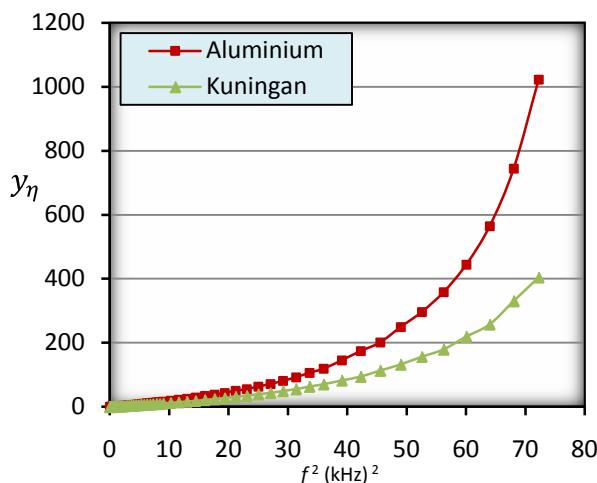
**Gambar 3.** Karakteristik arus rerata solenoid sebagai fungsi frekuensinya. Resonansi terjadi pada frekuensi sekitar 950 Hz dengan arus maksimum sekitar 138 mA.



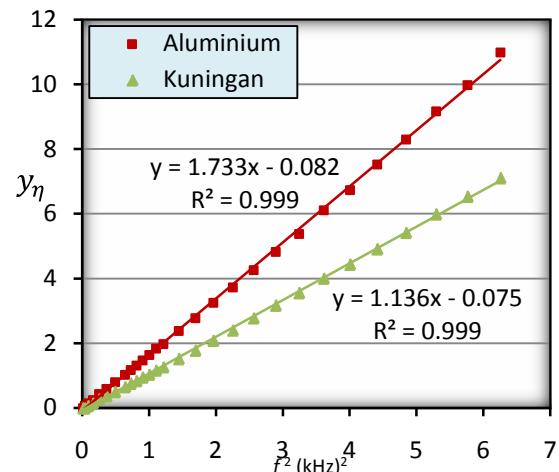
**Gambar 4.** *Emf* induksi rerata pada koil probe (sebanding dengan induksi magnetik rerata) sebagai fungsi frekuensi arus solenoid.

Dari nilai-nilai koefisien penabiran magnetik yang telah diperoleh untuk beragam frekuensi medan induksi magnetik, dibuat grafik berdasarkan persamaan (17) yang ditampilkan oleh Gambar 5. Secara matematis, hubungan  $y_\eta$  dan  $f^2$  dalam persamaan (17) bersifat linear. Namun, Gambar 5 dengan jelas memperlihatkan fakta bahwa hal tersebut tidak berlaku, terutama untuk frekuensi tinggi. Hal ini disebabkan oleh adanya efek kulit yang tidak bisa diabaikan dan tidak diperhitungkan dalam tinjauan teori di atas (Iniguez dkk, 2005). Oleh karena itu, untuk analisis selanjutnya dibatasi hanya dalam daerah frekuensi yang rendah di mana hubungan  $y_\eta$  dan  $f^2$  masih linear, seperti diperlihat-kan oleh Gambar 6 dimana rentang frekuensi yang aplikabel adalah kurang dari 2,5 kHz.

Hasil analisis grafik pada Gambar 6 memberikan nilai konduktivitas listrik aluminium sebesar  $3,34 \times 10^7 \Omega^{-1} m^{-1}$  dan nilai konduktivitas listrik kuningan sebesar  $1,54 \times 10^7 \Omega^{-1} m^{-1}$ . Hasil-hasil ini sedikit lebih rendah daripada nilai-nilai dalam referensi bahwa besar konduktivitas listrik aluminium dan kuningan berturut-turut adalah  $3,65 \times 10^7 \Omega^{-1} m^{-1}$  dan  $1,62 \times 10^7 \Omega^{-1} m^{-1}$  (Kittel, 2005), dengan penyimpangan sekitar 8,6% untuk aluminium dan 5% untuk kuningan. Hal ini dapat dipahami karena nilai konduktivitas listrik dalam referensi tersebut adalah untuk kondisi suhu 25 °C, sedangkan hasil eksperimen ini diperoleh pada suhu sekitar 31 °C. Pada suhu yang lebih tinggi, konduktivitas listrik konduktor memang lebih rendah. Selain itu, perbedaan antara hasil pengukuran dan referensi juga dapat disebabkan oleh ketidakmurnian sampel aluminium dan perbedaan jenis kuningan yang digunakan.



