

PEMBUATAN SISTEM SENSOR INDUKTANS TIMBAL-BALIK

A. Martha, K. Abraha dan A.B. Setio Utomo

INTISARI

Telah dibuat sistem sensor induktans timbal-balik yang terdiri dari dua pasang koil primer-sekunder dan tiga resistor variabel untuk pengukuran suseptibilitas magnetik bahan dan untuk pengoperasiannya perlu didukung alat-alat bantu antara lain osilator, amperemeter, osiloskop, dan lock-in amplifier. Hasil uji linearitas terhadap variabel arus, volume dan frekuensi cukup memenuhi syarat untuk pengukuran suseptibilitas bahan magnet.

Kata kunci : Sensor, induktansi, suseptibilitas

THE MAKING OF A MUTUAL INDUCTANCE SENSOR SYSTEM

ABSTRACT

A mutual inductance sensor system for measuring the magnetic susceptibility has been made. This sensor system consists of two pairs of primary-secondary coils and three variable resistors. To operate that system, it is also needed some supporting equipments, namely oscillator, amperemeter, oscilloscope and lock-in amplifier. The result of current, volume and frequency linearity test is accepted for measuring the magnetic susceptibility of magnetic substances.

Keywords : Sensor, inductance, suseptibilitas

I. PENDAHULUAN

Suatu bahan magnetik dikarakterisasikan oleh dua tetapan bahan yaitu suseptibilitas (χ) dan permeabilitas (μ), dengan nilai suseptibilitas sebanding dengan nilai permeabilitas. Melalui eksperimen yang menghasilkan permeabilitas suatu bahan, nilai suseptibilitasnya dapat diketahui dengan menggunakan hubungan suseptibilitas - permeabilitas, ataupun sebaliknya.

Dari suseptibilitas atau permeabilitas, kita dapat melihat apakah bahan itu paramagnetik, diamagnetik, atau ferromagnetik. Bahan ferromagnetik merupakan bahan yang mempunyai nilai suseptibilitas dan permeabilitas tinggi. Penelitian terhadap bahan ferromagnetik ini, untuk pencarian bahan dengan nilai suseptibilitas dan permeabilitas yang tinggi, telah banyak dilakukan dari berbagai paduan beberapa logam dan berbagai macam perlakuan yang diberikan pada bahan.

Paduan logam $\text{Ni}_x\text{Fe}_{1-x}$ merupakan salah satu contoh paduan yang dibuat untuk memperbaiki sifat magnetik. Pemberian komposisi yang berbeda dan perlakuan panas merupakan usaha untuk menghasilkan sifat-sifat magnetik yang sesuai dengan kebutuhan.

Elmen telah melakukan penelitian terhadap nilai permeabilitas $\text{Ni}_x\text{Fe}_{1-x}$ (Brailsford, 1951), menggunakan cara pengukuran melalui kurva histerisis. Dengan cara itu didapat permeabilitas awal (μ_i) yang diperoleh pada medan terapan rendah, dan permeabilitas maksimum (μ_m) yang merupakan permeabilitas amplitudo (μ_a) terbesar.

Dengan cara pengukuran melalui kurva histerisis ini, Elmen telah memperoleh hubungan antara permeabilitas awal (μ_i) dengan prosentase Ni dalam Fe (Brailsford, 1951).

Beberapa metode pengukuran suseptibilitas, antara lain adalah metode pemberian medan magnet bolak balik dengan menggunakan sensor induktans bolak-balik. Dalam metode ini, pembuatan sensornya cukup sederhana, dan dalam pengukuran tidak mengharuskan cuplikan dalam bentuk geometri tertentu serta tidak merusak cuplikan yang diukur. Selanjutnya, metode

pengukuran ini digunakan pada suasa (*alloy*) Ni_xFe_{1-x} yang telah mengalami perlakuan panas tertentu. Ini dapat diperlakukan sebagai penguji kinerja dari alat ukur yang dibuat dan sekaligus mempelajari sifat *alloy* Ni_xFe_{1-x} .

