KAJIAN PEMBUATAN SENSOR MAGNETORESISTIF BERBASIS BAHAN LAPISAN TIPIS *PERMALLOY* $Ni_{80}Fe_{20}$

Fahru Nurosyid[1], Kamsul Abraha[2], Agung Bambang S.U.[2]
[1]Jurusan Fisika FMIPA UNS, Surakarta
[2]Jurusan Fisika FMIPA UGM, Yogyakarta 55281

ABSTRAK

KAJIAN PEMBUATAN SENSOR MAGNETORESISTIF BERBASIS BAHAN LAPISAN TIPIS *PERMALLOY* $Ni_{80}Fe_{20}$. Telah berhasil dilakukan pembuatan sensor medan magnet dengan metoda *magnetoresistif*. Bahan sensor menggunakan lapisan tipis magnetik *permalloy* $Ni_{80}Fe_{20}$ hasil deposisi dengan metode *sputtering* . Sistem sensor menggunakan sistem jembatan Wheatstone (*Wheatstone bridge*) yang menggunakan perbandingan $R_2 : R_3 = 1 : 5$ (1000 ohm : 5000 ohm) untuk memperoleh keluaran yang optimum. Tegangan yang dibutuhkan untuk mengoperasikan sensor adalah ± 9 volt. Daerah kerja sensor dalam orde 10^{-4} sampai dengan 10^{-3} tesla diperoleh setelah sensor dikalibrasi.

Kata kunci : *Magnetoresistif, permalloy, sputtering*, sensor medan magnet.

ABSTRACT

A STUDY OF MAGNETORESISTIVE SENSOR FABRICATION USING *PERMALLOY* $Ni_{80}Fe_{20}$ THIN FILM MATERIALS. A magnetic field sensor fabrication with *magnetoresitive* method has been succesfully done. A $Ni_{80}Fe_{20}$ *permalloy* magnetic thin film, which is produced by deposition of *sputtering* method, is used as a sensor material. The sensor system is based on W*heatstone bridge* method using ratio $R_2 : R_3 = 1 : 5$ (1000 ohm : 5000 ohm) to obtain the optimum output. The voltage requirement to operate the sensor is about 9 volt. The sensor range which is around of 10^{-4} to 10^{-3} tesla could be determined after the sensor has been calibrated.

Key words : Magneticresistif method, permalloy, sputtering, magnetic field sensor.

PENDAHULUAN

Sensor magnetoresistif merupakan sensor yang memanfaatkan perubahan hambatan (*resistance*) yang disebabkan perubahan medan magnet, sehingga termasuk sensor medan magnet. Karena karakter yang dipengaruhi medan magnet adalah hambatan listrik, pengukuran dapat dilakukan melalui alat elektronik sederhana[2]. Keunggulan sensor magnetoresistif selain termasuk dalam kelompok sensor yang mempunyai sensitivitas tinggi[2], juga mempunyai penampilan yang baik dan tidak berubah dalam lingkungan keras[5].

Dalam penelitian ini akan dilaporkan pembuatan sensor magnetoresistif dengan memanfaatkan lapisan tipis yang dideposisi dari paduan bahan ferromagnetik permalloy $Ni_{80}Fe_{20}$. Bahan ini sengaja dipilih dengan alasan karena ia mempunyai tetapan magnetostriksi nol (*zero – magnetostriction*)[2]. Artinya tidak perlu diperhitungkan lagi kemungkinan munculnya perubahan struktur kekisi (*lattice*) yang diakibatkan oleh medan magnet sehingga diharapkan bahwa kepekaan bahan tersebut terhadap medan magnet cukup hanya terkait langsung dengan sifat resistivitas listriknya. *Permalloy* juga sangat cepat merespon medan magnet yang berasal dari perubahan arus yang terjadi[4]. Alasan lainnya yang mendukung adalah bahwa bahan tersebut mempunyai efek magnetoresistif yang cukup tinggi dalam bentuk lapisan tipis yaitu 2,2 % [2] sehingga diharapkan diperoleh sensor medan magnet yang sensitif.

Di dalam penelitian ini akan pula dilaporkan proses pengukuran dan kalibrasi sensor medan magnet magnet. Yang akhirnya diharapkan akan dihasilkan alat sensor medan dengan sensitivitas tinggi.

