



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**RANCANG BANGUN ALAT UKUR TEGANGAN INDUKSI  
MENGUNAKAN *VIRTUAL LOCK-IN AMPLIFIER* SEBAGAI  
DASAR PENGUKURAN SUSEPTIBILITAS MAGNET AC**

**SKRIPSI**

**FANDI AKHMAD  
030502039X**

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
PROGRAM STUDI FISIKA  
DEPOK  
JUNI 2010**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**RANCANG BANGUN ALAT UKUR TEGANGAN INDUKSI  
MENGUNAKAN *VIRTUAL LOCK-IN AMPLIFIER* SEBAGAI  
DASAR PENGUKURAN SUSEPTIBILITAS MAGNET AC**

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar  
Sarjana Strata Satu Fisika**

**FANDI AKHMAD  
030502039X**

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
PROGRAM STUDI FISIKA  
PEMINATAN FISIKA INSTRUMENTASI DAN ELEKTRONIKA  
DEPOK  
JUNI 2010**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,  
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk  
telah saya nyatakan dengan benar.

Nama : Fandi Akhmad

NPM : 030502039X

Tanda Tangan :



Tanggal : 28 Juni 2010

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : FANDI AKHMAD  
NPM : 030502039X  
Program Studi : Instrumentasi Elektronika S1  
Judul Skripsi : Rancang Bangun Alat Ukur Tegangan Induksi  
Menggunakan *Virtual Lock-in Amplifier* Sebagai Dasar  
Pengukuran Suseptibilitas Magnet AC

**Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Sains pada Program Studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia**

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing I : Dr. Sastra Kusuma Wijaya (  )

Pembimbing II: Dr. Techn. Djoko Triyono (  )

Penguji I : Dr. Cuk Imawan (  )

Penguji II : Dr. Azwar Manaf (  )

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 28 Juni 2010

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI  
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

---

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Fandi Akhmad  
NPM : 030502039X  
Program Studi : Fisika Instrumentasi Elektronika  
Departemen : Fisika  
Fakultas : Matematika dan Ilmu pengetahuan Alam  
Jenis karya : Skripsi

demikian demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

**RANCANG BANGUN ALAT UKUR TEGANGAN INDUKSI  
MENGUNAKAN *VIRTUAL LOCK-IN AMPLIFIER* SEBAGAI DASAR  
PENGUKURAN SUSEPTIBILITAS MAGNET AC**

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok  
Pada tanggal : 28 Juni 2010

Yang menyatakan,



(Fandi Akhmad)

Nama : Fandi Akhmad  
Program Studi : Fisika  
Judul Skripsi : Rancang Bangun Alat Ukur Tegangan Induksi Menggunakan Virtual Lock-in Amplifier sebagai dasar pengukuran suseptibilitas magnet AC

## ABSTRAK

Telah dilakukan penelitian untuk mengukur nilai tegangan induksi yang dihasilkan oleh koil pick-up yang berada dalam pengaruh medan magnet homogen. Sumber medan magnet homogen yang digunakan berasal dari kumparan Helmholtz dengan 210 lilitan pada masing-masing kumparannya, dan dengan jari-jari efektif 14.5 cm. Variasi medan magnet didapat dengan memberikan variasi arus, dan dari pengukuran didapatkan bahwa kumparan Helmholtz tersebut mempunyai medan magnet homogen sepanjang 6 cm di tengah-tengah kedua kumparannya. Koil pick-up yang digunakan adalah koil dengan 850 lilitan dengan panjang 3 cm dan diameter 0.9 cm. Tegangan induksi yang dihasilkan ini diukur dengan menggunakan program lock-in amplifier yang telah dirancang secara digital menggunakan *DAQ Card (Data Acquisition)* tipe USB 9215A dengan bahasa pemrograman LabVIEW 8.5. Dari pengukuran dihasilkan data perubahan tegangan induksi koil pick-up sebelum dan sesudah diberikan sampel magnetik pada inti koil yang menunjukkan bahwa tegangan induksi setelah memakai sampel lebih besar dibanding dengan tanpa memakai sampel. Ini diakibatkan oleh efek magnetisasi dari bahan yang digunakan. Didapatkan hasil perhitungan suseptibilitas magnet sebesar 2.3 yang nilainya jauh dibandingkan literatur yang nilainya mencapai ribuan. Ini mungkin dikarenakan pengukuran yang dilakukan terjadi pada daerah di atas kurva histerisis dari sampel yang digunakan.

Kata kunci: koil *Helmholtz*, *lock-in amplifier*, tegangan induksi, koil *pick-up*, suseptibilitas magnet

Name : Fandi Akhmad  
Study Program : Physics  
Title : Design of Induction Voltage Device Measurement using Virtual  
Lock-in Amplifier as a Basic of AC Magnetic Susceptibility  
Measurement

### **ABSTRACT**

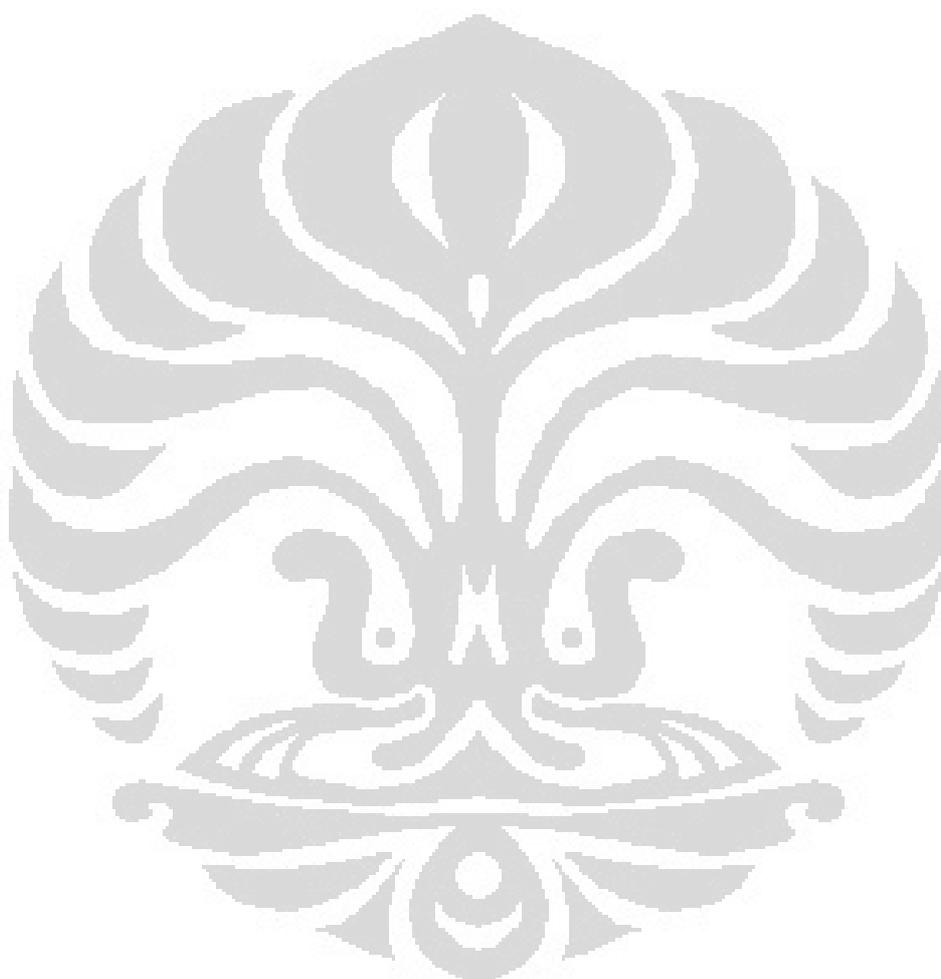
The research had been done to measure the value of induction voltage generated by the pick-up coil under the influence of uniform magnetic field. Uniform magnetic field source created by Helmholtz coils with 210 windings on each coil, and the effective radius of 5.14 cm. Variation of the magnetic field is obtained by giving the current variation, and from measurement obtained that Helmholtz coil have a uniform magnetic field with 6 cm length in the middle both its coils. Pick-up coil was used with a 850 coil windings with a length of 3 cm and a diameter of 0.9 cm. The resulting induced voltage is measured using lock-in amplifier programs that have been digitally designed using a DAQ Card (Data Acquisition) USB type 9215A with the programming language LabVIEW 8.5. From measurement produced data of induction voltage changed from pick-up before and after the given magnetic sample at the core of coil which shows that the induction voltage after applying samples is larger compared without sample. This is caused by the effects of magnetization of the materials used. Magnetic susceptibility is obtained by calculating with value of 2.3 in comparison with a value of literature in the thousands. This may be due to measurements carried out occurred in the area above the hysteresis curve of the sample used.

Keywords: Helmholtz Coil, lock-in amplifier, induction voltage, pick-up coil

## DAFTAR ISI

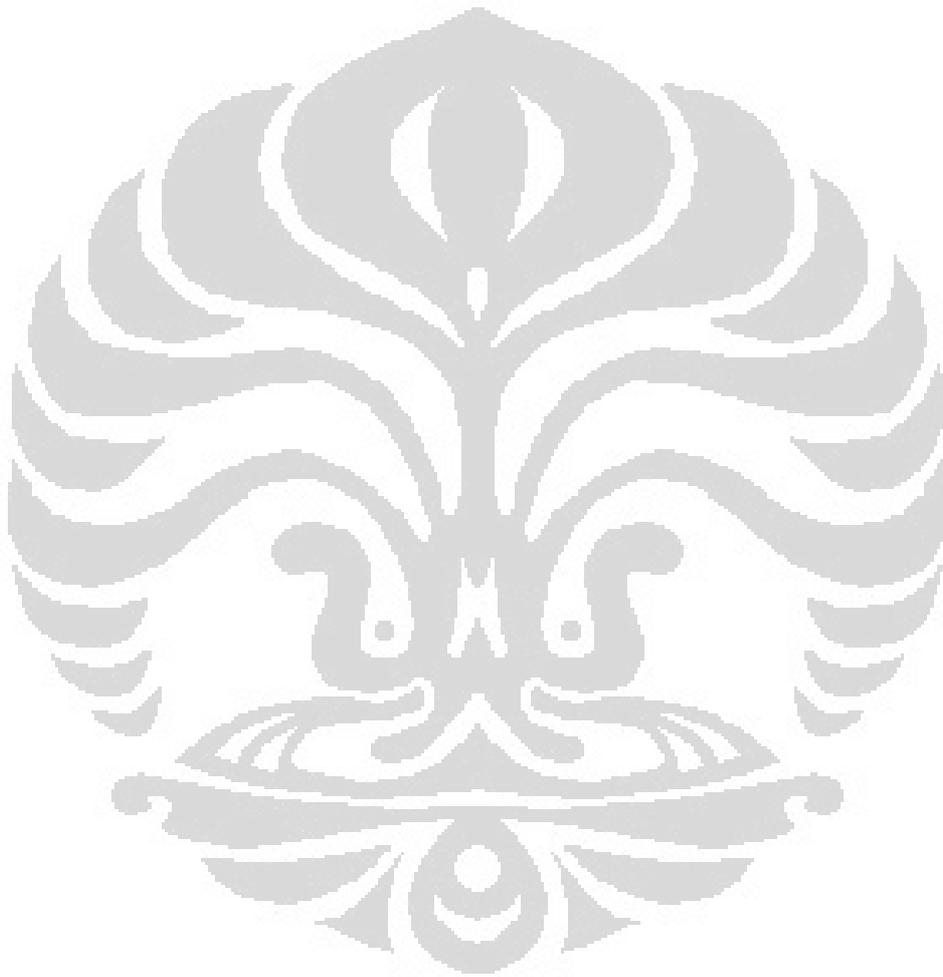
	Halaman
HALAMAN JUDUL .....	i
HALAMAN PERNYATAN ORISINALITAS .....	ii
HALAMAM PENGESAHAN .....	iii
KATA PENGANTAR .....	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH .....	vii
ABSTRAK .....	viii
ABSTRACT .....	ix
DAFTAR ISI .....	x
DAFTAR TABEL .....	xii
DAFTAR GAMBAR .....	xiii
<b>BAB 1 PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1. Latar Belakang Masalah .....	1
1.2. Pembatasan Masalah .....	2
1.3. Tujuan Penelitian.....	2
1.4. Metodologi Penelitian .....	2
1.5. Sistematika Penulisan.....	4
<b>BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA .....</b>	<b>6</b>
2.1. Material <i>Soft Magnetic</i> .....	6
2.2. Medan Magnet Di Sekitar Arus Listrik .....	6
2.3. Helmholtz Coil.....	7
2.4. Induksi Elektromagnet.....	9
2.5. Suseptibilitas Magnet .....	10
2.6. Bahan Magnetik .....	12
2.6.1 Diamagnetik .....	13
2.6.2 Paramagnetik.....	13
2.6.3 Feromagnetik .....	13
2.7. Efek Hall.....	14
2.8. Lock-in Amplifier .....	14
<b>BAB 3 PERANCANGAN ALAT .....</b>	<b>19</b>
3.1. Perangkat Keras .....	19
3.1.1. Generator Fungsi.....	20
3.1.2. Helmholtz Coil.....	20
3.1.3. Pick-up Coil .....	21
3.1.4. Sampel Magnetik .....	22
3.1.5. DAQ Card NI 9215-A .....	22
3.1.6. Teslameter dan Hall Probe.....	23
3.1.6.1. Teslameter Leybold Didactic 516 62.....	23
3.1.6.2. Axial B-Probe Leybold Didactic 516 61.....	24
3.2. Perangkat Lunak.....	24
3.2.1. LabVIEW 8.5.....	24
3.2.2. Perancangan program lock-in amplifier dengan LabVIEW ...	25
<b>BAB 4 PENGUJIAN DAN ANALISIS HASIL PENELITIAN .....</b>	<b>28</b>
4.1. Pengkalibrasian kumparan Helmholtz.....	28
4.1.1. Pengukuran medan magnet dengan Teslameter.....	28
4.1.2. Perhitungan medan magnet dengan Hukum Biot-Savart .....	31