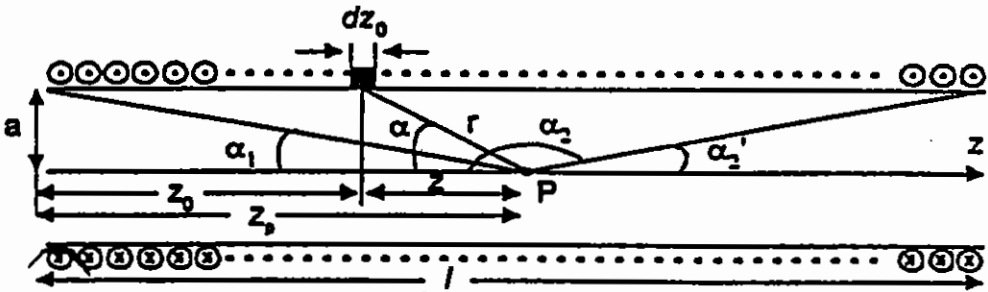
Berdasar pertimbangan di atas, penelitian ini bertujuan untuk membuat alat ukur suseptibilitas magnetik sederhana untuk mengukur bahan magnetik yang berupa limbak (*bulk*).

II. LANDASAN TEORI

Suatu solenoida yang terbentuk dari N lilitan kawat, ruji solenoida a , panjang lilitan l dan berarus I akan menghasilkan medan magnet di sepanjang sumbunya di titik P sebesar Gambar II.1

$$B = \frac{\mu_0 I n}{2} \left[\frac{z_p}{(z_p + a^2)^{1/2}} + \frac{l - z_p}{((l - z_p)^2 + a^2)^{1/2}} \right] \tag{II.1}$$

dengan $n = \frac{N}{l}$ dan μ_0 adalah permeabilitas udara.



Gambar II.1. Medan magnet di titik P pada sumbu solenoida.

Jika ruji solenoida $a \ll l$, dapatlah dianggap bahwa solenoida panjang tak berhingga, sehingga persamaan (II.1) bentuknya akan menjadi:

$$B = \mu_0 I n \tag{II.2}$$

Apabila suatu bahan diletakkan di dalam medan magnet, maka bahan itu akan termagnetkan. Magnetisasi ini digambarkan oleh vektor magnetisasi \vec{M} ,

yaitu momen dwikutub per satuan volume sedangkan induksi magnet di dalam bahan diberikan oleh hubungan

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{M} \quad (\text{II.3})$$

Dalam hal ini Induksi magnet terdiri dari dua bagian yaitu bagian $\mu_0 \vec{H}$ ditimbulkan oleh sumber luar sedangkan bagian $\mu_0 \vec{M}$ ditimbulkan oleh magnetisasi bahan. Oleh karena magnetisasi diinduksi oleh medan, maka kita dapat mengasumsikan bahwa \vec{M} sebanding dengan \vec{H} sehingga:

$$\vec{M} = \chi \vec{H} \quad (\text{II.4})$$

dengan χ adalah suseptibilitas magnetik bahan.

Bila ungkapan untuk \vec{M} ini dimasukkan ke dalam persamaan (II.3), akan diperoleh

$$\vec{B} = \mu_0 (1 + \chi) \vec{H} \quad (\text{II.5})$$

dan dengan demikian vektor \vec{B} dan vektor \vec{H} adalah sebanding satu sama lain, sebagai

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (\text{II.6})$$

dengan $\mu = \mu_0 (1 + \chi)$ tetapan kesebandingan, μ - permeabilitas bahan dan

$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$ permeabilitas relatif.

Telah dikatakan di atas bahwa jika dilihat dari sifat magnetiknya, bahan dapat dibedakan menjadi tiga jenis, yaitu diamagnet, paramagnet, dan ferromagnet. Bahan paramagnet mempunyai suseptibilitas positif kecil, nilai positif menunjukkan bahwa magnetisasi \vec{M} paralel terhadap intensitas medan magnet \vec{H} . Bahan diamagnetik dicirikan dengan suseptibilitas negatif dan kecil, nilai negatif menunjukkan bahwa magnetisasi \vec{M} anti paralel terhadap intensitas medan magnetik \vec{H} . Dan bahan ferromagnet mempunyai suseptibilitas positif dan besar (Wangsness, 1979).

Bahan magnetik yang sangat penting dalam praktek adalah ferromagnet, yaitu bahan yang dapat mempunyai magnetisasi spontan \vec{M}_s , yang besar tanpa perlu adanya medan magnet terpasang. Kalau ada medan magnet terpasang maka induksi magnetik \vec{B} dalam ferromagnetik dapat menjadi ratusan sampai ribuan kali lebih besar daripada medan magnet terpasang itu (Johannes, 1978).

