

Perancangan Sumber Medan Magnet Variabel Untuk Pengaplikasian Tomografi Induksi Medan Magnet

Variable Magnetic Field Design For Magnetic Field Induction Tomography Applications

Fira Fauziah Hammur¹, Dudi Darmawan², Asep Suhendi³
^{1,2,3} Prodi S1 Teknik Fisika, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom
¹firafauziahhammuraz2@gmail.com, ²dudidw@telkomuniversity.ac.id,
³suhendi@telkomuniversity.ac.id

Abstrak

Penelitian ini mengenai perancangan sumber medan magnet variabel untuk pengaplikasian tomografi induksi medan magnet. Sumber medan magnet menggunakan rangkaian VCCS untuk mengubah tegangan menjadi arus. Sumber medan magnet variabel menggunakan koil selenoida sebagai sumber dan diberi inti ferrit, sebelum memilih koil selenoida yang akan digunakan dilakukan perbandingan terlebih dahulu terhadap semua sampel koil selenoida dengan perlakuan yang sama. Dibuat enam buah konfigurasi koil yaitu tiga koil konfigurasi dengan panjang yang sama 9 cm dan jumlah lilitan yang berbeda 900, 800, dan 700 serta tiga koil konfigurasi dengan jumlah lilitan N yang sama 600 dengan panjang yang berbeda yaitu 9 cm, 6 cm, dan 5 cm. Untuk memilih konfigurasi koil yang paling optimal dari keenam sampel maka semua sampel dibandingkan, tetapi jumlah lilitan dan panjang koil terpaut cukup jauh sehingga hanya dapat dipilih salah satu konfigurasi. Konfigurasi yang akan dibandingkan adalah konfigurasi dengan jumlah lilitan N yang sama yaitu 600. Hasil pengukuran disetiap titik uji pengukuran dari 0-2 cm dari konfigurasi yang telah dipilih menunjukkan kuat medan magnet yang paling besar adalah konfigurasi dengan spesifikasi koil panjang 5 cm, jumlah lilitan 600, dan jumlah layer 12. Koil dengan spesifikasi ini diberikan arus yang bervariasi dari 0-1 A dan menghasilkan medan magnet terbesar. Konfigurasi optimal yang telah dipilih dikarakterisasi terhadap sistem yang telah dibuat. Sumber medan magnet variabel yang telah dibuat ini memiliki *range* kuat medan magnet 16-101 Gauss pada jarak 0.5 cm dari ujung koil selenoida dan 7-46 Gauss pada jarak 1 cm dari ujung selenoida.

Kata kunci : Sumber medan magnet variabel, , tomografi induksi medan magnet, koil selenoida, VCCS.

Abstract

This research is make a design of source of variable magnetic field to applied in the tomography induction of magnetic field. The sources of magnetic field use VCCS circuit to change volt into current. selenoidal coil used to be the sources variable of magnetic field and given ferrit on the core, before determined what selenoidal coil that used in this research, comparison between all the selenoidal coil is needed, that is three coil with 9 cm length and had three different coil that is 900, 800, and 700 also three coil configuration with the same coil N that is 600 and with different length that is 9 cm, 6 cm, and 5 cm. To choose which coil configuration is the most optimal, all the sample compared to each other, but number of coil and length of coil had too much gap so from all of that is selected just one configuration, that is configuration with the same coil N that is 600. measurement result in every point from 0-2 cm of configuration that selected show how much strong magnetic field is, and the biggest is coil with 5 cm length, number of coil 600, and number of layer 12. the variation of current given from 0-1 A and make this configuration with the strongest magnetic field. The optimized configuration that chosen and characterization to the system. Source of variable magnetic field had a range of magnetic field intensity from 16-101 Gauss at a 0.5 cm distance and 7-46 Gauss at a 1 cm distance.

Key Word :

The source of the variable magnetic field, Tomography induction of magnetic field, Selenoidal Coil, VCCS.

1. Pendahuluan

Dalam dunia industri manufaktur, pengendalian kualitas produk adalah salah satu hal terpenting. Hal ini diperlukan untuk menghindari cacat produk, salah satunya kerusakan

sambungan pada kerangka logam yang tidak dapat dilihat secara kasat mata. Sehingga diperlukan pengambilan citra pada penampang objek yang dapat dilakukan dengan *non-destructive testing*. Tomografi adalah salah satu teknik memperoleh citra penampang objek tanpa harus merusak melalui pengambilan data eksternal. Beberapa teknik tomografi telah dikembangkan salah satunya *Magnetic Inductans Tomography* (MIT) atau *Electromagnetic Tomography*.