4.2. Penentuan nilai suseptibilitas sampel magnetik.....	34
4.2.1. Pengukuran tegangan induksi koil pick-up dengan Lock-in Amplifier.....	34
4.2.2. Perhitungan nilai suseptibilitas magnet .....	37
<b>BAB 5 PENUTUP .....</b>	<b>41</b>
5.1 Kesimpulan .....	41
5.2 Saran.....	41
<b>DAFTAR ACUAN .....</b>	<b>42</b>
<b>LAMPIRAN .....</b>	<b>44</b>



## DAFTAR TABEL

	Halaman
Gambar 4.1 Tabel nilai $\varepsilon_s/\varepsilon_0$ untuk tiap frekuensi .....	37



## DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1.1 Skematik perancangan alat .....	3
Gambar 2.1 Komponen-komponen perhitungan pada kawat melingkar berarus..	8
Gambar 2.2 <i>Helmholtz coil</i> .....	9
Gambar 2.3 Sensor Efek Hall.....	14
Gambar 2.4 Lock-in Ampplifier dasar.....	15
Gambar 2.5 Diagram sistem lock in amplifier.....	16
Gambar 3.1 Diagram Alir Perancangan Sistem Pengukuran Tegangan Induksi	19
Gambar 3.2 Generator Fungsi TOE 7704.....	20
Gambar 3.3 Kumparan Helmholtz Leybold Didactic 558 825 .....	21
Gambar 3.4 Koil <i>Pick-up</i> .....	22
Gambar 3.5 NI DAQ USB 9215-A.....	23
Gambar 3.6 Tesla meter Leybold Didactic 516 62 dan Axial B-Probe Leybold Didactic 516 61 .....	24
Gambar 3.7 Front Panel program lock-in amplifier .....	25
Gambar 3.8 Block Diagram program multiplier pada program lock in amplifier .....	26
Gambar 3.9 Block Diagram program Filter dan Power Spectrum pada program lock in amplifier .....	27
Gambar 3.10 Block Diagram Power Spectrum output dan perata-rata pada program lock in amplifier .....	27
Gambar 4.1 Susunan alat untuk kalibrasi kumparan Helmholtz.....	29
Gambar 4.2 Grafik hubungan medan magnet (B) terhadap titik-titik sepanjang pusat Helmholtz coil (x) saat pengukuran dan perhitungan .....	29
Gambar 4.3 Penentuan posisi jarak $x = 0$ cm pada kumparan Helmholtz.....	30
Gambar 4.4 Arah medan magnet yang disebabkan oleh arus listrik pada kumparan Helmholtz .....	31
Gambar 4.5 Gambar penentuan jari-jari efektif kumparan Helmholtz.....	32
Gambar 4.6 Bentuk sinyal tegangan induksi koil pick-up.....	34
Gambar 4.7 Grafik hubungan antara tegangan induksi koil pick-up (V Induksi) dengan tegangan Helmholtz (V Helmholtz) .....	35
Gambar 4.8 Grafik hubungan antara tegangan induksi koil pick-up (V Induksi) dengan arus yang mengalir pada kumparan Helmholtz (I).....	37
Gambar 4.9 Grafik hubungan antara tegangan induksi koil pick-up dengan sampel terhadap tegangan induksi koil pick-up tanpa sampel.....	38
Gambar 4.10 Kurva histeresis dan kemungkinan daerah pengukuran .....	39

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Saat ini, khususnya di Indonesia masih sangat sedikit alat yang dapat mengukur bahan sifat magnet yang rendah (*soft magnetic*), dikarenakan harganya yang cukup mahal. Sebagai perbandingan, harga sebuah instrumen yang dapat mengukur medan magnet bahan *soft magnetic* di luar negeri dapat mencapai lebih puluhan ribu USD. Selain itu kendala yang sering dihadapi dalam pengukuran bahan *soft magnetic* adalah nilai medan magnet yang rendah ( $<125\text{A/m}$ )[1] sehingga seringkali banyak terdapat *noise* pada sinyal yang diterima oleh alat pengukur medan magnet tersebut.

Banyak faktor yang menyebabkan pengukuran tegangan rendah sangat sulit dilakukan, misalnya, adalah *common mode error*, tegangan termoelektrik, dan tegangan *offset internal* dapat menyebabkan sinyal *offset* dan *drift*. Faktor-faktor tersebut akan menambah atau mengurangi besar sinyal yang diukur, dan juga sinyal *offset* ini akan berubah terhadap waktu dan temperatur[2]. Masalah ini dapat dikurangi tapi tidak bisa dihilangkan. Salah satu metode yang dapat diaplikasikan untuk merecover sinyal asli dari *noise* yang ada adalah menggunakan *lock-in amplifier*.

Namun alat *lock-in amplifier* analog yang beredar dipasaran harganya dapat mencapai US\$5.000. Oleh karena itulah, dalam penelitian ini penulis akan menerapkan prinsip dan aplikasi dari *virtual multi-channel lock-in amplifier* yang sederhana namun tetap efektif untuk me-recover sinyal AC lemah dari *noise* dengan hasil kepresisian yang cukup tinggi[3,4]. Dasar dari metode ini adalah penggunaan DAQ (*data acquisition*) untuk mengkalkulasi *cross-correlation function*. Dengan metode ini, dapat dibuat sebuah sistem pengukuran magnetoelektrik yang dapat bekerja dengan akurat dan presisi tanpa menggunakan analog *lock-in amplifier*. Jadi, dengan menerapkan metode ini, pengeluaran untuk merancang alat pengukur bahan *soft magnetic* dengan biaya  $< 10\%$  dari total biaya yang harus dikeluarkan.

Untuk perancangan sistem digunakan implementasi dengan *PC-Based digital Lock-In Analyzer (LIA)* dengan menggunakan *software LabVIEW 8.5* berbasis DAQ NI 9215-A yang dapat diaplikasikan untuk menghitung tegangan induksi dari suatu kumparan "*pick-up coil*" yang telah mendapat pengaruh medan magnet dari kumparan Helmholtz. Sehingga dapat diimplementasikan PC berdasar *Lock-in digital* secara menyeluruh pada *software*-nya.

### **1.2. Pembatasan Penelitian**

Dalam penelitian ini, sebagai batasan masalah adalah berfungsinya DAQ NI 9215-A sebagai *Lock-in Amplifier* pada sistem pemantauan yang memiliki frekuensi sinyal sesuai dengan sinyal referensi. Sinyal yang akan diperhitungkan berasal dari tegangan induksi dari "*pick-up coil*" yang telah mendapat pengaruh medan magnet kumparan Helmholtz. Hasil ini kemudian diimplementasikan pada suatu program dengan menggunakan LabVIEW 8.5 yang kemudian disebut dengan Program *Lock-in Amplifier* untuk menghasilkan perhitungan suseptibilitas magnet AC.

### **1.3. Tujuan Penelitian**

Tujuan penelitian ini adalah :

1. Memahami, mengetahui, mempelajari cara kerja dari program *Lock-in amplifier* dengan menggunakan DAQ NI 9215-A
2. Mempelajari sistem pendeteksian suatu sinyal kecil yang dapat dilakukan dengan menggunakan *Lock-in amplifier*
3. Mengimplementasikan program *Lock-in amplifier* sehingga dapat menentukan besar suseptibilitas magnet AC dari tegangan induksi yang diukur.

### **1.4. Metodologi Penelitian**

Metode penelitian yang dilakukan terdiri atas tiga tahap utama, antara lain:

1. Studi Peralatan

Studi Peralatan digunakan penulis untuk mempelajari karakteristik dan spesifikasi alat yang akan digunakan dalam pembuatan *Lock-in amplifier* dan pendistribusiannya sehingga penulis mendapatkan pembelajaran yang tepat

tentang alat yang akan dipakai tersebut dan diperoleh teori-teori dasar sebagai sumber penulisan skripsi

## 2. Studi Literatur

Studi kepustakaan dilakukan untuk memperoleh informasi dan pustaka yang berkaitan dengan masalah ini diperoleh dari literatur, penjelasan yang diberikan dosen pembimbing, rekan-rekan mahasiswa, internet dan buku-buku yang berkaitan dengan penelitian

## 3. Penelitian Laboratorium

Penelitian laboratorium dilakukan untuk merakit, membuat alat dan meneliti kerja alat yang telah dirancang dengan aplikasi program yang telah didesain

Penelitian yang dilakukan memiliki tahap-tahap pelaksanaan, pembuatan, dan penganalisaan, antara lain meliputi:

### 1. Diskusi

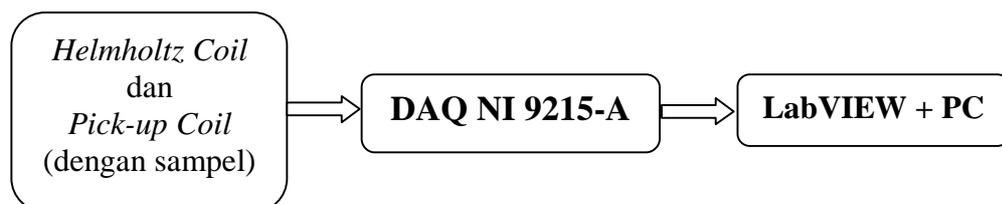
Diskusi yang dilakukan adalah diskusi dengan seluruh pembimbing penelitian, serta mahasiswa dan alumni yang kompeten dibidang tertentu yang berkaitan dengan penelitian sehingga dapat terpecahkan masalah saat berlangsungnya penelitian dan pembuatan program

### 2. Studi Literatur

Untuk memperoleh data mengenai cara kerja alat dan spesifikasi alat yang digunakan beserta landasan teori dalam penelitian. Sumber media yang mendukung adalah buku-buku acuan, jurnal-jurnal, artikel-artikel, serta informasi yang diperoleh dari internet

### 3. Perancangan Alat

Perancangan alat pada penelitian ini terdiri dari pick-up coil dengan sampel dan *Helmholtz Coil*, DAQ NI 9215-A, dan sebuah PC. Adapun *software* yang digunakan adalah LabVIEW 8.5. Perancangan alat disusun sebagai berikut:



**Gambar 1.1.** Skematik perancangan alat

#### 4. Pembuatan Alat

Alat yang akan digunakan pada saat penelitian dibuat dan disiapkan berdasarkan perancangan yang telah diperoleh pada tahap sebelumnya.