Secara prinsip pengukuran suseptibilitas AC cuplikan dikenai medan magnet kecil dan dengan anggapan bahwa suseptibilitas cuplikan homogen. Jika cuplikan dimasukan ke dalam medan pengukur yang dimasukan dalam medan magnet kecil tersebut, akibat pengaruh $\vec{H}(t)$ maka akan timbul tegangan pada koil sekunder (Nikolo, 1994) sebesar

$$v(t) = \frac{V f H_a \chi}{\alpha} \tag{II.7}$$

dengan V adalah volume, f adalah frekuensi, H_a adalah medan magnet AC dari luar dan α adalah konstanta kalibrasi yaitu :

$$\alpha = \frac{10^8 (I_s^2 + D_s^2)^{1/2}}{8\pi^2 n l_s} \tag{II.8}$$

Besarnya medan terapan dalam koil dengan mengacu hubungan $B = \mu_0 H$ pada persamaan (II.2),

$$H = \frac{N_p}{l_p} I_p \tag{II.9}$$

dengan I_p adalah arus yang diberikan pada koil sekunder, N_p adalah jumlah lilitan koil primer dan l_p merupakan panjang dari lilitan pada koil primer.

Dengan mensubstitusikan persamaan (II.9) ke dalam persamaan (II.7) diperoleh

$$v(t) = \frac{V f \chi N_p}{\alpha l_p} I_p \tag{II.10}$$

terlihat langsung hubungan arus yang diberikan pada koil primer dengan besar kenaikan tegangan yang muncul pada koil sekunder ketika cuplikan dimasukkan dalam koil.

III. SISTEM PERALATAN DAN METODE PENELITIAN

Untuk melaksanakan penelitian ini diperlukan bahan yang akan diukur/diteliti dan sistem peralatan ukurnya. Komponen sistem ukur terdiri dari alat utama yaitu sistem sensor induktansi timbal-balik dan alat-alat bantu antara lain osilator, osiloskop, amperemeter, dan *lock-in amplifier*.

Dalam pelaksanaan penelitian ini dikerjakan melalui beberapa tahapan yaitu; pembuatan koil-koil sensor induktansi timbal-balik dan kemudian merangkainya dengan beberapa resistor variabel menjadi suatu sistem sensor induktansi timbal-balik, menguji linearitas sistem untuk beberapa variabel dan menggunakan sistem tersebut untuk mengukur suseptibilitas suasa (*alloy*) Ni_xFe_{1-x} .

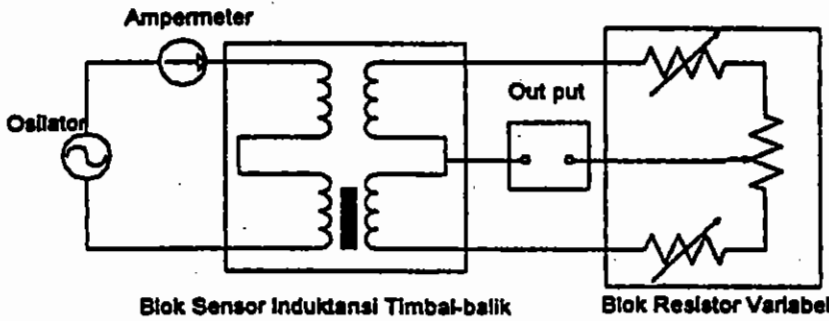
III.1. Bahan penelitian

Bahan yang akan diukur/diteliti adalah suasa (*alloy*) Ni_xFe_{1-x} yang berupa limbak (*bulk*). Bahan ini sebelumnya berupa serbuk Ni dan Fe, kemudian di *anneal* dengan pendinginan lambat (pendinginan pada suhu kamar) sehingga terbentuk limbak suasa (*bulk alloy*) Ni_xFe_{1-x} . Bentuk geometris suasa-suasa (*alloy-alloy*) ini berupa balok dengan luas penampang antara 0,072 sampai 0,210 cm² dan panjangnya antara 1,3 sampai 2,5 cm.

Pada pengujian linearitas sistem sensor induktansi timbal-balik, digunakan suasa (*alloy*) $Ni_{80}Fe_{20}$, kecuali pengujian terhadap variasi volume, digunakan Fe tidak murni yang diperoleh dari pasar, karena keterbatasan persediaan cuplikan alloy $Ni_{80}Fe_{20}$. Bahan yang diperoleh dari pasar ini dapat digunakan karena pada pengujian linearitas yang diutamakan adalah tanggapan magnet terhadap variasi volume bahan bukan terhadap unsur penyusun bahan tersebut.