Gambar 5. Grafik  $y_\eta$  vs  $f^2$  untuk rentang frekuensi 0,1 kHz – 8,5 kHz.



Gambar 6. Grafik  $y_\eta$  vs  $f^2$  untuk rentang frekuensi 0,1 kHz – 2,5 kHz.

## 5. KESIMPULAN

Alat ukur konduktivitas listrik logam yang disusun dalam eksperimen ini yang berdasarkan metode induksi dan penabiran magnetik telah dapat bekerja dengan baik. Hasil pengujian pengukuran konduktivitas listrik dengan menggunakan sampel aluminium dan kuningan memperlihatkan deviasi yang tidak lebih dari 9% dari nilai konduktivitas referensi. Deviasi ini terutama disebabkan oleh perbedaan suhu saat pengukuran dilakukan dan suhu referensi. Hasil ini menunjukkan fakta bahwa alat ukur yang sederhana ini cukup layak untuk digunakan.

## DAFTAR PUSTAKA

- Bowler, N. dan Huang, Y., 2005, Electrical Conductivity Measurement of Metal Plates Using Broadband Eddy-Current and Four-Point Methods, *Meas. Sci. Technol.* Vol. 16, hal. 2193–2200.
- Hahn, K.D., Johnson, E.M., Brokken, A., dan Baldwin, S., 1998, Eddy Current Damping of a Magnet Moving Through a Pipe, *Am. J. Phys.* Vol. 66 No. 12, hal. 1066–1076.
- Hong-min, K., Zhao-wen, W., Yun-gang, B., Zhong-ning, S., dan Zhu-xian, Q., 2007, Electrical Conductivity of Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>-AlF<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaF<sub>2</sub>-LiF(NaCl) system electrolyte, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* Vol. 17, hal 181–186.
- Iniguez, J., Raposo, V., Flores, A.G., Hernandez-Lopez, A., dan Zazo, M., 2004, Study of Conductivity of Metallic Tube by Analyzing the Damped Fall of a Magnet, *Eur. J. Phys.* Vol. 25, hal. 593-604.
- Iniguez, J., Raposo, V., Flores, A.G., Zazo, M., dan Hernandez-Lopez, A., 2005, Measurement of the Electrical Conductivity of Metallic Tubes by Studying Magnetic Screening at Low Frequency, *Am. J. Phys.* Vol. 73 No. 3, hal. 206–210.
- Isono, Y. dan Kotani, M., 1995, A Contactless Method for Measurement of Electrical Conductivity in a Particular Direction, *Meas. Sci. Technol.* Vol. 6, ha. 1429–1432.
- Kittel, C., 2005, *Introduction to Solid State Physics*, Edisi ke-8, John Wiley & Sons, Inc., USA.
- Kraftmakher, Y., 2000, Eddy Currents: Contactless Measurement of Electrical Resistivity, *Am. J. Phys.* Vol. 68 No. 4, hal. 375–379.
- MacLatchy, C.S., Backman, P., dan Bogan, L., 1993, A Quantitative Magnetic Braking Experiment, *Am. J. Phys.* Vol. 61 No. 12, hal. 1096–1101.
- Schuetze, A.P., 2004, A Laboratory of the four-point probe technique, *Am. J. Phys.* Vol. 72 No. 2, hal. 149–153.
- Wiederick, H.D. dan Gauthier, N., 1983, Frequency Dependence of the Skin Depth in a Metal Cylinder, *Am. J. Phys.* Vol. 51 No. 2, hal. 175–176.