LANDASAN TEORI

Bahan magnetik sebagai penghantar listrik dapat menunjukkan efek magnetoresistansi; artinya, resistivitas listrik bergantung pada arah vektor magnetisasi[3]. Nilai resistivitas lapisan tipis magnetik akan berbeda ketika diukur secara tegak lurus atau sejajar terhadap arah magnetisasi lokal. Besar perubahan resistivitas listrik dengan adanya efek magnetoresistansi anisotropi dapat ditulis sebagai berikut :

$$\Delta\rho = \rho// - \rho\perp \neq 0 \qquad (1)$$

Jika diasumsikan bahwa kontribusi hanya berasal dari efek magnetoresistansi anisotropi murni, maka hukum Ohm dapat ditulis dalam notasi tensor sebagai berikut

Vol. 2 No. 1, Oktober 2000, hal : 1 - 6
ISSN : 1411-1098

$$\begin{pmatrix} E_{//} \\ E_{\perp} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \rho_{//} & 0 \\ 0 & \rho_{\perp} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} J_{//} \\ J_{\perp} \end{pmatrix} \quad (2)$$

dengan salah satu sumbu koordinat dipilih sepanjang vektor magnetisasi, E adalah kuat medan listrik dan J adalah rapat arus. Disini $\rho_{//}$ dan $\rho\perp$ bernilai tunggal dan tidak bergantung pada arah masing-masing sehingga dapat diambil untuk $\rho = (\rho\| + \rho\perp)/2$.

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \rho + \frac{1}{2}\Delta\rho\cos 2\alpha & \frac{1}{2}\Delta\rho\sin 2\alpha \\ \frac{1}{2}\Delta\rho\sin 2\alpha & \rho - \frac{1}{2}\Delta\rho\cos 2\alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} J_x \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

dengan α adalah sudut antara vektor magnetisasi M_s dan sumbu x. Untuk memudahkan dipilih sumbu x sebagai koordinat sistem, sehingga hanya komponen J_x yang tersisa. maka persamaan (3) dapat ditulis

$$E_x = \rho J_x + \frac{1}{2}\Delta\rho J_x \cos 2\alpha \quad (4)$$

$$E_y = \frac{1}{2}\Delta\rho J_x \sin 2\alpha \quad (5)$$

Ada 3 konstribusi untuk menghitung energi lapisan:

Energi medan (tenaga penyimpangan M_s terhadap H_a)

$$\varepsilon_H = -\mu_0 H_a . M_s$$
$$\varepsilon_H = -\mu_0 H_a . M_s \quad (6)$$

Energi anisotropi (tenaga penyimpangan M_s terhadap sumbu mudah)

$$\varepsilon_K = K\sin^2\beta$$
$$\varepsilon_K = K\sin^2\beta \quad (7)$$

Energi demagnetisasi (tenaga penyimpangan M_s terhadap sumbu lapisan)

$$\varepsilon_d = 1/2\mu_0 D M_s^2 \sin^2\alpha \quad (8)$$

Dari persamaan (6), (7), (8) diperoleh rapat energi bebas total lapisan yaitu :

$$\varepsilon = E/Vol = K\sin^2\beta + 1/2\mu_0 D M_s^2 \sin^2\alpha - \mu_0 H_a . M_s \quad (9)$$

H_a adalah medan luar yang digunakan, faktor ½ pada suku kedua adalah konsekuensi dari interaksi dwikutub-dwikutub satu dengan yang lain, dan D adalah faktor demagnetisasi. Untuk kasus t << w digunakan pendekatan D = t/(t+w), dengan t ketebalan dan w lebar lapisan[3].