MIT mampu menghasilkan citra yang cukup terutama pada objek-objek yang memiliki nilai konduktivitas yang tinggi seperti objek-objek logam sehingga sangat potensial untuk dimanfaatkan pada dunia industri terutama pada industri manufaktur [1]. Tomografi induksi medan magnet diperlukan pemberian besar medan magnet yang bervariasi. Pada penelitian sebelumnya, yang telah dilakukan oleh Irma Lusiana, yang berjudul "Rancang Bangun Prototipe Magnetizer Multipole Dengan Sistem Kontrol Arus Berbasis Mikrokontroler" menunjukkan sumber medan magnet variabel dapat dibuat dengan mengontrol besar arus yang bervariasi. Pengontrolan dilakukan dengan memberikan input besar arus yang ingin dialirkan pada koil dan diolah menggunakan mikrokontroler. Dan penelitian oleh Kartini Kartikasari dkk, yang berjudul "Rancang Bangun Sumber Medan Magnetik Dinamik Untuk Identifikasi Anomali Magnetik Lapisan Tanah" menunjukkan hasil bahwa jarak penginduksian mempengaruhi hasil medan magnet yang terukur pada objek.

Pada Tugas Akhir ini, dirancang sumber medan magnet dengan input yang diberikan berupa kuat medan magnet yang diinginkan dan jarak sumber medan magnet terhadap objek. Sumber medan magnet variabel memiliki dua komponen utama yaitu sumber arus dan koil. Untuk mengubah sumber medan magnet menjadi variabel maka nilai arus yang akan diberikan dari sumber arus ke koil harus berubah-ubah sehingga nilai medan magnet yang dihasilkan berubah sesuai dengan nilai arus yang alirkan. Sedangkan koil yang digunakan perlu divariasikan parameter koil selenoida. Penginduksian kuat medan magnet yang variatif perlu disesuaikan dengan jarak penginduksian terhadap objek. Oleh karena itu diperlukan studi perancangan sumber medan variabel dengan jarak penginduksian yang dapat diubah.

2. Dasar Teori

2.1 Medan Magnet

Medan magnet adalah medan gaya yang berada di sekitar sebuah benda magnetik atau di sekitar sebuah konduktor berarus dan merupakan besaran fisis yang memiliki besar dan arah. Medan magnet disimbolkan dengan \vec{B} yang merupakan besaran vector dan memiliki satuan weber per meter persegi (Wb/m^2) atau Tesla (T) atau 10.000 Gauss [4].

2.2 Sumber Medan Magnet

Medan magnet memiliki beberapa sumber yang sudah banyak dimanfaatkan dalam kehidupan sehari-hari. Sumber medan magnet yang sering dimanfaatkan ada dua yaitu magnet permanen dan konsep arus listrik yang melewati suatu koil.

2.2.1 Magnet Permanen

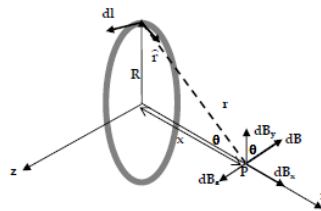
Magnet permanen merupakan magnet yang tidak memerlukan energi dari luar untuk menghasilkan medan magnet. Bumi memiliki medan magnet yang akan menimbulkan medan magnet, pola garis-garis medan menunjukkan seakan-akan ada magnet batang (imajiner) di dalam Bumi. Karena kutub utara jarum kompas menunjuk ke utara, kutub magnet yang ada pada utara geografis sebenarnya secara magnetis merupakan kutub selatan dan sebaliknya [5].

2.2.2 Konsep Arus Listrik Yang Melewati Suatu Koil

Arus listrik yang mengalir pada sebuah penghantar menghasilkan efek-efek kemagnetan pertama kali ditemukan oleh Hans Christian Oersted pada tahun 1820. Menurut Hans, "Jika sebuah magnet jarum (kompas kecil) didekatkan pada suatu penghantar yang berarus listrik, magnet jarum akan menyimpang". Medan magnet yang dihasilkan oleh arus listrik disebut *medan magnet induksi* [6].

2.3 Hukum Biot Savart

Pada tahun 1820 Biot-Savart mengemukakan perhitungan lebih lanjut berkaitan dengan induksi magnetik oleh unsur (elemen) arus [7]. Untuk menghitung besar medan magnet disekitar arus listrik dapat ditetapkan dengan hukum Biot-Savart.