III.2. Sistem sensor induktans timbal-balik

Sistem sensor yang digunakan, menggunakan prinsip induktansi timbal-balik yang terdiri dari dua koil primer dan dua koil sekunder dan kedua pasang koil primer-sekunder tersebut diseimbangkan dengan menggunakan tiga buah resistor variabel pada keluarannya Gambar III.1.



Gambar III.1. Sistim sensor induktans **timbal balik**.

Koil primer terbuat dari pipa PVC berdiameter $D_p = (32,00 \pm 0,05)$ mm dan mempunyai panjang lilitan $l_p = (395 \pm 1)$ mm dengan jumlah lilitan 494 lilitan. Sedangkan koil sekunder mempunyai panjang lilitan $l_s = (203 \pm 1)$ mm dengan jumlah lilitan 243 lilitan pada pipa PVC berdiameter $D_s = (25,15 \pm 0,05)$ mm.

Koil sekunder ditempatkan dalam koil primer secara konsentris sehingga akan terjadi induktans timbal-balik apabila koil primer dialiri arus. Kemudian kedua pasang koil, primer dan sekunder, ini dirangkaikan pada tiga buah resistor variabel. Penggunaan resistor variabel di sini sebagai penyeimbang dari dua pasang koil primer-sekunder yang dipakai sebagai sensor. Dipasanginya tiga buah resistor variabel dimaksudkan untuk memperkecil pergeseran hambatan sehingga mencari posisi seimbang (nol) akan lebih mudah. Dua dari resistor-resistor variabel tersebut bernilai $R_1 = R_2 = 200 \Omega$ sepuluh putaran dan yang satu lagi $R_3 = 1000 \Omega$. Resistor

variabel yang presisi akan lebih mempermudah pencarian posisi seimbang (nol) yang diharapkan .

III.3. Alat-alat bantu

Untuk memberikan sinyal masukan, mendeteksi dan menganalisis sinyal keluaran, pada sistem sensor induktans timbal-balik, diperlukan alat-alat bantu yaitu: osilator, amperemeter, osiloskop, dan *lock-in amplifier* (Manual, 1989; Scofield, 1993).

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian linearitas ini dilakukan dalam rangka uji eksperimen akan kebenaran persamaan (II.12) yang diperoleh secara teoritis, dengan tegangan koil sekunder (v) haruslah linear terhadap perubahan arus (I_p), volume (V), dan frekuensi (f).

Karena I_p merupakan arus bolak-balik, hasil ukur yang diperoleh dari alat ukur amperemeter terhadap I_p , merupakan nilai akar purata kuadrat (rms) sehingga persamaan (II.12) dapat dimodifikasi menjadi,

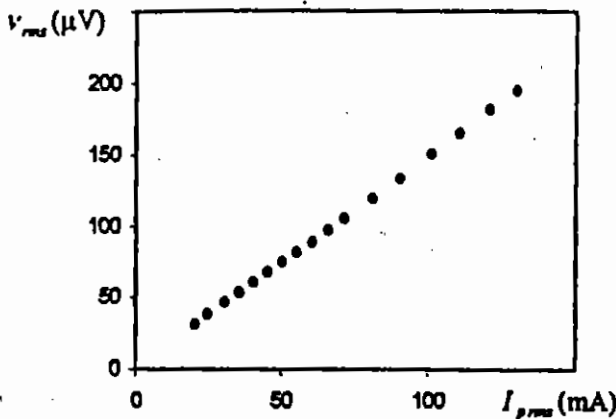
$$v_{rms} = \frac{V f \chi N_p}{\alpha l_p} I_{p\ rms} \quad (IV.1)$$

sehingga terlihat bahwa tegangan keluaran dari koil sekunder (v) juga harus dalam bentuk akar purata (v_{rms}). Pengukuran v dilakukan dengan menggunakan lock-in amplifier, yang hasil pengukurannya sudah dalam bentuk akar purata

Hasil eksperimen hubungan v_{rms} terhadap $I_{p\ rms}$ ditunjukkan oleh grafik pada Gambar IV.1 dengan peubah (variabel-variabel) lainnya dibuat konstan dengan frekuensi $f = (200 \pm 1)$ Hz, volume $V = (253 \pm 5)$ mm³ dan cuplikannya Ni₈₀Fe₂₀.