Kekuatan anisotropi ditunjukkan oleh medan anisotropi (H_k) yang didefinisikan sebagai :

$$H_{k.int} = 2K/(\mu_0 M_s).$$
$$H_{k.int} = 2K/(\mu_0 M_s) \quad (10)$$

Anisotropi efektif didefinisikan sebagai :

$$K^* = K + 1/2\mu_0 D M_s^2$$
$$K^* = K + 1/2\mu_0 D M_s^2 \quad (11)$$

sehingga medan anisotropi efektif dapat dituliskan sebagai

$$H_k^* = \frac{2K^*}{\mu_0 M_s} \quad (12)$$

Dengan mengambil $\alpha = \beta$ dan memasukkan persamaan (11) ke persamaan (9) diperoleh persamaan

$$\varepsilon = E/Vol = K^*\sin^2\beta - \mu_0 H_a . M_s \quad (13)$$

Bila H_a diambil searah sumbu lapisan maka persamaan (13) dapat ditulis kembali sebagai

$$E/Vol = K^*\sin^2\beta - \mu_0 H_a . M_s \sin\beta \quad (14)$$

Dengan meminimumkan persamaan (14) diperoleh persamaan (15)

$$K^*\sin^2\beta = \mu_0 H_a . M_s \sin\beta \quad (15)$$

sehingga

$$\sin\beta = (\mu_0 M_s/K^*)H_a \quad (16)$$

atau

$$\sin\beta = H_a / H_k^* \quad (17)$$

Jika persamaan (17) dimasukkan ke dalam persamaan (4) dengan tetap mengambil $\alpha = \beta$ maka diperoleh

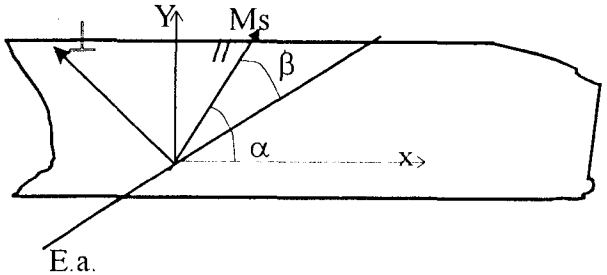
$$E_x = \rho\perp J - \Delta\rho J (H_a/H_k^*)^2 \quad (18)$$

Sehingga

$$V_{MR} = Ri - \Delta Ri\left(\frac{Ha}{H_k^*}\right)^2 \quad (19)$$

dengan V_{MR} adalah tegangan magnetoresistif, i arus yang mengalir pada sensor , R dan ΔR adalah hambatan sensor dan perubahan maksimum hambatan sensor. Persamaan (19) berlaku selama β konstan pada semua lapisan. Akhirnya R_{MR} hambatan magnetoresistif.

$$R_{MR} = R - \Delta R\left(\frac{Ha}{H_k^*}\right)^2 \quad (20)$$



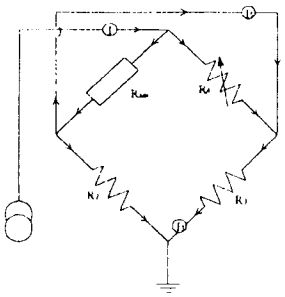
Gambar 1. Bentuk lapisan panjang

METODE PENELITIAN

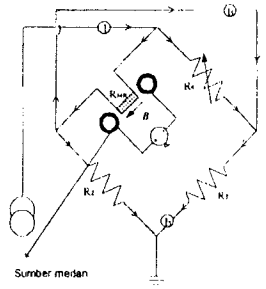
Dalam pembuatan sensor magnetoresistif ini digunakan sistem jembatan Wheatstone (Wheatstone bridge) sebagai rangkaian sensor. Lapisan tipis NiFe sebagai sensor dirangkai membentuk jembatan wheatstone seperti Gambar 3.

Jika $R_{MR}.R_3 = R_2.R_4$, tidak ada arus I_5 (I_5 =0). Dan bila lapisan tipis dikenai medan luar, sehingga terjadi perubahan R_{MR} akan mengakibatkan $R_{MR}.R_3 \neq R_2.R_4$. Ini memungkinkan I_5 tidak nol dan I_5 diukur sebagai keluaran sensor.

Dengan mengunakan hukum Kirchhof I dan II diperoleh hubungan seperti persamaan (21);



Gambar 2. Rangkaian jembatan Wheatstone



Gambar 3. Rangkaian sensor di dalam sumber medan

$$I_5 = [R_{tot} - (R_{MR} + R_2)]I + I_3(R_{MR} + R_2) \quad (21)$$

Dari persamaan (21) dan mengingat bahwa $R_{tot} = R_a + \frac{(R_{MR} + R_b)(R_c + R_4)}{(R_{MR} + R_b) + (R_c + R_4)}$ maka diperoleh persamaan kuadrat dalam R_{MR}, yaitu:
dengan :

$$a = [-I_5 - I + I_3] \quad (22a)$$

$$b = [-I_5(R_b + R_4 + R_c) + I_3(R_2 + R_b + R_4 + R_c) + I(R_a - R_2 - R_b)] \quad (22b)$$

$$c = [I(R_a - R_2)(R_b + R_4 + R_c) + IR_b(R_4 + R_c) + I_3R_2(R_b + R_4 + R_c)] \quad (22c)$$