Gambar 2.1 Medan Magnet pada titik P sejauh x dari sumbu kawat lingkaran beraus listrik [8]

Besar kuat medan magnet pada titik P seperti pada gambar 2.1 dapat digunakan persamaan Biot-Savart, komponen medan magnet yang berpengaruh hanyalah arah x saja dB_x , dimana medan magnet arah z akan saling menghilangkan, demikian pula medan magnet pada arah y . Untuk medan magnet komponen- x di P berlaku hubungan: [8]

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} I \frac{dl}{(x^2 + R^2)} \quad (2.1)$$

$$dB_x = dB \cdot \sin \theta = dB \frac{R}{\sqrt{x^2 + R^2}} \quad (2.1)$$

maka persamaan medan magnet komponen- x di titik P berlaku hubungan: [8]

$$dB_x = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I R}{(x^2 + R^2)^{\frac{3}{2}}} dl \quad (2.2)$$

Jika dilakukan proses integrasi pada dl untuk seluruh lingkaran, nilai x dan R tidak akan berubah sehingga dapat dianggap konstanta, sehingga : [8]

$$B_x = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I R}{(x^2 + R^2)^{\frac{3}{2}}} \int_{\text{lingkaran}} dl \quad (2.3)$$

Integral dl dari lingkaran adalah keliling lingkaran yakni $2\pi R$, sehingga: [8]

$$B_x = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2\pi I R^2}{(x^2 + R^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (2.4)$$

2.4 Medan Magnet Pada Selenoida

Solenoida adalah induktor yang terdiri dari gulungan kawat. Aliran arus listrik pada solenoida akan menghasilkan medan magnet di sekitarnya dengan pola garis-garis medannya seperti garis-garis medan yang ditimbulkan oleh medan magnet batang [9]. Solenoida dengan jumlah lilitan N dan panjang L dialiri arus I akan menghasilkan medan magnet, besar medan magnet yang dihasilkan pada sumbu ujung solenoida memenuhi persamaan: [8]

$$B_r = \frac{\mu_0 N I}{2L} \quad (2.5)$$

Pemberian inti pada solenoida akan memperbesar nilai medan magnet yang dihasilkan dan memenuhi persamaan: [8]

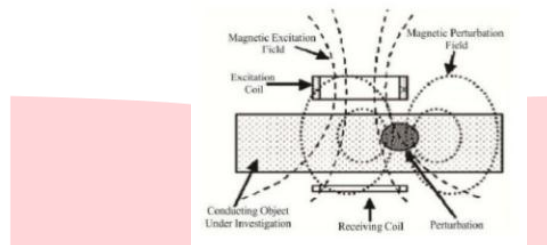
$$B_r = \frac{\mu_0 \mu_r N I}{2L} \quad (2.6)$$

Dimana: B_r = Kuat medan magnet di ujung solenoida [T atau Wb/m²],
 μ_r = Permabilitas bahan [T.m/A atau Wb/A.m],
 μ_0 = Permabilitas ruang hampa [$4\pi \cdot 10^{-7}$ Wb/A.m],
 N = Jumlah lilitan solenoida,
 L = Panjang solenoida [m], dan
 I = Arus yang mengalir pada solenoida [A].

Berdasarkan pada persamaan yang digunakan maka dapat disimpulkan bahwa, untuk mengubah atau memperbesar kuat medan magnet yang dihasilkan bergantung kepada beberapa parameter yaitu jumlah lilitan N, panjang selenoida L, dan besarnya arus yang mengalir pada selenoida. Pada percobaan ini tiga faktor tersebut dijadikan sebagai parameter sampel yang akan dibuat. Diameter koil juga akan menjadi parameter sampel karena akan berpengaruh terhadap panjang selenoida.

2.5 Magnetic Inductans Tomography (MIT) atau Electromagnetic Tomography

Magnetic Inductans Tomography (MIT) merupakan teknik yang dapat mencitrakan sifat elektromagnetik distribusi konduktivitas dalam suatu objek (Peyton et al, 1995). Medan magnet yang dihasilkan dari arus bolak balikm (AC) dalam sistem koil transmitter menghasilkan arus eddy di dalam objek material konduktif, dan menghasilkan medan magnet yang kedua yang dapat dideteksi dengan mengukur nilai tegangan induksi dalam koil [11].