#### 5. Pembuatan Sistem Pemrograman

Sistem pemrograman dibuat untuk memonitor data secara *real-time* yaitu menampilkan data setiap saat dengan menggunakan LabVIEW versi 8.5 dari National Instruments. Pembacaan sinyal ke data base komputer dihubungkan melalui DAQ NI 9215-A

#### 6. Pengujian Sistem

Pengujian sistem dilakukan dengan tujuan untuk memastikan bahwa alat yang dipakai pada saat penelitian dapat berkerja dengan baik sesuai dengan fungsinya sehingga tidak menimbulkan permasalahan pada saat dilakukan pengambilan data.

#### 7. Pengambilan Data

Pengambilan data dilakukan setelah semua alat pada sistem *monitoring* teruji dengan baik sehingga data yang diperoleh adalah data yang *valid*. Dengan demikian dapat memperkecil kemungkinan terjadinya kesalahan.

#### 8. Pembuatan laporan akhir

Laporan akhir yang dibuat berdasarkan pada hasil monitoring yang dapat ditampilkan oleh program *Lock-in amplifier*

#### 9. Kesimpulan

Kesimpulan secara keseluruhan yang merupakan tahap akhir dari penelitian ini diambil setelah pembuatan laporan akhir selesai beserta hasil analisa mengenai semua proses yang telah dilakukan selama penelitian berlangsung.

### 1.5. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan skripsi terdiri atas lima bab yang secara garis besar dapat diuraikan sebagai berikut:

#### 1. Bab 1 Pendahuluan

Bab ini membahas tentang latar belakang dari penelitian, tujuan, metode yang digunakan, dan juga pembatasan masalah pada penelitian yang dilakukan.

2. Bab 2 Tinjauan Pustaka

Bab ini membahas secara garis besar teori dasar yang berhubungan dengan penelitian.

3. Bab 3 Perancangan Sistem

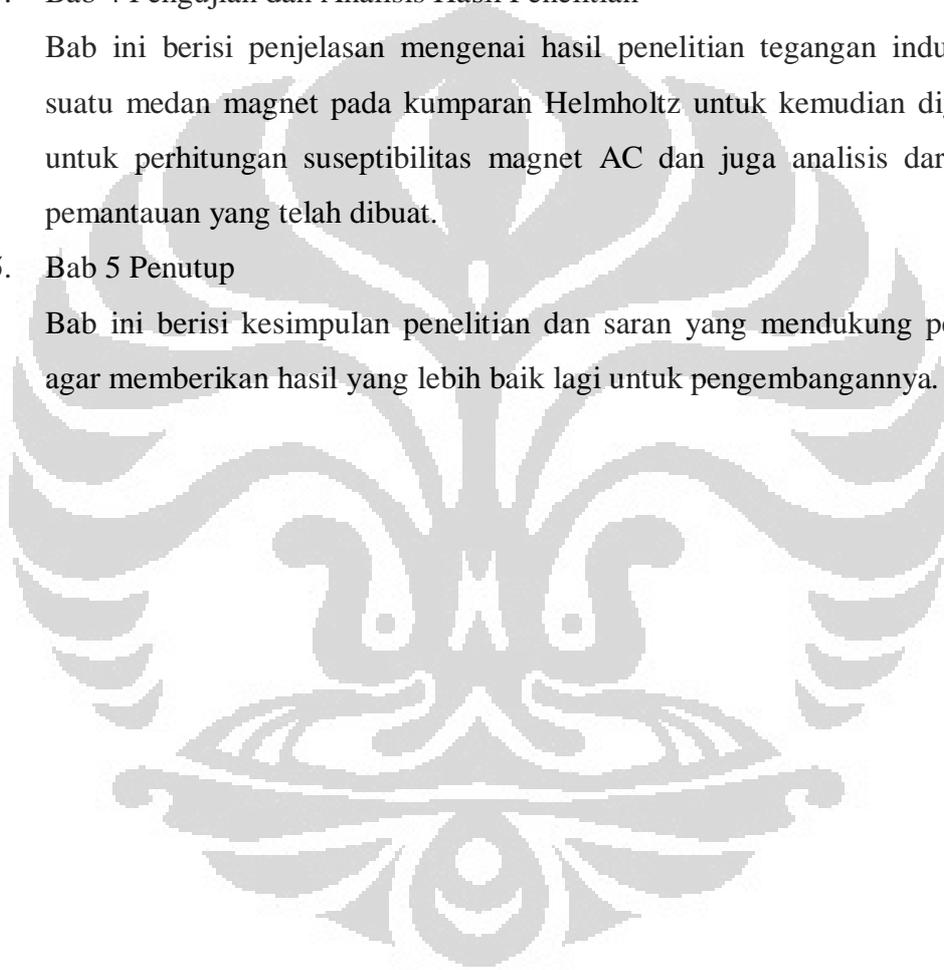
Bab ini membahas penggunaan perangkat lunak dan perangkat keras yang mendukung aplikasi LabVIEW pada sistem pemantauan tegangan induksi dengan menggunakan *Lock-in amplifier* berbasis DAQ NI 9215-A.

4. Bab 4 Pengujian dan Analisis Hasil Penelitian

Bab ini berisi penjelasan mengenai hasil penelitian tegangan induksi dari suatu medan magnet pada kumparan Helmholtz untuk kemudian digunakan untuk perhitungan susceptibilitas magnet AC dan juga analisis dari sistem pemantauan yang telah dibuat.

5. Bab 5 Penutup

Bab ini berisi kesimpulan penelitian dan saran yang mendukung penelitian agar memberikan hasil yang lebih baik lagi untuk pengembangannya.



## BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1. *Material Soft Magnetic*

Pengukuran dari nilai awal permeabilitas ac kompleks, kurva magnetisasi (medan magnet induksi (B) vs. medan magnet yang diberikan (H)) dan error dari permeabilitas awal pada medan magnet rendah ( $H < 125$  A/m), merupakan faktor yang sangat penting untuk mengkarakterisasi material *soft magnetic*.

Material *soft magnetic* adalah partikel serbuk besi yang dipisahkan dengan lapisan terisolasi listrik. Material ini secara umum terdiri dari partikel besi yang didistribusikan pada material organik dalam bentuk matriks. Material *soft magnetic* kini dikembangkan untuk menghasilkan solusi alternatif dengan sifat magnetik yang bersaing, yaitu, permeabilitas relatif yang bagus dan saturasi magnetic, tetapi dengan resistansi listrik yang tinggi, selain itu material ini juga punya kemampuan untuk memusatkan dan membentuk fluks magnet dengan efisiensi yang baik. Material ini diaplikasikan sebagai mesin rotor, transformer, filter listrik, sensor[1,5].

### 2.2. Medan Magnet Di Sekitar Arus Listrik

Medan magnet tidak hanya dapat dihasilkan oleh sebuah magnet, namun medan magnet juga dapat dihasilkan oleh arus yang mengalir dalam sebuah kawat penghantar, namun hanya bersifat sementara. Pada tahun 1820, Hans Christian Oersted (1777-1851) menemukan bahwa arus yang mengalir pada sebuah kawat penghantar dapat juga menghasilkan efek-efek magnetik, yaitu arus tersebut dapat mengubah orientasi sebuah jarum kompas.

Garis-garis gaya magnet yang dihasilkan oleh kawat berarus mempunyai arah melingkar mengelilingi kawat berarus tersebut. Arah garis gaya magnet ini lebih dikenal dengan kaidah tangan kanan. Bila kita menggenggam kawat dengan tangan kanan sedemikian sehingga ibu jari menunjukkan arah arus, maka lipatan ke empat jari lainnya menyatakan arah putaran garis-garis gaya magnet[6,7].

### 2.3. Helmholtz Coil

Kumparan Helmholtz adalah suatu devais yang menghasilkan daerah dengan medan magnet yang hampir seragam. Nama Helmholtz digunakan untuk menghormati seorang fisikawan Jerman yang bernama Hermann von Helmholtz. Kumparan Helmholtz terdiri dari dua kumparan magnetik melingkar yang identik, yaitu memiliki diameter kawat yang sama, jumlah lilitan yang sama, ukuran dan bentuk kumparan yang sama. Kedua kumparan ditempatkan secara parallel dan simetris, serta dipisahkan sejauh jari-jari kumparan tersebut. Kedua kumparan tersebut dihubungkan secara seri dan arus yang mengalir dibuat searah, sehingga menghasilkan medan magnet yang sama[8].

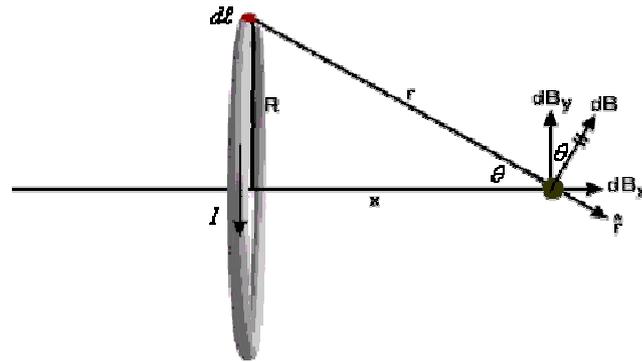
Besarnya medan magnet yang dihasilkan oleh Helmholtz bergantung dengan arus listrik ( $I$ ) yang diberikan, jumlah lilitan ( $N$ ), jari-jari kumparan ( $R$ ), serta tergantung posisinya terhadap Helmholtz tersebut. Besar medan magnet di setiap titik sepanjang sumbu  $x$  di titik tengah kumparan dapat dijelaskan dengan mengkombinasikan dua penyelesaian Hukum Biot Savart untuk kawat melingkar dengan yang berupa lilitan.