Apabila R_{MR} berubah karena medan luar (H_a), semua parameter dalam persamaan (22a,b,c) tetap kecuali I_5 dan I_3. Jadi apabila I_3 dan I_5 berubah maka R_{MR} juga berubah dan perubahannya dapat dicari dengan mencari akar-akar persamaan (22). Bila R_{MR} ditemukan maka H_a juga dapat dicari dengan persamaan (19).

Secara sederhana dapat dituliskan :

I_3 dan I_5 → Rumus (22) → R_{MR} → Rumus (20) → H_a

Untuk memudahkan dibuat program (terlampir)

Penelitian ini dilaksanakan dalam dua tahap sebagai berikut :

1. Pembuatan Sistem Sensor

Dalam pembuatan sensor, bahan yang digunakan adalah komponen elektronik dan alat yang digunakan adalah *powersupply*,dan multimeter digital. Pembuatan sistem sensor dilaksanakan dalam tiga sub-tahap.

a. Sub-tahap pertama Optimalisasi keluaran sensor

Membuat rangkaian seperti Gambar 2 serta dilakukan variasi perbandingan antara R_2 dan R_3 untuk memperoleh hasil keluaran yang paling optimum dengan melakukan perubahan R_{MR} sebesar 1 ohm.

b. Sub-tahap kedua linearisasi keluaran sensor

Setelah memilih perbandingan R_2 dan R_3 dengan keluaran paling optimum dan dibuat rangkaian seperti Gambar 2 maka lalu divariasi R_{MR} dengan mengganti besarnya hambatan dan diukur I_3 dan I_5

c. Sub-tahap ketiga pencocokan hasil pengukuran secara langsung dengan hasil yang menggunakan sistem seperti Gambar 2

Dilakukan pengukuran secara langsung bermacam-macam resistor dengan 3 multimeter digital (A,B danC) dengan merek sama , kemudian resistor-resistor tersebut dipasang pada R_{MR} selanjutnya diukur I_5 dan I_3.

2. Pengkalibrasian sensor

Dalam pengkalibrasiaan sensor, alat yang dipakai adalah rangkaian sistem sensor , *powersupply*, sumber medan dan teslameter. Sedang bahan yang digunakan adalah lapisan tipis permalloy $Ni_{80}Fe_{20}$ hasil *sputtering*.

Lapisan tipis dipasang pada R_{MR} dan diletakkan pada sumber medan. Selanjutnya rangkaian disambung dengan sumber arus (lihat Gambar 3). Besarnya medan lalu divariasi dan diukur perubahan I_3 dan I_5. Akhirnya I_3 dan I_5 hasil ukur dimasukkan ke dalam program I (Lampiran) untuk memperoleh besarnya R_{MR} sehingga dapat dilakukan kalibrasi dengan H_a.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam teknis pelaksanaannya penelitian ini mengikuti dua tahap yaitu (i) tahap pertama : pembuatan sistim sensor, dan (ii) tahap kedua : pengkalibrasian sensor.