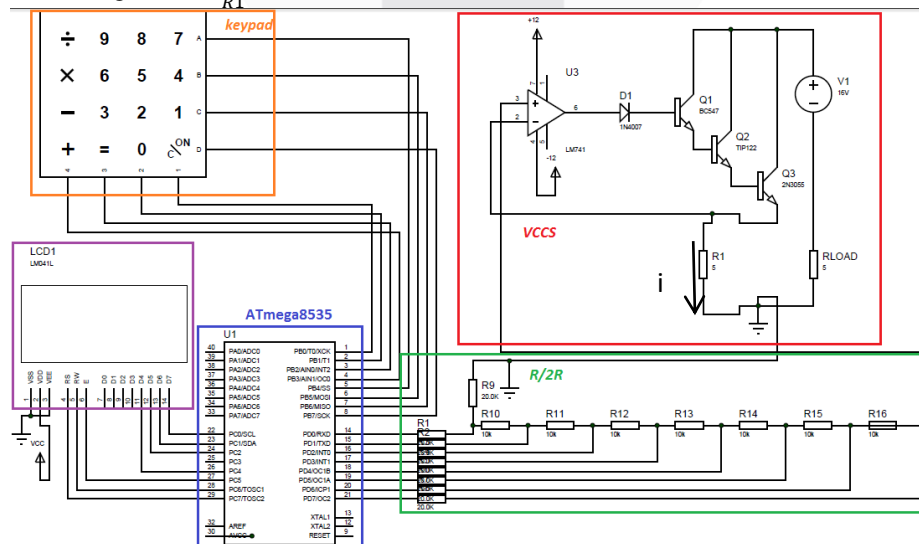
Gambar 2. 2 Prinsip Kerja MIT [11]

3. Pembahasan

3.1 Perancangan Pengontrol Arus dan Karakterisasi Koil

3.1.1 Perancangan Pengontrol Arus

Perancangan sumber medan magnet variabel memiliki dua komponen utama yaitu sumber arus dan koil sebagai sumber medan. Gambar 3.1 merupakan rangkaian pengontrol arus yang terdiri dari keypad yang akan digunakan untuk input besar kuat medan magnet B yang diinginkan dan jarak penginduksian yang diinginkan dan dibaca menggunakan mikrokontroler ATmega8535 serta mengontrol besar nilai DAC yang akan dikonversi menjadi sinyal data analog menggunakan rangkaian R/2R. Sinyal data analog berupa tegangan akan digunakan sebagai tegangan input V_{DAC} untuk rangkaian VCCS, sehingga nilai arus yang akan dihasilkan bergantung pada nilai tegangan keluaran dari DAC. Rangkaian VCCS bekerja berdasarkan prinsip op-amp non-inverting, tegangan pada V_+ dan V_- akan bernilai sama sehingga arus yang melewati resistor akan lebih stabil. Rangkaian VCCS akan mengubah nilai tegangan V_{DAC} menjadi arus i . Nilai arus i yang dihasilkan akan senilai dengan $i = \frac{V_{DAC}}{R1}$.



Gambar 3. 1 Rangkaian Pengontrol Arus

3.1.2 Karakterisasi Koil Solenoida

Proses karakteristik koil sangat penting dilakukan agar dapat mengkondisikan kuat medan magnet agar dapat dibaca oleh alat ukur. Salah satu proses untuk mengkarakteristik koil adalah dengan memilih diameter kawat yang akan digunakan, jumlah lilitan, panjang koil, dan inti koil. Pada proses karakteristik koil jumlah lilitan yang akan digunakan adalah 900, 800, 700, dan 600. Koil solenoida diberi inti ferrit dengan diameter 1 cm dan diameter kawat yang digunakan 0.75 mm.

3.1.3 Alat Ukur Magnetic Meter dan Multimeter

Pada proses pengujian, digunakan alat ukur Magnetic Meter Model MG-3002 dan multimeter. Penggunaan Magnetic Meter untuk mengetahui besar kuat medan magnet yang dihasilkan oleh sumber medan magnet, dan multimeter digunakan untuk mengukur tegangan yang dihasilkan pada rangkaian DAC dan rangkaian VCCS.