Dari grafik di atas terlihat bahwa hubungan antara tegangan akar purata koil sekunder dengan arus yang diberikan pada koil primer berbanding lurus dan linear, dapat dilihat dari ralat nisbi gradiennya sebesar 0,4 % .

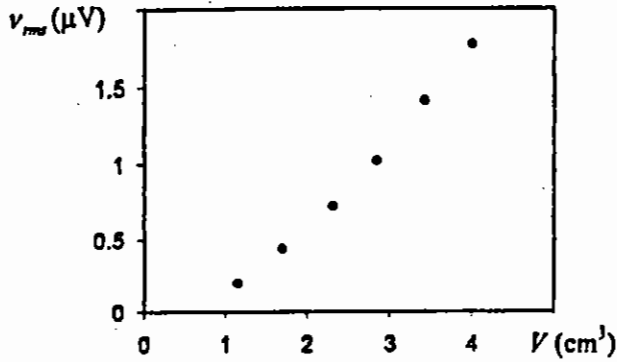
Sedangkan, hasil eksperimen untuk hubungan tegangan akar purata (v_{rms}) dengan volume (V) ditampilkan oleh Gambar IV.2, dengan arus $I_{p,rms} = (50,2 \pm 0,1) \text{ mA}$ dan frekuensi $f = (200 \pm 1) \text{ Hz}$ bernilai konstan. Hal ini menunjukkan bahwa hubungan tersebut bisa dikatakan linear karena ralat nisbi gradiennya masih cukup kecil yaitu sebesar 4,6 % . Walaupun nilai ralat nisbi ini lebih besar dibandingkan dengan nilai ralat gradien hubungan antara v_{rms} terhadap $I_{p,rms}$, tetapi masih bisa dianggap linear pada daerah interval volume yang dilakukan pada percobaan ini.



Gambar IV.1. Grafik hubungan tegangan akar purata koil sekunder (v_{rms}) dengan arus yang diberikan pada koil primer ($I_{p,rms}$)

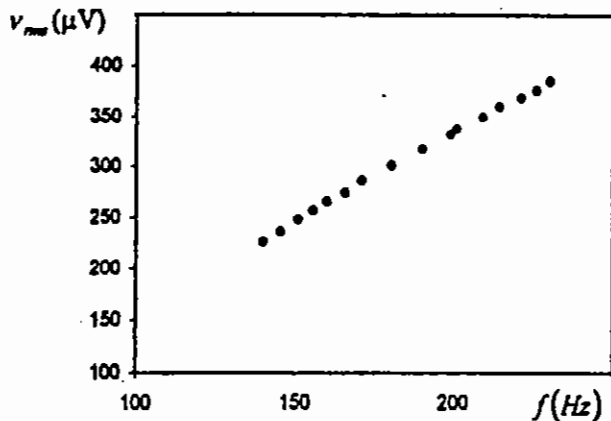
Ralat yang lebih besar ini disebabkan oleh penyediaan cuplikan untuk variasi volume yang sulit karena keterbatasan persediaan cuplikan $\text{Ni}_x\text{Fe}_{1-x}$, sehingga untuk percobaan variasi volume ini digunakan besi yang diperoleh dari pasaran yang tidak dapat dianggap sebagai Fe murni, tetapi merupakan Fe yang ditambahi unsur-unsur pengotor, dengan komposisi yang tidak dapat dikontrol pada setiap cuplikan yang divariasikan volumenya. Tetapi secara

umum masih bisa dikatakan memenuhi syarat untuk percobaan ini, dilihat dari hasil yang diperoleh.



Gambar IV.2. Grafik hubungan tegangan akar purata (v_{rms}) dengan volume (V) cuplikan Fe tidak murni.

Sedangkan hasil eksperimen uji linearitas hubungan antara tegangan akar purata dari koil sekunder (v_{rms}) dengan frekuensi (f) pada arus $I_{prms} = (80,3 \pm 0,2)$ mA dan volume $V = (318 \pm 5)$ mm³ konstan dengan cuplikannya Ni₈₀Fe₂₀, diperoleh ralat gradiennya sebesar 0,9% Gambar IV.3. Nilai ini bisa menyatakan bahwa hubungan antara (v_{rms}) dan (f) adalah linear.