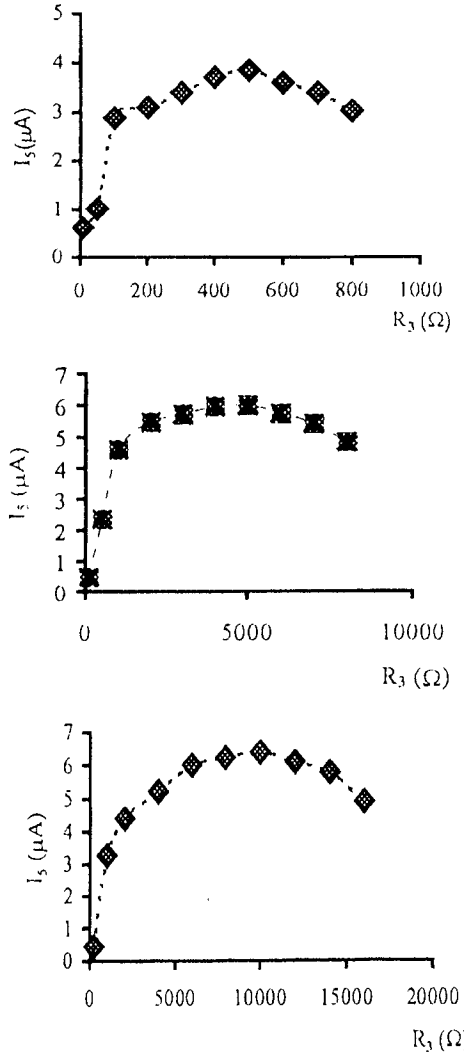
Pembuatan sistem sensor

Pembuatam sistem sensor dilaksanakan dalam tiga sub-tahap yaitu :

Vol. 2 No. 1, Oktober 2000, hal : 1 - 6
ISSN : 1411-1098

a. Sub-tahap pertama optimalisasi keluaran sensor

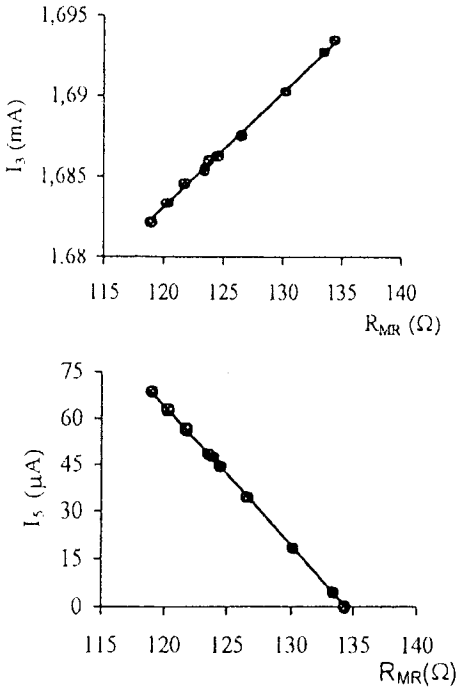
Dengan memvariasi perbandingan antara R_2 dan R_3 dan dengan merubah R_{MR} sebesar 1 ohm maka hasil keluaran sensor yang diperoleh adalah seperti pada Gambar 4. Dilihat dari Gambar 4, tampak bahwa perbandingan $R_2 : R_3$ yang menghasilkan keluaran yang tertinggi adalah 1 : 5. Untuk itu dipilih perbandingan $R_2 : R_3 = 1 : 5$. Jika hambatan R_2 semakin besar, maka keluaran juga semakin besar. Namun hal ini mengakibatkan tegangan yang dibutuhkan juga semakin besar. Untuk itu perlu dipilih R_2 yang menghasilkan keluaran yang optimum. Didalam penelitian ini dipilih nilai $R_2 = 1000$ (Gambar 4.b) perbandingan ini menghasilkan keluaran $I_5 = 6\ \mu$ A untuk perubahan R_{MR} sebesar 1 ohm, sedang tegangan yang dibutuhkan sebesar 9 volt. Nilai $R_2 = 1000$ ohm : dipandang lebih baik dibanding nilai $R_2 = 100$ atau 2000 ohm. Karena walaupun nilai $R_2 = 2000$ ohm menghasilkan keluaran yang lebih tinggi (6,39μA) (Gambar 4c) namun tegangan yang dibutuhkan juga tinggi, yaitu dua kalinya (18 volt), sedang untuk nilai $R_2 = 100$ ohm, keluaran I_5 hanya setengahnya (3,2 μA) (Gambar4.a).



Gambar 4. Grafik keluaran sensor
a) untuk R2 = 100 ohm dan R3 = divariasi 10 – 800ohm.
b) untuk R2 = 1000 ohm dan R3 = divariasi 100 – 8000 ohm.
c) untuk R2 = 2000 ohm dan R3 = divariasi 200 – 16000 ohm.

b. Sub-tahap kedua linearisasi keluaran sensor.