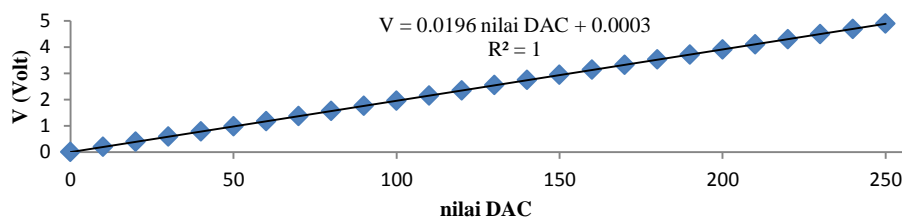


Gambar 3. 2 Alat ukur (a) Magnetic Meter Model MG-3002, (b) Multimeter

3.2 Pengujian dan Analisis

3.2.1 Pengujian Digital to Analog Converter

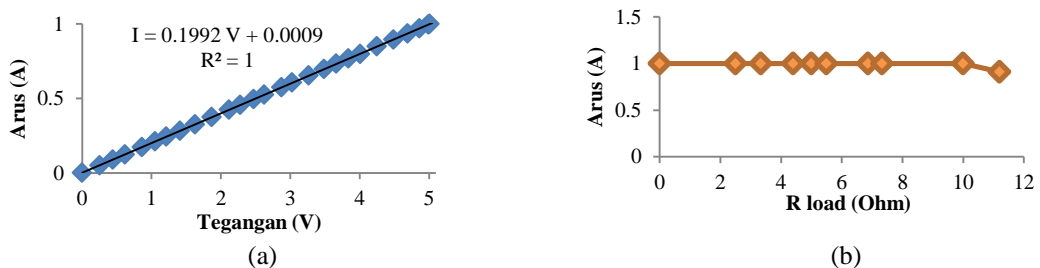
Sistem digital to analog converter pada penelitian ini menggunakan rangkaian R/2R. Untuk memastikan tegangan yang dihasilkan *linear*, maka diperlukan karakterisasi antara tegangan terhadap pertambahan nilai DAC. Dari Gambar 3.3 menunjukkan grafik hasil pengukuran besar tegangan yang dihasilkan terhadap pertambahan nilai DAC adalah mendekati *linear*. Didapatkan bahwa resolusi dari tegangan yang dihasilkan adalah 0.0196 untuk setiap penambahan nilai DAC yang dihasilkan mikrokontroler.



Gambar 3. 3 Grafik Tegangan Terhadap Penambahan nilai DAC

3.2.2 Pengujian Rangkaian VCCS

Pada Hasil pengujian vccs yang digunakan sebagai sumber arus diperoleh dengan mengukur besar tegangan pada resistor. Dimana tegangan input yang diberikan pada VCCS akan sama dengan tegangan pada resistor. Tegangan input yang diberikan variatif 0-5 Volt sehingga besar arus yang dapat divariatifkan sebesar 0-1 Ampere.

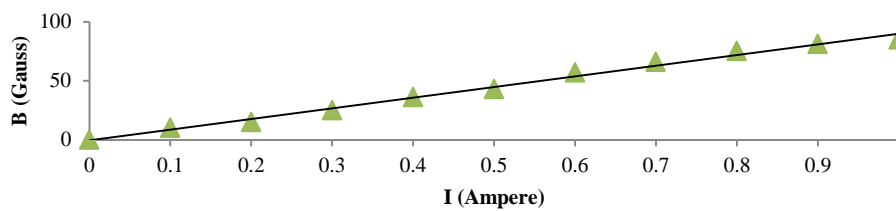


Gambar 3. 4 (a) Grafik Arus Terhadap Tegangan dengan R_{load} atau beban 0 ohm, (b) Grafik Arus terhadap R_{Load} atau beban dengan tegangan input 5 Volt

Gambar 3.4(a) menunjukkan hasil pengukuran arus terhadap tegangan input pada VCCS dengan besar R_{Load} atau beban yang diberikan sebesar 0 ohm menunjukkan nilai arus berubah terhadap besar tegangan input mendekati *linear*. Rangkaian yang telah dirancang merupakan rangkaian VCCS seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.4(b) dengan mengubah R_{Load} atau beban dari 0-11.2 ohm. Besar arus yang terukur 1 Ampere dengan tegangan input sebesar 5 Volt untuk R_{Load} atau beban yang diberikan 0-10 ohm. Sehingga dapat dibuktikan bahwa rangkaian yang dibuat merupakan rangkaian VCCS dengan R_{Load} atau beban yang diberikan pada rangkaian VCCS hanya dapat diberikan maksimum 10 ohm agar memenuhi daerah kerja 0 - 1 Ampere dengan input maksimum 5 V.