Untuk besar medan magnet yang terjadi di sepanjang pusat kawat melingkar yang mengalirkan arus dapat dilihat dari penurunan persamaan Hukum Biot Savart. Gambar distribusi medan magnet dapat dilihat dari Gambar 2.1. Segmen arus  $Idl$  tegak lurus terhadap vektor jari-jari kawat  $r$ . dari persamaan awal Hukum Biot Savart didapat :

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Idl \times \hat{r}}{r^2} \quad (2.1)$$

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Idl \sin 90^\circ}{r^2} \quad (2.2)$$

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Idl}{r^2} \quad (2.3)$$



**Gambar 2.1.** Komponen-komponen perhitungan pada kawat melingkar berarus

Pada Gambar 2.1 terlihat komponen yang tegak lurus terhadap sumbu kawat melingkar adalah  $dB_y$ , komponen y ini akan saling menghilangkan sehingga hanya fokus pada komponen x saja, dimana :

$$dB_x = dB \sin \theta \quad (2.4)$$

$$dB_x = \frac{\mu_0 I dl}{4\pi r^2} \sin \theta \quad (2.5)$$

$$dB_x = \frac{\mu_0 I R}{4\pi r^2} dl \quad (2.6)$$

$$dB_x = \frac{\mu_0 IR}{4\pi r^3} dl \quad (2.7)$$

Dari teorema Pythagoras, diketahui

$$r = \sqrt{x^2 + R^2} \quad (2.8)$$

Didapat

$$dB_x = \frac{\mu_0 IR}{4\pi (\sqrt{x^2 + R^2})^3} dl \quad (2.9)$$

$$B_x = \oint dB_x \quad (2.10)$$

$$B_x = \oint \frac{\mu_0 IR}{4\pi (\sqrt{x^2 + R^2})^3} dl \quad (2.11)$$

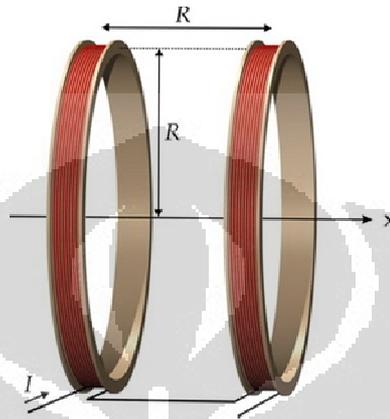
$$B_x = \frac{\mu_0 IR}{4\pi (\sqrt{x^2 + R^2})^3} \oint dl \quad (2.12)$$

$$B_x = \frac{\mu_0 IR}{4\pi (\sqrt{x^2 + R^2})^3} 2\pi R \quad (2.13)$$

$$B_x = \frac{\mu_0 IR^2}{2(\sqrt{x^2 + R^2})^3} \quad [9] \quad (2.14)$$

Bila kawat lingkaran tersebut berupa kumparan dengan  $N$  buah lilitan, maka induksi magnet di pusat kawat lingkaran sepanjang sumbu horizontal didapat:

$$B_x = \frac{N\mu_0 IR^2}{2(\sqrt{x^2 + R^2})^3} \quad (2.15)$$



Gambar 2.2. Helmholtz coil

$$B = B_1 + B_2 \quad (2.16)$$

$$B = \frac{N\mu_0 IR^2}{2} \left[ \frac{1}{(x^2 + R^2)^{3/2}} + \frac{1}{[(R-x)^2 + R^2]^{3/2}} \right] \quad (2.17)$$

$$B = \frac{N\mu_0 IR^2}{2} \left[ \frac{1}{(x^2 + R^2)^{3/2}} + \frac{1}{(2R^2 + x^2 - 2xR)^{3/2}} \right] \quad (2.18)$$

#### 2.4. Induksi Elektromagnet

Telah kita ketahui bahwa arus listrik dapat menghasilkan medan magnetik. Begitu juga sebaliknya, medan magnet dapat menghasilkan arus listrik. Michael Faraday (1791-1867), seorang ilmuwan jenius dari Inggris akhirnya berhasil membuktikan bahwa arus listrik memang dapat dihasilkan dari perubahan medan magnetik. Peristiwa dihasilkannya arus listrik akibat adanya perubahan medan magnetik dinamakan induksi elektromagnetik. Arus yang muncul dari induksi ini disebut arus induksi, yang dihasilkan oleh sebuah tegangan yang dinamakan *electromotive force (emf)*, atau yg lebih dikenal dengan Gaya Gerak Listrik (GGL).

Faraday menyimpulkan bahwa GGL akan terinduksi di dalam sebuah konduktor bila terjadi perubahan medan magnet yang mengelilinginya, dan besarnya GGL sebanding dengan perubahan medan magnet tersebut. Kesimpulan ini lebih dikenal dengan nama Hukum Faraday[10].

GGL induksi ( $\varepsilon$ ) di dalam rangkaian adalah sama dengan kecepatan perubahan fluks ( $\phi_m$ ) terhadap waktu, dan tanda negatif menyatakan arah GGL induksi yang berlawanan dengan arah penyebabnya.

$$\varepsilon = -\frac{d\phi_m}{dt} \quad (2.19)$$

Jika persamaan di atas digunakan pada sebuah kumparan yang terdiri dari  $N$  lilitan, maka sebuah GGL muncul di dalam setiap lilitan dan semua GGL ini harus dijumlahkan. Jika kumparan itu dililit begitu eratnya sehingga setiap lilitan dapat dikatakan menempati daerah yang sama dari suatu ruang, maka fluks yang melalui setiap lilitan akan sama besarnya. Maka GGL-nya menjadi:

$$\varepsilon = -N \frac{d\phi_m}{dt} \quad [11] \quad (2.20)$$

## 2.5. Suseptibilitas Magnet

Suseptibilitas diambil dalam bahasa latin *susceptibilis* yang artinya “menerima”. Suseptibilitas magnet adalah derajat dari suatu material dapat dimagnetisasi oleh medan magnet luar. Suseptibilitas magnet suatu material biasanya disimbolkan oleh  $\chi_m$ , besarnya sama dengan rasio antara magnetisasi  $M$  (A/m), dengan kuat medan magnet yang diberikan  $H$  (A/m), seperti terlihat di bawah ini.

$$\chi_m = \frac{M}{H} \quad (2.21)$$

Magnetisasi adalah total momen magnetik dalam volume tertentu, ini terjadi jika ada suatu material magnetik yang berada dibawah pengaruh medan magnet. Jika nilai suseptibilitas magnet positif, maka material tersebut adalah material paramagnetik, dan apabila negatif maka material tersebut adalah material diamagnetik. Namun untuk kedua bahan tersebut, nilainya suseptibilitasnya sangat kecil, sedangkan untuk material feromagnetik mempunyai nilai suseptibilitas magnet yang sangat besar dan bernilai positif.

Hubungan yang linier antara  $M$  dan  $H$  juga menyatakan hubungan linier antara  $B$  dan  $H$  dimana  $B$  adalah induksi magnet, dapat ditulis :

$$B = \mu_0 (H + M) \quad (2.22)$$

$$B = \mu H \quad (2.23)$$

dimana

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (2.24)$$

$$\mu = \mu_0 (1 + \chi_m) \quad (2.25)$$

$\mu$  adalah permeabilitas dari material,  $\mu_0$  adalah permeabilitas di ruang hampa, dan  $\mu_r$  adalah permeabilitas relatif. Permeabilitas adalah ukuran kemampuan suatu material untuk dapat dilewati oleh medan magnet.

Untuk penentuan nilai suseptibilitas magnet dari suatu sampel magnetik dapat dilakukan perhitungan berdasarkan nilai tegangan induksi koil *pick-up* yang terukur, yakni perbandingan tegangan induksi tanpa sampel dan ketika diberi sampel magnetik pada inti koil *pick-up* tersebut.

Berdasarkan Persamaan 2.22 dinyatakan bahwa kuat medan magnet  $B$  dipengaruhi oleh medan magnet luar  $H$  dan magnetisasi bahan  $M$ . Saat pengukuran tegangan induksi tanpa sampel, efek magnetisasi tidak ada sehingga Persamaan 2.22 menjadi :

$$B_0 = \mu_0 H \quad (2.26)$$

Dimana  $B_0$  adalah medan magnet tanpa sampel, dan  $H$  adalah medan magnet luar, dalam penelitian ini yaitu medan magnet Helmholtz[12].

Persamaan 2.22 dapat dimodifikasi menjadi :

$$B_s = \mu_0 H \left( 1 + \frac{M}{H} \right) \quad (2.27)$$

$$B_s = \mu_0 H (1 + \chi_m) \quad (2.28)$$

$$B_s = B_0 (1 + \chi_m) \quad (2.29)$$

$$\frac{B_s}{B_0} = (1 + \chi_m) \quad (2.30)$$

Dimana  $B_s$  adalah medan magnet dengan sampel, dan  $\chi_m$  adalah suseptibilitas magnet.

Kemudian untuk tegangan induksinya menggunakan Persamaan 2.20 dengan perubahan fluks  $d\phi_m = AdB$ , dikarenakan yang berubah adalah medan magnetnya, sedangkan luas penampang  $A$  tetap, sehingga persamaannya menjadi :

$$\varepsilon = -NA \frac{dB}{dt} \quad (2.31)$$

Dibuatlah perbandingan tegangan induksi dengan memisalkan  $\varepsilon_s$  adalah tegangan induksi dengan sampel dan  $\varepsilon_0$  adalah tegangan induksi tanpa sampel, dan didapat:

$$\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_0} = \frac{-NA \frac{dB_s}{dt}}{-NA \frac{dB_0}{dt}} \quad (2.32)$$

Karena koil *pick-up* yang digunakan sama maka jumlah lilitan  $N$  dan luas penampang  $A$  dapat diabaikan, sehingga persamaannya menjadi :

$$\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_0} = \frac{\frac{dB_s}{dt}}{\frac{dB_0}{dt}} \quad (2.33)$$

$$\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_0} = \frac{dB_s}{dB_0} \approx \frac{B_s}{B_0} \quad (2.34)$$

$$\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_0} = 1 + \chi_m \quad (2.35)$$

$$\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_0} = \mu_r \quad (2.36)$$

Dari Persamaan 2.36 diketahui bahwa perbandingan antara tegangan induksi dengan sampel dan tegangan induksi tanpa sampel sebanding dengan permeabilitas relatif  $\mu_r$  dari sampel yang digunakan. Karena sampel yang digunakan adalah bahan feromagnetik, maka nilai permeabilitas dari bahan tersebut sangat besar sehingga  $\mu_r \approx \chi_m$ .

## 2.6. Bahan Magnetik

Setiap atom dalam suatu bahan material mengandung banyak komponen momen magnetik yang berbeda-beda, dan kombinasinya menentukan karakteristik magnetik bahan tersebut.

### 2.6.1. Diamagnetik

Diamagnetisme adalah sifat dasar dari semua material. Ketika medan magnet eksternal diberikan ke material diamagnetik, momen magnet lemah diinduksikan ke arah yang berlawanan dengan medan magnet yang diberikan. Ini menyebabkan material diamagnetik ditolak oleh magnet. Bahan diamagnetik dengan mudah ditolak oleh medan magnet dan bahan ini tidak memiliki sifat magnet ketika medan magnet eksternalnya dihilangkan. Pada bahan diamagnetik, semua elektronnya berpasangan, sehingga tidak terdapat momen magnet permanen pada setiap atom. Nilai suseptibilitas material diamagnetik bernilai negatif.

### 2.6.2. Paramagnetik

Paramagnetisme adalah suatu bentuk magnetisme yang hanya terjadi karena adanya medan magnet eksternal. Material paramagnetik mempunyai nilai suseptibilitas magnet yang kecil tapi bernilai positif ( $0 < \chi \ll 1$ ) karena disebabkan adanya atom-atom yang mempunyai momen magnet permanen. Momen magnet ini berinteraksi cukup lemah satu sama lain dan arahnya yang acak bila tidak dipengaruhi oleh medan magnet eksternal. Ketika material paramagnetik diletakkan pada medan magnet eksternal, momen magnetiknya cenderung searah dengan medan magnet. Tidak seperti ferromagnet yang juga tertarik oleh medan magnet, material paramagnetik tidak mempertahankan sifat kemagnetannya dalam waktu lama sewaktu medan magnet eksternal tidak lagi diberikan.

### 2.6.3. Ferromagnetik

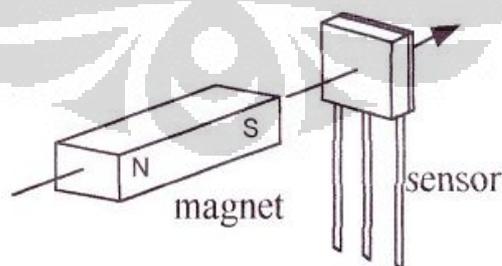
Pada material ferromagnetik, dalam selang temperature tertentu, terdapat momen magnet yang tersusun sejajar sehingga magnetisasi tetap ada walaupun setelah medan magnet eksternal dihilangkan. Di bawah temperature tertentu, yang disebut temperatur Curie, medan magnet yang semakin besar yang diberikan pada suatu bahan ferromagnetik akan meningkatkan magnetisasi hingga suatu nilai yang tinggi, yang disebut magnetisasi jenuh. Hal ini terjadi karena material ferromagnetik terdiri dari daerah-daerah kecil yang termagnetisasi, yang disebut domain. Pada medan yang sangat kuat, seluruh domain disejajarkan searah dengan

medan dan akan menghasilkan magnetisasi yang tinggi. Besi, Nikel, dan Kobalt, merupakan material feromagnetik[5].