Untuk mengetahui apakah perubahan R_{MR} linear dengan keluaran sensor (I_5 dan I_3), maka dilakukan pengujian linearisasi ,diperoleh hasil seperti Gambar 5. Dari Gambar 5 kelihatan jelas bahwa perubahan R_{MR} linier dengan perubahan I_5 maupun I_3. Ini sesuai dengan persamaan (21) yang menunjukan bahwa I_5 dan I_3 linear terhadap R_{MR}. Dengan diperolehnya linearisasi antara perubahan R_{MR} dan I_5 maupun I_3 maka sistem ini dapat digunakan untuk metode deteksi dengan memanfaatkan perubahan R_{MR} dan diukur I_5 dan I_3.



Gambar 5. Grafik linearisasi a) R_{MR} dan I_3, b) R_{MR} dan I_5

c. Sub-tahap tiga pencocokan hasil pengukuran secara langsung dengan hasil yang menggunakan sistem seperti Gambar 2

Tahapan ini dimaksudkan untuk mengetahui apakah hasil keluaran sistem ini (I_5 dan I_3) setelah dimasukkan rumus betul-betul menunjukkan perubahan R_{MR}. Dari data pengukuran dan setelah dimasukkan rumus diperoleh hasil seperti dalam Tabel 1.

Dari Tabel 1 menunjukkan bahwa hasil pengukuran menggunakan sistem sensor mengandung perbedaan dengan hasil pengukuran secara langsung namun perbedaan tersebut masih di dalam jangkauan ralat karena dari pengukuran secara langsung dengan menggunakan 3 multimeter digital ketiga-tiganya tidak ada yang menunjukkan angka yang sama . Jadi pengukuran dengan menggunakan sistem sensor dapat dikatakan sama dengan pengukuran secara langsung.

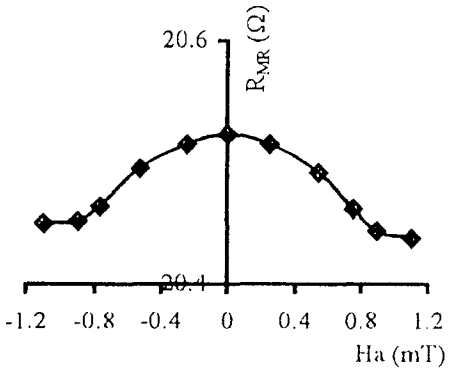
Tabel 1. Hasil pengukuran R_{MR} secara langsung dan pengukuran R_{MR} dengan sistem sensor

Hasil pengukuran secara langsung dengan 3 multimeter (A,B,C)			Hasil pengukuran menggunakan sistem menurut Gambar 2
R_{MR} (Ω) A	R_{MR} (Ω) B	R_{MR} (Ω) C	R_{MR} (Ω)
134,45	133,82	134,56	134,29± 0,04
133,50	132,86	133,55	133,42 ± 0,16
130,31	129,73	130,38	129,3 ± 0,4
126,59	126,18	126,70	126,4 ± 0,2
124,50	123,95	124,55	124,44 ± 0,17
123,89	123,28	123,95	123,80 ± 0,03
123,50	122,90	123,54	123,35± 0,11
121,78	121,22	121,83	121,9± 0,2
120,30	119,77	120,37	120,39 ± 0,17
119,05	118,50	119,10	118,74 ± 0,01

Pengkalibrasian sensor

Bahan sensor yang digunakan adalah lapisan tipis permalloy $Ni_{80}Fe_{20}$ hasil *sputtering* , dengan tekanan operasi $9x10^{-2}$ mTorr, tegangan 3 Kvolt, arus 10 mA, suhu substrat 250 °C, jarak elektroda 3 cm, waktu deposisi 10 menit dan diperoleh ketebalan dalam orde mikrometer.

Setelah data (I_5 dan I_3) yang diperoleh dimasukan dalam program I (Lampiran) diperoleh grafik perubahan hambatan terhadap medan, seperti tampak pada Gambar 6.