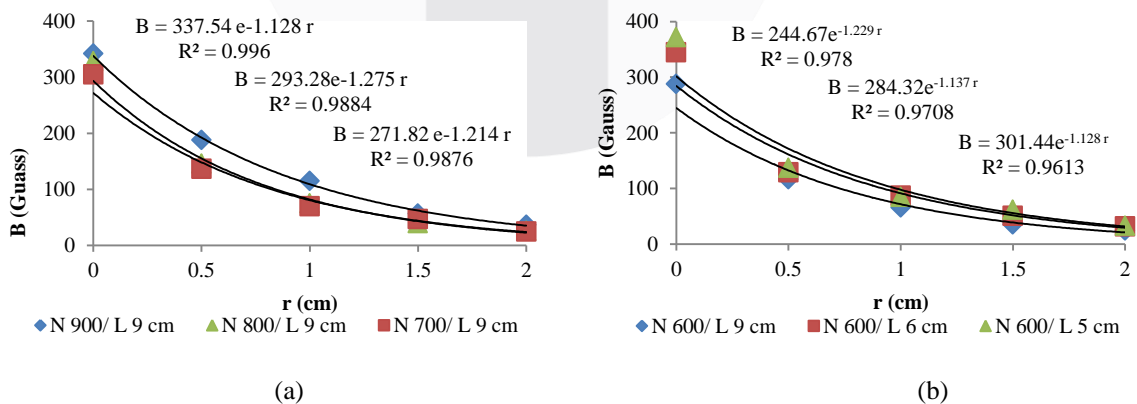
3.2.3 Pengujian Koil

Pengujian koil dilakukan dengan memberikan besar arus dari 0–1 Ampere dengan jarak pengukuran dari 0-2 cm. Koil yang digunakan ada enam yang terdiri dari dari tiga koil dengan panjang L yang sama (9 cm/900,800,dan 700), serta tiga koil dengan jumlah lilitan N yang sama (600/9 cm, 6 cm, dan 5 cm). Untuk melihat pengaruh besar arus yang bervariasi maka dapat dilihat pada gambar 4. 5.



Gambar 3. 1 Grafik Besar Kuat Medan Magnet B terhadap Arus I pada jarak 1 cm untuk konfigurasi koil N 600/ L 5 cm

Gambar 4. 5 adalah hasil hubungan antara besar kuat medan magnet B dengan arus I pada konfigurasi koil dengan jumlah lilitan N 600 dan panjang L 5 cm. Koil dialiri arus sebesar 0 - 1 Ampere dengan perubahan arus sebesar 0.1 Ampere. Semakin besar arus yang diberikan maka semakin besar kuat medan magnet yang terukur pada koil dan sebaliknya, semakin kecil arus yang diberikan maka semakin kecil besar kuat medan magnet yang terukur pada koil. Hal ini menunjukkan bahwa sumber medan magnet variabel dapat digunakan dengan memberikan besar arus yang bervariasi. Untuk memilih konfigurasi yang paling optimal maka dilakukan perbandingan terhadap keenam konfigurasi koil. Pada pengujian yang telah dilakukan pada keenam konfigurasi koil pada jarak pengukuran 0 - 2 cm.



Gambar 3. 2 Grafik Kuat Medan Magnet B terhadap jarak r dengan arus maksimum 1 A (a) Konfigurasi L 9 cm/ N 900, 800, 700, (b) Konfigurasi N 600/ L 9 cm, 6 cm, 5cm

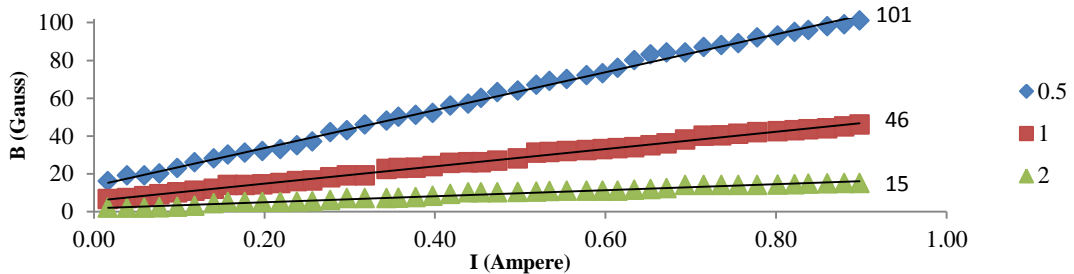
Gambar 3. 6 menunjukkan grafik dengan pendekatan persamaan ekponensial. Koil digerakkan mendekati dan menjauhi probe dengan pergeseran koil 0-2 cm, dengan perubahan jarak 0.5 cm. Gambar 3. 6 memperlihatkan hubungan antara besar kuat medan magnet B dengan

perubahan jarak (r). Dari pengukuran yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa semakin dekat jarak sumber medan magnet terhadap sensor maka semakin besar pula kuat medan magnet yang terukur oleh alat ukur dan sebaliknya semakin jauh jarak sumber medan magnet terhadap sensor maka semakin kecil kuat medan magnet yang terukur oleh alat ukur.