## 2.7. Efek Hall

Pada kawat yang sedang menyalurkan arus terdapat gaya yang dikerahkan oleh suatu medan magnetik. Gaya tersebut dipindah ke dalam kawat oleh gaya yang mengikat elektron pada kawat di permukaannya. Dikarenakan pembawa muatannya mengalami gaya magnetik ketika kawat yang sedang mengalirkan arus itu berada dalam medan magnetik luar, pembawa muatan tersebut dipercepat ke arah salah satu dari sisi kawat. Ini akan menimbulkan pemisahan muatan dalam kawat yang disebut sebagai Efek Hall. Efek Hall terjadi ketika ada suatu konduktor pembawa arus yang tertahan pada suatu medan magnet, medan tersebut akan memberikan adanya gaya menyamping pada muatan-muatan yang mengalir pada konduktor tersebut. Fenomena dari Efek Hall ini memungkinkan juga memberikan suatu metode yang mudah untuk mengukur besar kuat medan magnetik.

Semua peralatan Efek Hall diaktifkan oleh adanya medan magnet, seperti halnya Teslameter yang digunakan untuk mengukur medan magnet Helmholtz. Medan magnet mempunyai dua karakteristik yang penting, densitas-flux dan polaritas. Kebanyakan dari saklar digital Efek Hall dirancang akan mati jika tidak ada medan magnet (rangkaiannya terbuka pada keluaran). Saklar akan aktif jika hanya dikenai medan magnet yang memiliki densitas yang cukup dan arah yang tepat[13]. Skema sensor Efek Hall dapat dilihat pada Gambar 2.3.



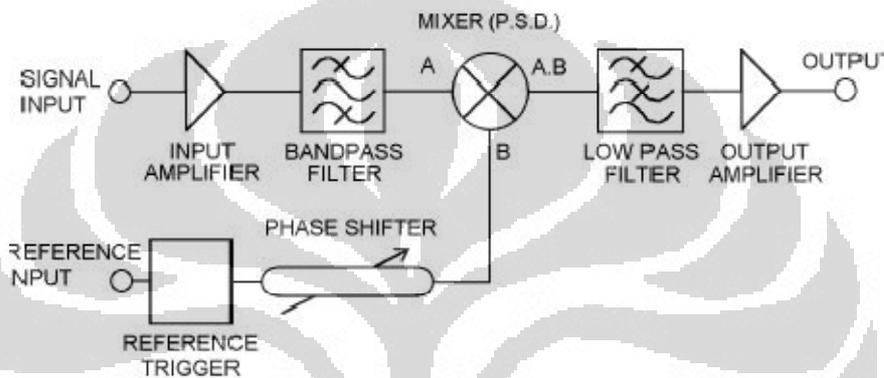
**Gambar 2.3.** Sensor Efek Hall

## 2.8. Lock-in amplifier

Masalah sinyal kecil saat ini sudah dapat dipecahkan dengan menggunakan *Lock-in amplifier*. *Lock-in amplifier* digunakan untuk mendeteksi

dan mengukur sinyal AC yang sangat kecil, bahkan sampai beberapa nanovolt. Pengukuran akurat kemungkinan dapat dilakukan sekalipun besar *noise* ribuan kali lebih besar dari sinyal tersebut.

*Lock-in amplifier* menggunakan teknik yang dikenal dengan *Phase-Sensitive Detection* (PSD). Secara sederhana, PSD mengarah pada demodulasi atau penyearahan sinyal AC yang dikontrol oleh bentuk sinyal gelombang referensi. PSD efektif merespon sinyal yang koheren (frekuensi dan fase sama) dengan gelombang referensi dan akan menolak yang lainnya.



**Gambar 2.4.** *Lock-in Amplifier* dasar

Pada bagian *signal input*, termasuk sinyal *noise*-nya dikuatkan dengan penguatan yang sama sehingga noisennya ikut dikuatkan juga. Pada bagian *reference input*, diberikan tegangan referensi yang memiliki frekuensi dan fase yang sama dengan sinyal input yang akan diukur. Kedua sinyal ini diolah pada PSD dengan melakukan perkalian sinyal agar didapatkan dua komponen sinyal yang masing-masing diperoleh komponen DC dan komponen AC. Output dari PSD masuk ke *Low Pass Filter* untuk menghilangkan komponen AC dari tegangan DC yang diinginkan.

*Lock-in amplifier* dapat bekerja apabila *software* berbasis *lock-in* terdiri atas beberapa bagian yang dapat dijelaskan menjadi empat tingkatan utama, yaitu:

- **Tingkat Penguatan Input (*Pre-amplifier*)**

Tujuan dari *pre-amplifier* adalah menguatkan sinyal kecil yang masuk agar sinyal tersebut sesuai dengan *multiplier*. Bergantung pada tipe inputnya, maka tipe *differential* digunakan pada *pre-amplifier* ini. Pada penelitian ini digunakan perhitungan input *differential*, hal ini bertujuan agar tidak mendapat

pengaruh *noise* pada jalur *ground*-nya. Sehingga input *RSE* (*Reference Single Ended*) tidak dianjurkan untuk digunakan.

- **Tingkat Referensi (Reference circuit stage)**

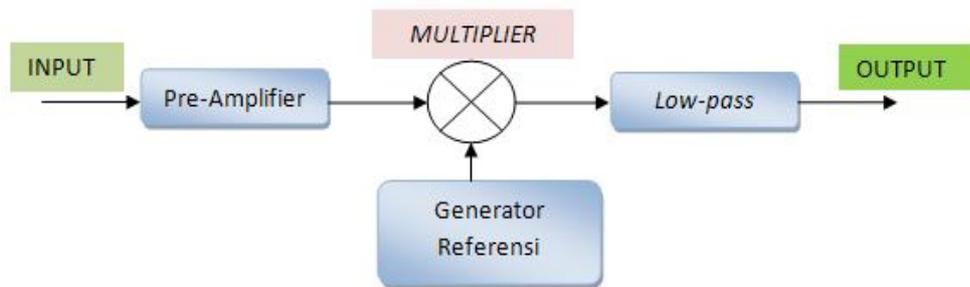
Penentuan sinyal referensi, dengan menggunakan generator fungsi yang dapat disesuaikan komponen-komponen sinyalnya. Hal ini penting untuk perhitungan Perbedaan Fase (*Phase Shift  $\Delta\theta$* ) antara fase sinyal inputnya dengan fase sinyal referensi yang dimultiplikasi dengan persamaan sinyal *cosinus*. Apabila terdeteksi fase outputnya  $90^\circ$  maka tidak akan diperoleh sinyal outputnya.

- **Tingkat *Multiplier***

Bagian terpenting dari *Lock-in* adalah *multiplier* yang mengalikan sinyal input dan sinyal referensi secara bersamaan. Saat sinyal tersebut dikalikan, akan diperoleh penjumlahan dan perbedaan frekuensi sebagai hasilnya. Apabila dipilih sinyal dan referensi pada frekuensi yang sama, maka perbedaan frekuensi menjadi nol (0), sehingga diperoleh tegangan *output* pada level DC yang *proporsional* pada amplitudo inputnya. Dengan menentukan fase sinyal input yang sama sinyal referensi, maka perbedaan fase antara keduanya adalah nol (0).

- **Tingkat Low pass filter (*Low pass filter stage*)**

Cara sederhana untuk mendeteksi sinyal pada frekuensi spesifik adalah dengan menggunakan filter frekuensi. Filter frekuensi untuk sinyal elektronik dapat dengan mudah dibuat dengan komponen elektronik sederhana, seperti resistor dan kapasitor. Pada penelitian ini, digunakan filter *low-pass* yang merupakan VI bawaan program LabVIEW. Seperti namanya, *low-pass* filter melewatkan sinyal pada frekuensi dibawah frekuensi *cut-off*. Frekuensi *cut-off* dari filter haruslah lebih kecil dari pada frekuensi operasi *lock-in amplifier*. Dengan level DC (yang sesuai dengan sinyal input), akan diperoleh kembali sinyal yang berasal dari *multiplier* kemudian dilewatkan kepada *low-pass* filter dengan *noise* yang sudah dihilangkan[3,4].



**Gambar 2.5.** Diagram sistem lock in amplifier

*Lock-in amplifier* digunakan untuk mendeteksi dan menghitung sinyal AC yang sangat kecil – bahkan sampai lebih kecil dari nanovolt. Sebagai contoh, apabila terdapat sebuah sinyal *sinus* 10 nV pada 10 kHz, maka sebuah amplifier yang baik, memiliki *noise* yang kecil dengan nilai  $5 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$  dari *noise* input. Apabila memiliki *bandwidth* 100 kHz dan gain 1000, maka akan didapatkan output 10  $\mu\text{V}$ . Sedangkan sebuah alat akan digunakan untuk mendeteksi sinyal yang kecil hingga *bandwidth* 0.01 Hz, maka digunakanlah *Lock-in amplifier*[14]. *Lock-in* detektor mengambil sinyal referensi dan sinyal input kemudian menggunakan *multiplier* untuk mengekstrak sinyal *output* yang hanya memiliki frekuensi dan fase yang sama dengan referensi. Output *multiplier* memiliki 2 sinyal *output* AC:

- Perbedaan frekuensi ( $\omega_{\text{ref}} - \omega_{\text{in}}$ )
- Penjumlahan frekuensi ( $\omega_{\text{ref}} + \omega_{\text{in}}$ )

Apabila sinyal output dilewatkan pada Filter *Low-Pass*, maka sinyal AC akan dihilangkan. Sehingga, apabila ditentukan nilai  $\omega_{\text{ref}} = \omega_{\text{in}}$ , maka perbedaan frekuensi menjadi sinyal pada level DC (*Zero Frequency*). Misalkan saja, sebuah sinyal dengan frekuensi referensi,  $S_{\text{ref}}$ :

$$S_{\text{ref}} = A_{\text{ref}} \cos(\omega_{\text{ref}} \cdot t) \quad (2.37)$$

Sinyal variasi input dari suatu sistem dimisalkan sebagai *Applied signal* ( $S_{\text{app}}$ ):

$$S_{\text{app}} = A_{\text{app}} \cos(\omega_{\text{app}} \cdot t) \quad (2.38)$$

Sehingga sinyal input  $S_{\text{in}}$ , akan divariasikan sesuai *Applied Signal* yang memiliki frekuensi dan fase yang sama dengan referensi.

$$S_{\text{in}} = A_{\text{in}} \cos(\omega_{\text{ref}} \cdot t + \delta_{\text{in}}) \quad (2.39)$$

Persamaan Sinyal dengan *Noise*:

$$S_{inN} = A_{in} \cos(\omega_{ref} \cdot t + \delta_{in}) + \sum_{\omega_N} A_N \cos(\omega_N \cdot t + \delta_N) \quad (2.40)$$

Dengan menggunakan rumus dasar *cosines*  $\cos(a)\cos(b) = \frac{1}{2}[\cos(a + b) + \cos(a - b)]$ , maka rumusan perkalian sinyal menjadi:

$$S_{mult} = 2S_{ref} S_{in} \quad (2.41)$$

$$S_{mult} = 2A_{in} \cos(\omega_{ref} \cdot t) A_{ref} \cos(\omega_{ref} \cdot t + \delta_{in}) + 2 \cos(\omega_{ref} \cdot t) \sum_{\omega_N} A_N \cos(\omega_N \cdot t + \delta_N) \quad (2.42)$$

$$S_{mult} = A_{in} A_{ref} \cos(\omega_{ref} \cdot t - \omega_{ref} \cdot t + \delta_{in}) + A_{in} A_{ref} \cos(\omega_{ref} \cdot t + \omega_{ref} \cdot t + \delta_{in}) + \sum_{\omega_N} A_N \cos((\omega_{ref} + \omega_N) \cdot t + \delta_N) + \sum_{\omega_N} A_N \cos((\omega_{ref} - \omega_N) \cdot t - \delta_N) \quad (2.43)$$