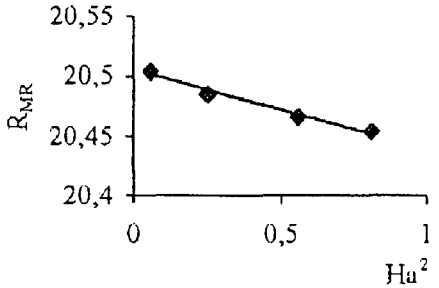


Gambar 6. Grafik perubahan

Dari grafik Gambar 6 dapat dilihat bahwa lapisan tipis sebagai bahan sensor dapat bekerja dengan baik pada medan magnet 10^{-4} –10^{-3} tesla , karena hambatan lapisan berubah pada medan tersebut.Untuk mengkalibrasi sensor tersebut data dari Gambar 6 dimasukkan dalam persaman (20) yang telah dijabarkan menjadi persamaan sebagai berikut:

Dengan R_{MR} sebagai sumbu Y , H_a^2 sebagai sumbu X dan $R_t/(H_k^*)^2$ merupakan gradiennya sehingga diperoleh grafik seperti tampak pada Gambar 7.

Dari Gambar 7 diperoleh gradien –(0,061 ± 0,009)ohm/(mT)^2 dan dengan R_t (hambatan terkecil) = 20,454 ohm sehingga diperoleh H_k^* = (18 ± 3)mT. Setelah ditemukan H_k^* dimaskukan dalam program II. Dengan demikian apabila diperoleh data (I_5 danI_3) dari sensor dimasukan program II akan keluar H_a yang dicari.



Gambar 7. Grafik R_{MR} sebagai hambatan terhadap medan fungsi H_a^2

Faktor pertama yang mempengaruhi sensitivitas sensor adalah anisotropi magnetik yang tergantung struktur lapisan tipis. Dalam hal ini kondisi proses pendeposisian lapisan tipis berperanan penting dalam menentukan struktur lapisan tersebut[5] . Faktor kedua adalah magnetoresistansi (ΔR/R) . Sensor magnetoresistif merupakan sensor yang mendeteksi medan magnet dengan perubahan hambatan lapisan sehingga kepekaan sensor dapat dilihat dari besarnya perubahan hambatan sensor dibagi hambatan lapisan. Untuk hasil sensor ini sensitivitasnya kurang baik ini dilihat dari ΔR/R adalah kecil ±0,43 %.

Untuk memperoleh sensor dengan sensitivitas yang lebih baik diperlukan perbaikan dalam proses pendeposisian lapisan tipis. Dengan perbaikan tersebut diharapkan diperoleh lapisan tipis magnetik dengan H_k kecil, karena H_k kecil akan meningkatkan sensitivitas [6].

KESIMPULAN

Lapisan tipis Permalloy $Ni_{80}Fe_{20}$ terbukti dapat digunakan sebagai sensor magnetoresistif yang berbentuk sistem jembatan Wheatstone. Sensor bekerja dengan baik dalam jangkauan medan magnet 10^{-4} sampai 10^{-3} tesla. Untuk meningkatkan sensitivitas sensor diperlukan perbaikan dalam pendeposisian lapisan tipis permalloy $Ni_{80}Fe_{20}$ agar diperoleh lapisan dengan ΔR/R besar dan H_k kecil.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Bapak Sudjatmoko, Tono Wibowo, Bambang Siswanto, yang telah membantu dalam pembuatan lapisan tipis di PPPTM –BATAN Yogyakarta, Mas Kardi,Mas Farid, Mas Heri dan semua pihak yang telah membantu dalam pembuatan sistem sensor di Laboratorium FMIPA UGM.

DAFTAR ACUAN

[1]. FERT and LOTTIS, D.K., *Magnetotransport Phenomena, Encyclopedia of Magnetic and Superconducting*, S.E. Everts edition, Pergamon Press, (1992).

[2]. GOPEL,W., HESSE,J. and ZEMEL,J.N., *Sensors, comprehensive Survey*, VCH, Weinheim, Germany (1989).

Vol. 2 No. 1, Oktober 2000, hal : 1 - 6
ISSN : 1411-1098

[3]. GROENLAND, J.P.J., EIJKEL,C.J.M., FLUITMAN J.H.J. and RIDDER.R.M., *Sensors and Actuators*, **A.30** (1992) 89.

[4]. WATSON, J. K., *Magnetic Devices, Encyclopedia of Physical Science and Technology*, 2nd edition, volume 9, Academic Press Inc, New York, (1994).

[5]. YEH,T dan WITCRAFT,F.W., *IEEE Trans. On Magnetics*, **31** (1995) 3131.