Pemilihan konfigurasi koil yang paling optimal dilakukan dengan membandingkan semua konfigurasi yang ada, tetapi semua konfigurasi tidak dapat saling dibandingkan karena memiliki perbandingan jumlah lilitan dan panjang koil yang terpaut cukup jauh. Sehingga hanya salah satu konfigurasi yang dapat dibandingkan, konfigurasi dengan jumlah lilitan N yang sama akan digunakan sebagai pembanding untuk memilih konfigurasi koil yang akan digunakan sebagai sumber medan magnet. Berdasarkan pada gambar 3.6 b menunjukkan besar kuat medan magnet yang terukur pada jarak pengukuran 0 - 2 cm, konfigurasi N 600/ L 5 cm menunjukkan besar kuat medan magnet yang lebih besar dibandingkan dengan konfigurasi lainnya pada jarak selain 1 cm. Sehingga konfigurasi N 600/ L 5 cm memiliki besar kuat medan magnet yang lebih besar pada empat titik pengujian dan konfigurasi ini yang akan digunakan sebagai sumber medan magnet.

3.2.4 Pengujian Koil Konfigurasi N 600/ L 5 cm Terhadap Alat Sebagai Sumber Medan Magnet

Pada pengujian ini digunakan koil konfigurasi dengan jumlah lilitan N sebesar 600 dengan panjang koil 5 cm dan diberikan inti ferrit pada koil. Konfigurasi ini telah dipasang pada alat secara permanen, sehingga perlu dilakukan karakterisasi antara alat dan juga koil. Pengujian akan dilakukan pada jarak 0.5 cm, 1 cm, dan 2 cm dari ujung koil. Di setiap titik pengujian diberikan besar arus sebesar 0.02 – 0.9 Ampere, dengan perubahan arus sebesar 0.02 Ampere. Besar arus yang bervariasi ini memberikan pengaruh terhadap besar kuat medan magnet yang terukur seperti yang ditunjukkan pada gambar 3. 7.

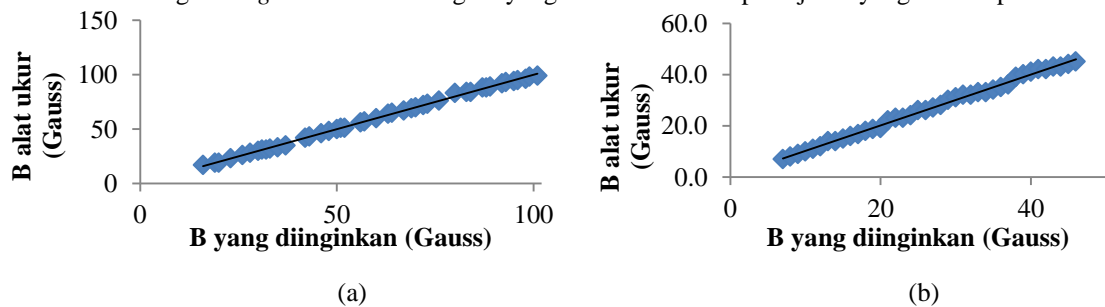


Gambar 3. 7 Grafik Perbandingan Kuat Medan Magnet terhadap Arus untuk konfigurasi N 600/ L 5 cm pada jarak 0.5 cm, 1 cm, dan 2 cm.

Pada gambar 3. 7 menunjukkan grafik dengan persamaan *linear*. Besar kuat medan magnet yang terukur pada saat diberikan arus maksimum pada jarak 0.5 cm, 1 cm, dan 2 cm sebesar 101 Gauss, 46 Gauss, dan 15 Gauss. Pada jarak 2 cm besar kuat medan magnet yang terukur kecil, sehingga jarak yang akan digunakan pada alat sumber medan magnet variabel adalah 0.5 cm dan 1 cm.

3.2.5 Pengujian Alat Sumber Medan Magnet Variabel

Pada pengujian dilakukan dengan memberikan input jarak yang diinginkan (0.5 cm atau 1 cm) dan besar kuat medan magnet yang diinginkan. Besar kuat medan magnet yang diinginkan harus sesuai dengan *range* kuat medan magnet yang telah ditentukan pada jarak yang telah dipilih.