Menghasilkan rumusan akhir perkalian sinyal menjadi:

$$S_{mult} = A_{in} A_{ref} \cos(0 - \delta_{in}) + A_{in} A_{ref} \cos(2 \cdot \omega_{ref} \cdot t + \delta_{in}) + \sum_{\omega_N} A_N \cos((\omega_{ref} + \omega_N) \cdot t + \delta_N) + \sum_{\omega_N} A_N \cos((\omega_{ref} - \omega_N) \cdot t - \delta_N) \quad (2.44)$$

Penentuan nilai  $\omega_{ref} = \omega_{in}$  menyebabkan perbedaan frekuensinya menjadi nol. Kemudian sinyal tersebut dilewatkan pada filter *low-pass*, sehingga diperoleh persamaan:

$$S_{filter} = A_{in} A_{ref} \cos(\delta_{in}) + A_{N@ref} \cos(\delta_{N@ref}) \quad (2.45)$$

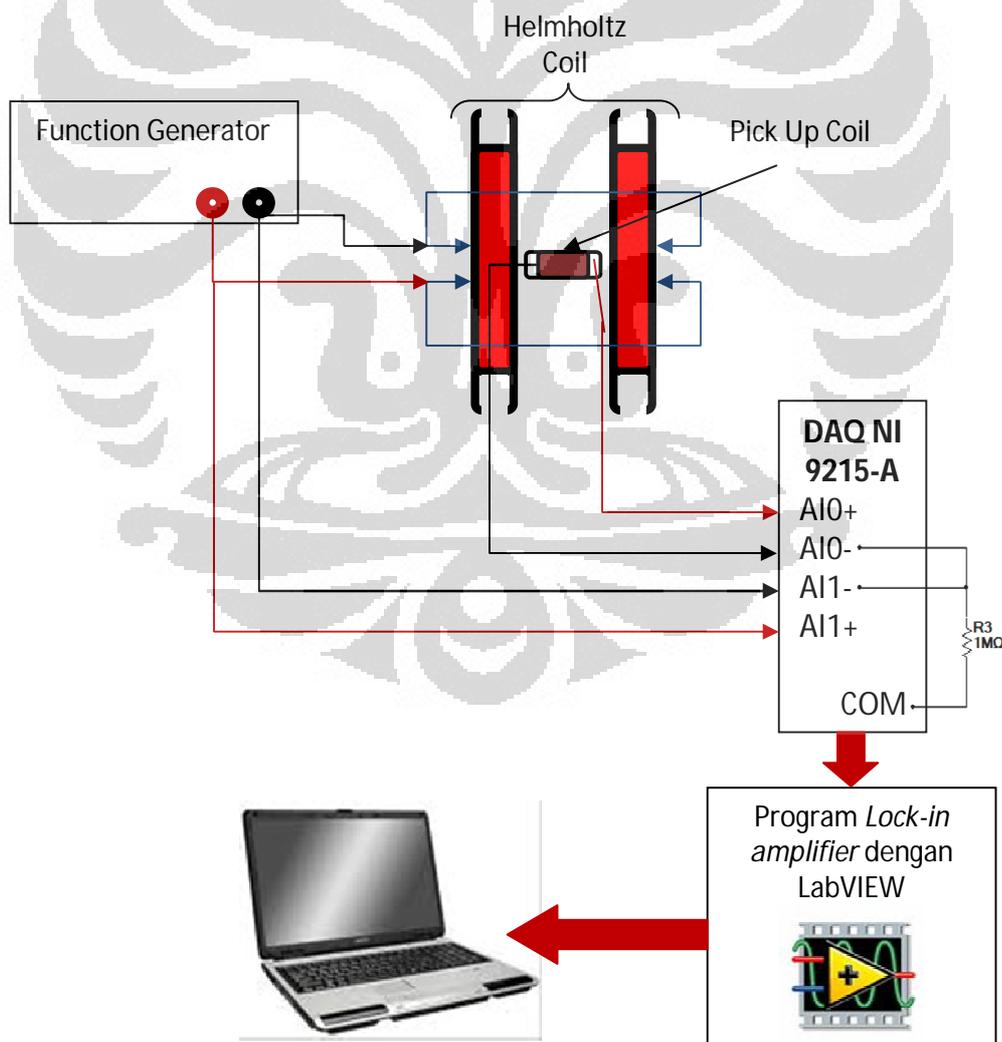
Dengan  $A_{N@ref}$  merupakan amplitudo sinyal *noise* yang berada frekuensi disekitar frekuensi referensi dan  $\delta_{N@ref}$  merupakan fase *noise* pada frekuensi yang sama dengan fase pada frekuensi referensi. Saat ditentukan fase referensinya sesuai inputnya, maka  $\delta_{in} = 0$ , sehingga  $\cos(\delta_{in}) = 1$  diperoleh nilai sinyal terfilter sebesar:

$$S_{filter} = A_{in} A_{ref} + A_{N@ref} \cos(\delta_{N@ref}) \quad [15](2.46)$$

## BAB 3 PERANCANGAN ALAT

### 3.1. PERANGKAT KERAS

Dalam perancangan alat ukur tegangan induksi ini, sistem yang digunakan adalah sistem yang cukup sederhana yaitu terdiri dari sensor berupa koil *pick-up* yang tegangan induksinya dibangkitkan oleh kumparan Helmholtz, pengakuisisi data berupa NI DAQ 9215-A dan komputer untuk mengolah datanya menggunakan bahasa pemrograman LabVIEW yang dibuat program *Lock-in amplifier*. Gambar 3.1 adalah gambar diagram alir sistem pengukuran tegangan induksi dengan menggunakan kumparan Helmholtz sebagai penghasil medan magnet homogenya.



**Gambar 3.1.** Diagram Alir Perancangan Sistem Pengukuran Tegangan Induksi

### 3.1.1. Generator Fungsi

Pada pengukuran ini digunakan sebuah generator fungsi yang digunakan sebagai tegangan referensi dan juga sebagai sumber tegangan untuk kumparan Helmholtz.. Penggunaan sebuah generator fungsi ini dimaksudkan agar frekuensi yang dihasilkan oleh tegangan referensi sama dengan frekuensi yang dihasilkan oleh kumparan *pick-up*.

Generator Fungsi yang digunakan adalah Toellner TOE 7704. Toellner TOE 7704 adalah generator fungsi produk Toellner Electronic Instrumente GmbH dari Jerman. Generator fungsi ini menggunakan tampilan digital 5 digit seven segment untuk menampilkan nilai output dari generator fungsi. Berikut adalah spesifikasi dari generator fungsi ini:

- Interval frekuensi : 1 mHz – 12 MHz
- Tegangan *Output* : < 30 Vpp
- Impedansi *Output* : 50  $\Omega$  atau 600  $\Omega$  (dapat disesuaikan)
- *Sweep Time* : 1 ms – 1000 s
- Akurasi : 5 % (amplitudo max., 1 kHz, untuk sinus dan segitiga)



**Gambar 3.2.** Generator Fungsi TOE 7704

### 3.1.2. Helmholtz Coil

Kumparan Helmholtz (*Helmholtz Coil*) adalah suatu devais yang dapat menghasilkan daerah dengan medan magnet yang hampir seragam. Dalam penelitian ini, kumparan Helmholtz yang digunakan adalah kumparan Helmholtz Leybold Didactic 558 825 dengan spesifikasi :

- Jumlah lilitan : 210 tiap kumparan
- Diameter dalam kumparan : 14.5 cm

- Diameter luar kumparan : 26 cm
- Resistansi : 2.5  $\Omega$  tiap kumparan
- Arus Maksimum : 2 A



**Gambar 3.3.** Kumparan Helmholtz Leybold Didactic 558 825

Kumparan Helmholtz ini digunakan sebagai sumber medan magnet homogen untuk memicu tegangan induksi pada koil *pick-up* yang diletakkan pada daerah medan magnet homogen kumparan Helmholtz tersebut.

### 3.1.3. Pick Up Coil

*Pick-up* coil adalah sebuah kumparan standar yang digunakan sebagai pencuplik sinyal, yakni sebuah kawat yang dililitkan pada bahan insulator berongga. Dari asal katanya, "*pick-up*" artinya "mengangkat", sesuatu yang "diangkat" disini adalah suatu sinyal tertentu yang diakibatkan oleh sesuatu sinyal yang lain.

Helmholtz yang diberikan sinyal sinusoidal oleh generator fungsi menghasilkan medan magnet disekitarnya. Tegangan induksi dari koil *Pick-up* mengindikasikan besarnya medan magnet yang timbul. Semakin besar medan magnet yang dihasilkan kumparan Helmholtz, semakin besar pula tegangan induksi yang dihasilkan. Kumparan *pick-up* yang digunakan pada penelitian ini adalah sebuah kumparan dengan 850 lilitan dan memiliki panjang 3 cm kemudian kumparan ini diletakkan pada bagian tengah kumparan Helmholtz yang menghasilkan medan magnet homogen. Apabila diberikan sampel pada koil

tersebut, maka tegangan induksi yang timbul akan semakin besar bergantung pada jenis sampel yang digunakan.



**Gambar 3.4.** Koil *Pick-up*

#### 3.1.4. Sampel Magnetik

Sampel magnetik adalah material yang digunakan untuk penentuan suseptibilitas magnet material tersebut yang diletakkan di inti koil *pick-up*. Sampel magnetik yang digunakan adalah *alloy* FeSi. *Alloy* FeSi adalah material *soft magnetik* yang banyak digunakan sebagai inti dalam transformator. Material ini memiliki sifat yakni magnetisasi saturasinya tinggi, koersivitasnya rendah, serta permeabilitasnya tinggi. FeSi yang digunakan berbentuk lembaran dengan lebar 0.5 cm dan panjang 2 cm dengan tebal sekitar 0.5 mm yang kemudian ditumpuk sebanyak 12 lembar, sehingga dimensinya menjadi 0.5 cm  $\times$  0.6 cm  $\times$  2 cm. Ukuran ini masih dalam jangkauan daerah uniform medan magnet yang dihasilkan oleh kumparan Helmholtz. Perhitungan nilai 2 cm ini didasarkan pada panjang koil *pick-up* yang digunakan, sehingga cukup apabila sampel besi ini diletakkan sebagai inti dari koil *pick-up* tersebut.

#### 3.1.5. DAQ Card NI 9215-A

DAQ Card adalah sebuah *hardware* yang berfungsi sebagai ADC ataupun DAC, dari sebuah sensor ataupun rangkaian output. DAQ akan menterjemahkan nilai tegangan yang diberikan oleh output sensor kedalam bentuk digital, nilai ini yang dikirimkan kedalam komputer, melalui *port* USB. DAQ Card yang digunakan dalam penelitian ini adalah DAQ Card NI 9215-A. Dengan kemampuan seperti pada Lampiran, maka DAQ Card 9215A dapat menjadi sebuah *hardware* data akuisisi yang sudah cukup baik untuk kebutuhan laboratorium. *Sampling rate* 100 KS/s, maka *transmisi* data monitoring suatu sensor tidak menjadi suatu masalah.

DAQ Card ini digunakan untuk mengubah data tegangan induksi yang terdeteksi ke dalam bentuk digital untuk kemudian dikirim ke PC dan diolah menggunakan program LabVIEW. NI 9215-A ini digunakan karena DAQ Card ini mengambil sampel secara simultan jika menggunakan dua channel sekaligus. Ini sangat diperlukan untuk program *Lock-in amplifier*, dimana data tegangan induksi dan tegangan referensi diambil secara simultan[16].



**Gambar 3.5.** NI DAQ USB 9215-A

### 3.1.6. Teslameter dan Hall Probe

Teslameter ini digunakan untuk mengukur distribusi medan magnet yang dihasilkan oleh kumparan Helmholtz sepanjang pusat sumbu horizontal kumparan Helmholtz tersebut.