Gambar IV.3. Grafik hubungan tegangan akar purata dari koil sekunder (v_{rms}) dengan frekuensi osilator (f)

Jadi secara keseluruhan, uji linearitas terhadap variabel-variabel yang berpengaruh pada persamaan (II.10 atau IV.1) yaitu; arus, volume dan frekuensi bisa terpenuhi, terlihat dari hasil eksperimen yang telah dilakukan. Oleh sebab itu alat yang akan digunakan untuk mengukur suseptibilitas ini, dengan menggunakan prinsip pengukuran seperti yang telah diuraikan di atas, dapat dikatakan memenuhi syarat untuk pengukuran nilai suseptibilitas bahan magnet.

Dalam hal ini ralat sistematis kemungkinan timbul dari sistem peralatan, antara lain: pada sambungan-sambungan rangkaian, efek kapasitansi koil dan penggunaan PVC sebagai dudukan koil yang sifatnya diamagnetik. Adanya ralat sistematis yang timbul ini dapat diindikasikan dari grafik-grafik v_{rms} vs I_{prms} yang terlihat dari semua grafik, tidak ada dari garis-garis yang terbentuk melewati titik (0,0) tetapi semuanya berada di bawah titik (0,0). Sedangkan menurut teori seharusnya melewati titik (0,0). Hal ini menggambarkan bahwa walaupun medan terapan (\vec{H}_a) sudah diberikan dengan terlihatnya arus pada koil primer (I_{prms}) tetapi tegangan pada koil sekunder belum muncul, sehingga dapat disimpulkan bahwa ada serapan dalam rangkaian, baik itu terhadap medan terapan yang diberikan maupun terhadap arus dalam rangkaian pengukuran. Besar ralat sistematis yang muncul belum dapat ditentukan secara kuantitatif karena memerlukan eksperimen lebih lanjut, sedangkan percobaan ini difokuskan pada pengaruh komposisi Ni dalam Fe terhadap pola kurva suseptibilitas.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan pembahasan dari hasil penelitian uji linearitas, dapatlah disimpulkan bahwa alat ukur suseptibilitas sederhana yang dibuat berdasarkan sistem sensor induktans timbal-balik dapat beroperasi seperti yang diharapkan. Berdasarkan hal tersebut di atas dapatlah alat ini digunakan untuk mengukur cuplikan berupa llimbak (*bulk*) bervolume kecil (kurang dari 4 cm^3) dengan bentuk geometris sembarang, beroperasi pada frekuensi rendah (150 sampai 1000 Hz) dan pada medan terapan rendah (kurang dari 1 orstead).

Dari hasil penelitian ini terlihat ada beberapa kemungkinan pengembangan dalam penerapan sistem sensor induktans timbal-balik ini, antara lain : ketelitian dalam uji linearitasnya menggunakan bahan yang murni akan lebih baik lagi dan sistem sensor induktans timbal-balik ini mungkin untuk dikembangkan sebagai alat ukur arah dan besar medan magnet bumi di suatu tempat secara langsung, disamping itu mana alat ukur seperti ini sangat dibutuhkan dalam bidang lain. Perlu dilakukan pengembangan, sehingga dapat digunakan untuk pengukuran suseptibilitas saput tipis (*thin film*). Dapat juga dengan menghubungkan *lock-in amplifier* dengan komputer, besar keluaran sistem sensor induktans timbal-balik langsung tercatat dan langsung dapat ditampilkan dalam bentuk nilai yang telah dikalibrasi atau bentuk alin yang dikehendaki.

DAFTAR PUSTAKA

- Brailsford, F., 1951, *Magnetic Material*, Methun 7 Co.Ltd.London .
Johannes, H., 1978, *Listrik dan Magnet*, Balai Pustaka, Jakarta.
Manual (Lock-in Amplifier SR 510), 1989, Stanford Research System, Inc, 1290 D Reamrood Avenue Sunnyvale, California, 94089, USA
Nikolo, M., 1994, Superconductivity: A Guide to Alternating current Susceptibility Measurement and Alternating Current Susceptometer Design, *Am. J. Physics* 63. 57-65.
Scofield, J.H., 1993, Frequency-domain Description of A Lock-in Amplifier, *Am. J. Physics* 62. 129-133.
Wangness, R.K., 1979, *Electromagnetic Field*, John Wiley & Sons, Inc, New York.