Gambar 3. 8 Grafik Besar Kuat Medan Magnet B yang Diinginkan terhadap Besar Kuat Medan Magnet B yang terukur pada alat ukur (a) pada jarak 0.5 cm, (b) pada jarak 1 cm

Gambar 3. 8 menunjukkan grafik dengan persamaan yang hampir *linear*. Setelah dilakukan pengujian alat pada jarak 0.5 cm ditunjukkan gambar 3.8 a, besar kuat medan magnet yang diinginkan terhadap besar kuat medan magnet yang terukur pada alat ukur Magnetic Meter Model MG-3002 memiliki nilai error rata-rata sebesar 1.10 %. Gambar 3.8 b menunjukkan hasil pengujian alat pada jarak 1 cm, besar kuat medan magnet yang diinginkan terhadap besar kuat medan magnet yang terukur pada alat ukur Magnetic Meter Model MG-3002 memiliki nilai error rata-rata sebesar 1.76 %.

4. Kesimpulan

Dari perancangan dan percobaan yang dilakukan, diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Pada penelitian ini berhasil dibuat sumber medan magnet variabel dengan menggunakan konfigurasi koil dengan jumlah lilitan N 600 dan panjang L 5 cm dengan kuat medan magnet maksimum 101 Gauss pada jarak 0.5 cm dan 46 Gauss pada jarak 1 cm.
2. Sumber medan magnet variabel yang telah dirancang memiliki range kuat medan magnet B sebesar 16 - 101 Gauss pada jarak 0.5 cm, dan range kuat medan magnet B pada jarak 1 cm 7 - 46 Gauss.
3. Sumber medan magnet variabel yang telah dibuat dengan input kuat medan magnet B yang diinginkan terhadap kuat medan magnet B yang terukur pada alat ukur Magnetic Meter Model MG-3002, memiliki error rata-rata 1.10 % pada jarak 0.5 cm dan error rata-rata 1.76% pada jarak 1 cm.

Daftar Pustaka

- [1] Pebrika, Ilham. (2014). "Analisa Distribusi Medan Magnet Pada Sensor Dasar *Magnetic Inductance Tomography* (MIT) Menggunakan Simulasi *Finite Element Method* (FEM)". Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam UGM.
- [2] Lusiana, Irma. (2014). "Rancang Bangun Prototipe Magnetizer Multipole Dengan Sistem Kontrol Arus Berbasis Mikrokontroler". Fakultas Pendidikan Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Pendidikan Indonesia.
- [3] Kartikasari, Kartini; dkk. (2015). "Rancang Bangun Sumber Medan Magnetik Dinamik Untuk Identifikasi Anomali Magnetik Lapisan Tanah". Fakultas Pendidikan Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Pendidikan Indonesia.
- [4] W. H. Hayt and J. A. Buck. (2006). "Elektromagnetika". Jakarta: Erlangga.
- [5] C. Giancoli, Dougla. (2001). "Fisika Edisi Lima Jilid 2". Jakarta: Erlangga.
- [6] Saripuddin, Aip. Rustiawan K., Dede. Suganda, Adit. (2009). "Praktik Belajar Fisika 3". Jakarta: Pusat Perbukuan Departemen Pendidikan Nasional.
- [7] Susilo. (2016). "Sumber Belajar Penunjang PLPG 2016 Mata Pelajaran/Paket Keahlian Fisika BAB XII Listrik Magnet". Kementerian Pendidikan Dan Kebudayaan Direktorat Jenderal Guru Dan Tenaga Kependidikan.
- [8] "Magnetisme (1) Listrik Menghasilkan Medan Magnet Fisika Dasar II" (Online), <http://yasmanrianto.staff.gunadarma.ac.id/Downloads/files/24266/06+Magnetisme+1.pdf>, diakses pada 12 Juli 2017.
- [9] Rohma, Aulia. (2013). "Pengaruh Medan Magnet Terhadap Aktivitas Enzim α -Amilase Pada Kecambah Kacang Merah Dan Kacang Buncis Hitam (*Phaseous Vulgaris L.*)".
- [10] Abdullah, Mikrauddin. (2006). "Diktat Kuliah Fisika Dasar II Tahap Persiapan Bersama ITB". Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Institut Teknologi Bandung.
- [11] Pebrika, Ilham. (2014). "Analisa Distribusi Medan Magnet Pada Sensor Dasar *Magnetic Inductans tomography* (MIT) Menggunakan Simulasi *Finite Element Method* (FEM)". Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Gadjah Mada.