#### 3.1.6.1. Teslameter Leybold Didactic 516 62

Tesla meter adalah sebuah alat ukur medan magnet. Teslameter ini memberikan tampilan digital dari densitas fluks magnet B dalam interval 0.01 – 2 T. Baik medan magnet konstan atau bolak balik dapat diukur. Spesifikasi Teslameter ini adalah sebagai berikut :

- Sensitivitas : 0.01 mT
- Akurasi :  $1\% \pm 1$  digit pada medan konstan, dan  $3\% \pm 1$  digit pada medan bolak balik.
- Interval frekuensi untuk medan bolak balik : 20 Hz – 10 kHz AC
- Tegangan sumber : 230 VAC, 50-60 Hz
- Konsumsi Daya 20 : VA
- Dimensi : 30 cm × 14 cm × 23 cm
- Berat : 2.3 kg

### 3.1.6.2. Axial B-Probe Leybold Didactic 516 61

Axial B-Probe adalah devais untuk mengukur densitas fluks magnet melalui tesla meter. Probe ini terdiri dari sensor Hall sensitif bila dipasang paralel dengan sumbu probe. Terdapat juga batang penunjang sepanjang 45 mm. spesifikasi lengkapnya adalah:

- Interval pengukuran :  $\pm 10$  mT,  $\pm 30$  mT,  $\pm 100$  mT,  $\pm 300$  mT,  $\pm 1000$  mT
- Kompensasi maksimum : 500 mT
- Luas penampang :  $0.2 \text{ mm} \times 0.2 \text{ mm}$
- Kedalaman penetrasi tanpa gagang : 370 mm



**Gambar 3.6.** Tesla meter Leybold Didactic 516 62 dan Axial B-Probe Leybold Didactic 516 61

## 3.2. PERANGKAT LUNAK

### 3.2.1. LabVIEW 8.5

LabVIEW (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench) adalah bahasa pemrograman visual dari National Instruments. Bahasa berbasis grafis bernama "G". Awalnya dirilis untuk Apple Macintosh pada tahun 1986, LabVIEW umumnya digunakan untuk akuisisi data, alat kontrol, dan industri otomatisasi pada berbagai platform, termasuk Microsoft *Windows*, berbagai jenis UNIX, Linux, dan Mac OS X. Versi terbaru adalah LabVIEW versi 2009, dirilis pada bulan Agustus 2009. Program LabVIEW dikenal sebagai virtual instrument (VI). Contoh Program VI:

Program LabVIEW yang dikenal sebagai VI, masing-masing VI terdiri atas 3

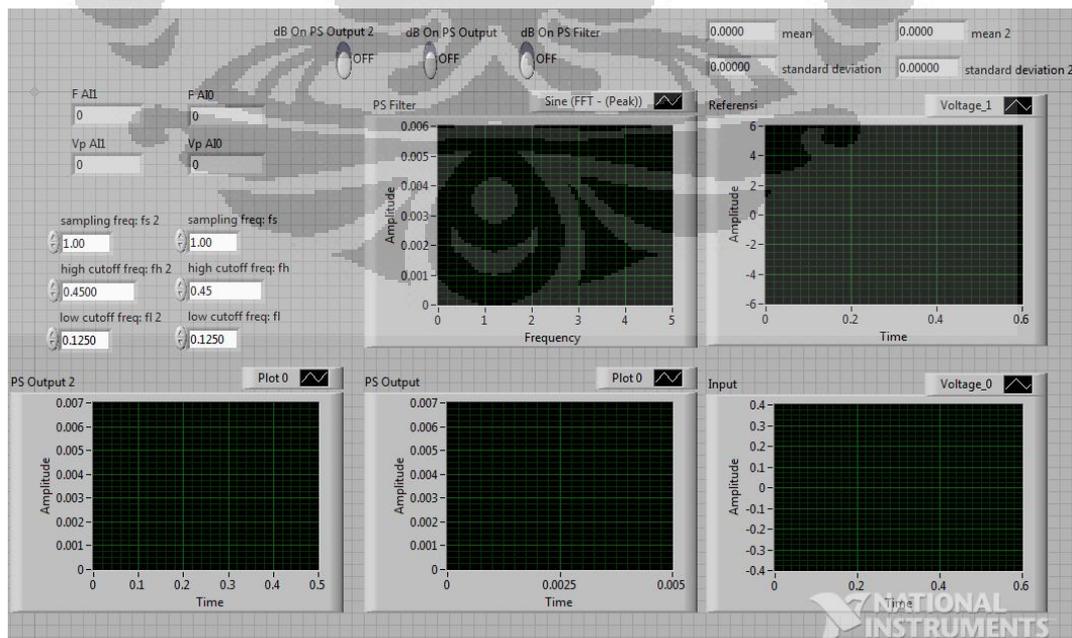
komponen utama, yaitu:

1. **Front Panel** untuk berinteraksi dengan pengguna.
2. **Block diagram** sebagai kode program.
3. **Icon/Connector** digunakan untuk menghubungkan VI dengan VI yang lainnya.

### 3.2.2. Perancangan program *Lock-in amplifier* dengan LabVIEW

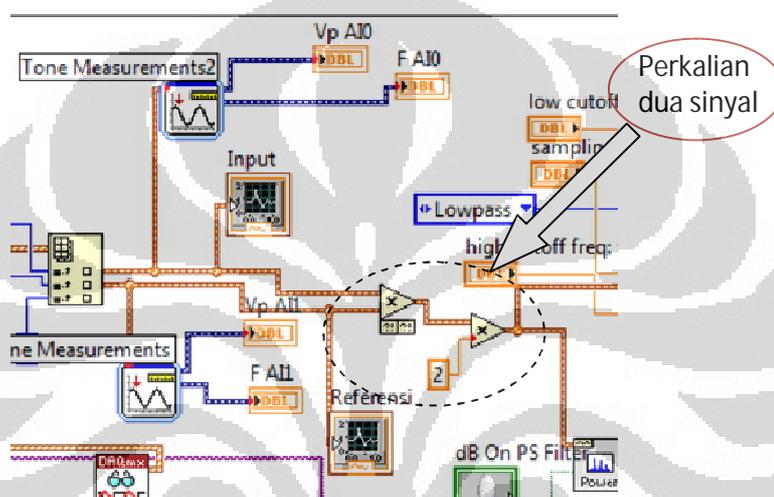
Hal penting yang harus dilakukan sebelum membuat program *lock-in amplifier* adalah memastikan bahwa antara sinyal input (sinyal yang diukur) dan sinyal referensi berjalan secara bersamaan (simultan). Sehingga diperlukan DAQ Card yang memiliki spesifikasi *Simultaneous Sampling* seperti DAQ Card tipe 9215A.

Perancangan program terdiri atas beberapa bagian utama yang membentuk suatu kesatuan program digital *lock-in amplifier*. Gambar 3.7 adalah tampilan *Front Panel* keseluruhan dari program *lock-in amplifier* yang menginterpretasikan sinyal yang akan diamati. Bagian input merupakan deteksi langsung dari suatu sistem yang akan diukur. Sedangkan *Block Diagram lock-in amplifier* yang merupakan sistem kendali serta penghubung dari banyak VI yang telah dibuat, diperlihatkan pada Lampiran.



**Gambar 3.7.** Front Panel program *lock-in amplifier*

Program *lock-in amplifier* terdiri atas beberapa VI yang tersusun menjadi suatu kesatuan. Pada program ini, terdiri atas tiga bagian terpenting untuk program LabVIEW, yaitu terdapatnya *multiplier*, *filter*, dan *Power Spectrum*. Multiplier berfungsi sebagai perkalian antara sinyal input dengan sinyal referensinya sesuai dengan Persamaan 2.41. Pada *Block Diagram* bisa terlihat pada Gambar 3.8. Dari perkalian ini diharapkan nilai amplitudo input dengan amplitudo referensi dikalikan sehingga amplitudo referensi “mengunci” amplitudo input agar didapatkan hasil seperti Persamaan 2.45 setelah sinyal keluar dari filter.



**Gambar 3.8.** Block Diagram program multiplier pada program lock in amplifier

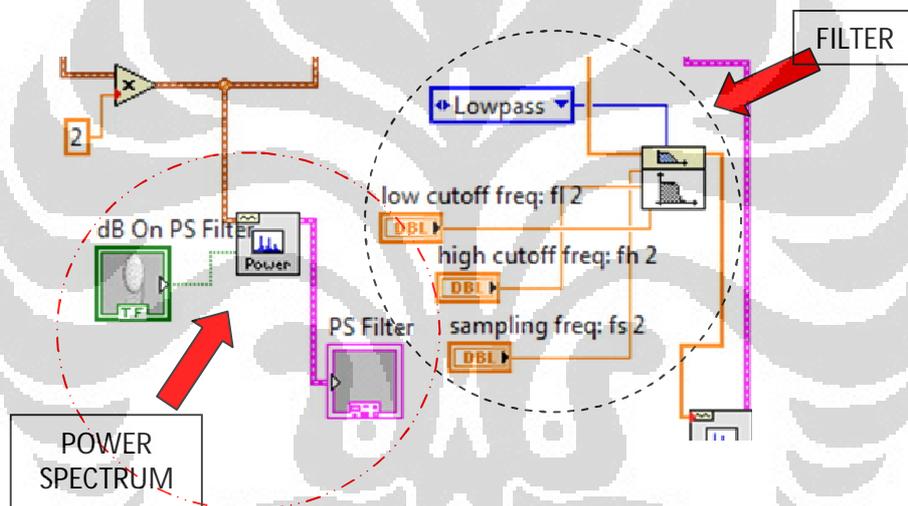
Filter yang digunakan adalah tipe low-pass, yaitu melewati sinyal yang memiliki frekuensi dibawah frekuensi *cutoff*-nya, seperti terlihat pada Gambar 3.10. Sebelum menggunakan filter, terlebih dahulu menentukan nilai frekuensi *sampling* sebagai batasan *sampling* yang akan digunakan. Semakin besar frekuensi *Sampling* yang digunakan, nilai output yang dihasilkan semakin bagus, karena frekuensi *sampling* menentukan jumlah sinyal yang masuk ke dalam *filter*. Setelah itu penentuan nilai frekuensi *cutoff* juga sangat penting sehingga tidak terjadi kesalahan saat melakukan pengukuran pada suatu sistem. Penentuan besar frekuensi *cut off* disini ditentukan menggunakan *Power Spectrum* seperti pada Gambar 3.9.

FFT Power spectrum disini juga digunakan untuk menentukan besar amplitudo pada level frekuensi nol yang didapat dari hasil filter tadi seperti terlihat pada Gambar 3.10. Icon *magnitude* menunjukkan bahwa data yang

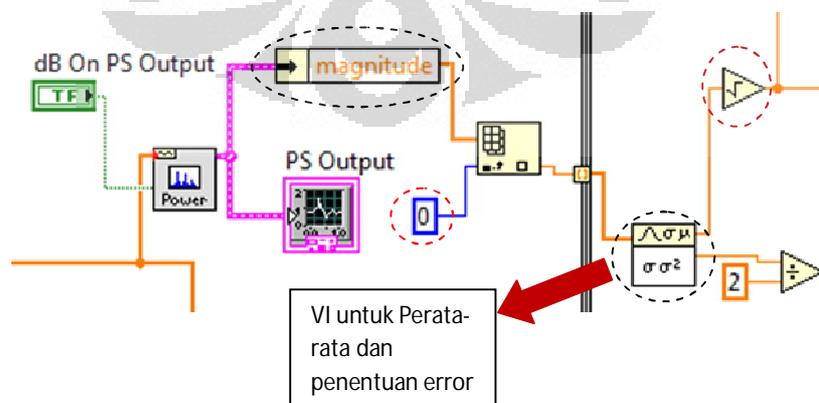
diambil adalah besar amplitudo dari power spectrum yang dihasilkan. Pada persamaan deret Fourier diketahui :

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos nx + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin nx \quad (3.1)$$

Icon indeks angka 0 menunjukkan bahwa amplitudo yang diambil adalah komponen ke-nol dari deret Fourier, yakni besar  $a_0/2$ . Komponen ke-nol ini dianggap merupakan amplitudo pada level frekuensi nol. Besarnya magnitude pada power spectrum merupakan nilai kuadrat dari amplitudo yang dihasilkan oleh sinyal sehingga ketika selesai pengambilan data dan telah dirata-ratakan, maka nilainya akan diakarkan sehingga akan mendapatkan nilai amplitudo sinyalnya[3,4].



**Gambar 3.9.** Block Diagram program Filter dan Power Spectrum pada program lock in amplifier



**Gambar 3.10.** Block Diagram Power Spectrum output dan perata-rata pada program lock in amplifier

## BAB 4

### PENGUJIAN DAN ANALISIS HASIL PENELITIAN

Pada bab ini akan dijelaskan tentang pengukuran dan analisis hasil penelitian yang telah dilakukan. Pembahasan ini meliputi pengkalibrasian kumparan Helmholtz serta membandingkannya dengan hasil perhitungan dan literatur, dan pengukuran tegangan induksi dari koil pick-up yang disebabkan kumparan Helmholtz untuk kemudian diolah untuk mendapatkan besar suseptibilitas magnet AC dari sampel yang digunakan.

#### 4.1. Pengkalibrasian kumparan Helmholtz

##### 4.1.1. Pengukuran medan magnet dengan teslameter

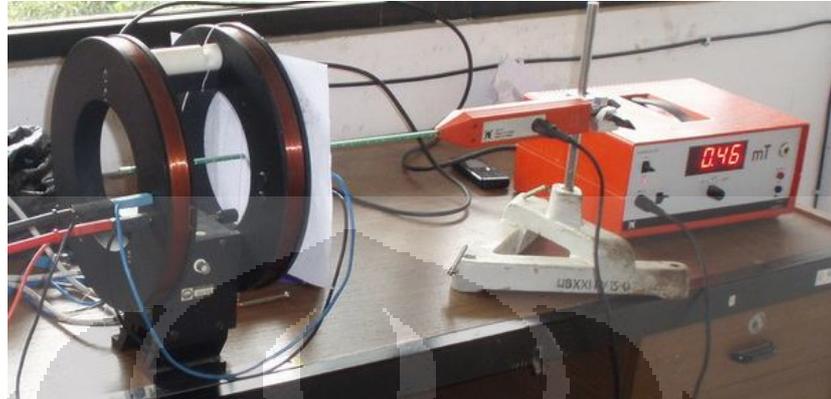
Seperti yang sudah diketahui, kumparan Helmholtz dapat menghasilkan medan magnet homogen di daerah antara dua kumparannya. Untuk itu, penulis mencoba mengkalibrasi kumparan Helmholtz dengan membandingkan hasil pengukuran medan magnet dengan perhitungan medan magnet untuk kumparan Helmholtz.

Pengkalibrasian ini dilakukan dengan mengukur medan magnet di sepanjang sumbu pusat kumparan Helmholtz sepanjang 15 cm, dengan pengukuran setiap pergeseran 1 cm. kumparan Helmholtz ini diberikan tegangan supply DC. Pengukuran medan magnet digunakan sensor Hall Leybold axial B-Probe 516 61 sebagai sensor medan magnet, dan menggunakan Leybold Teslameter 516 62 sebagai *display* besar medan magnetnya seperti terlihat pada Gambar 4.1. Pengukuran ini menggunakan sembilan variasi arus yang masuk ke kumparan Helmholtz[17].

Dari hasil pengukuran ini didapatkan data pengukuran medan magnet Helmholtz seperti terlihat pada Lampiran 1. Dari data yang didapat dapat diplot grafik hubungan antara jarak sumbu sepanjang pusat kumparan dengan medan magnet kumparan Helmholtz dapat dilihat pada Gambar 4.2.

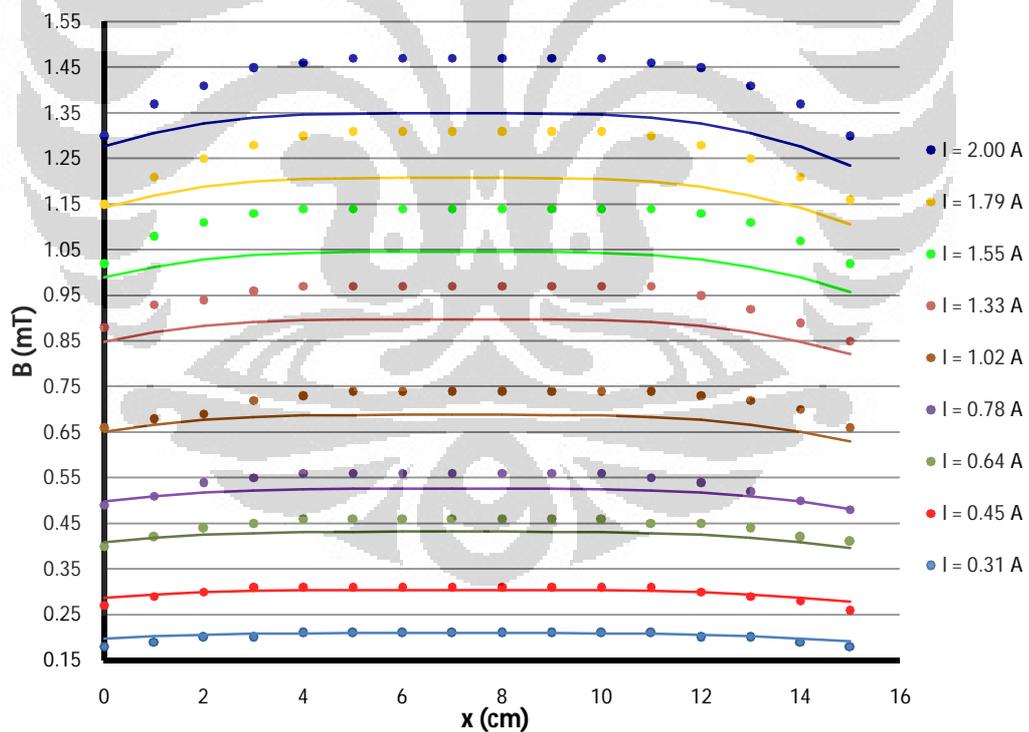
Pada grafik pada Gambar 4.2 terlihat hubungan antara medan magnet terhadap titik-titik sepanjang pusat kumparan Helmholtz. Untuk pengukuran dilambangkan dengan tanda lingkaran (●) dan perhitungan dengan garis. Nilai  $x$

ditentukan dengan mengukur medan magnet dari pinggir kumparan Helmholtz yang satu hingga pinggir kumparan Helmholtz yang lain seperti terlihat pada Gambar 4.3. sedangkan nilai medan magnet terlihat pada Teslameter.

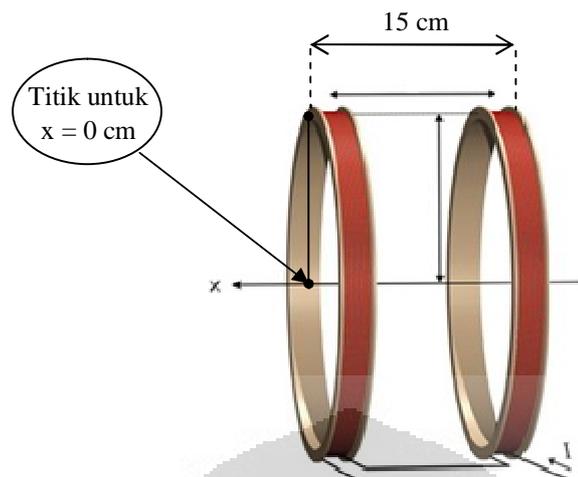


**Gambar 4.1.** Susunan alat untuk kalibrasi kumparan Helmholtz

**Grafik Hubungan Medan Magnet (B) terhadap Titik-titik sepanjang garis tengah Helmholtz coil (x)**



**Gambar 4.2.** Grafik Hubungan Medan Magnet (B) terhadap Titik-titik sepanjang pusat Helmholtz coil (x) saat pengukuran dan perhitungan



**Gambar 4.3.** Penentuan posisi jarak  $x = 0$  cm pada kumparan Helmholtz

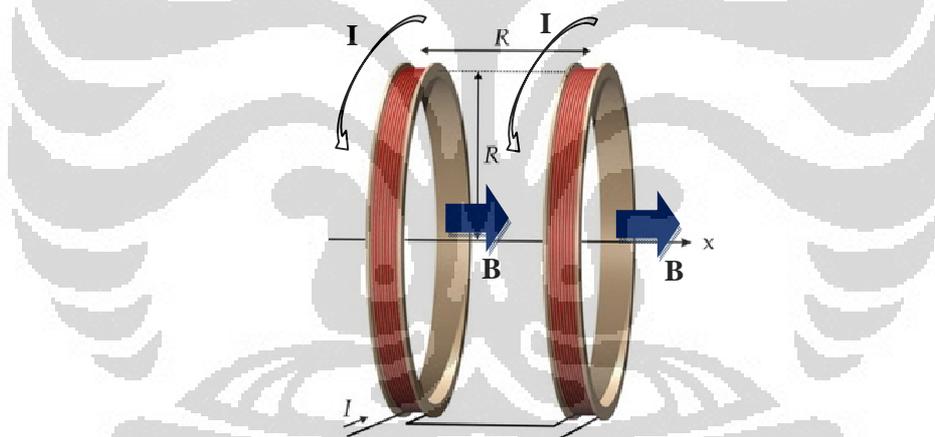
Dari grafik pada Gambar 4.2., saat pengukuran terlihat bahwa semakin besar arus yang diberikan ke kumparan Helmholtz, maka level medan magnet yang didapat semakin besar. Pada saat diberikan arus 0.31 A, level medan magnet terlihat ada di kisaran 0.21 mT. ketika arus dinaikkan menjadi 0.45 A, level medan magnet naik menjadi di kisaran 0.31 mT. Begitu seterusnya hingga saat arus yang diberikan 2.00 A, level medan magnet berada di sekitar 1.47 mT. ini berarti bahwa besar arus yang diberikan mempengaruhi besar medan magnet yang dihasilkan oleh kumparan tersebut, ini sesuai dengan Hukum Biot Savart, bahwa besar medan magnet dipengaruhi oleh besar arus listrik yang melewati kumparan tersebut.

Dari Grafik pada Gambar 4.2 juga dapat diketahui letak medan magnet homogen yang terdapat pada kumparan Helmholtz. Untuk arus yang paling rendah, terlihat bahwa pada jarak  $x$  sekitar 4 cm hingga 11 cm, medan magnet yang terukur sama besarnya yakni sekitar 0.21 mT. Begitu pula saat arusnya diperbesar, untuk nilai  $x$  dalam interval 5 cm hingga 10 cm, medan magnetnya relatif sama besar, namun levelnya lebih tinggi seiring dengan bertambahnya besar arus listrik. Ini membuktikan bahwa kumparan Helmholtz benar-benar menghasilkan medan magnet homogen di dalam kumpara tersebut. Untuk kumparan Helmholtz yang dipakai dalam penelitian ini, medan magnet homogennya terletak pada daerah sepanjang 5 cm di tengah-tengah kumparan Helmholtz tersebut. Daerah inilah yang akan dipakai untuk membangkitkan tegangan induksi pada koil pick-up.

#### 4.1.2. Perhitungan medan magnet dengan hukum Biot Savart

Untuk mengetahui apakah hasil pengukuran medan magnet pada kumparan Helmholtz yang dilakukan sesuai dengan seharusnya, maka penulis akan membandingkannya dengan hasil perhitungan medan magnet dalam kumparan Helmholtz.

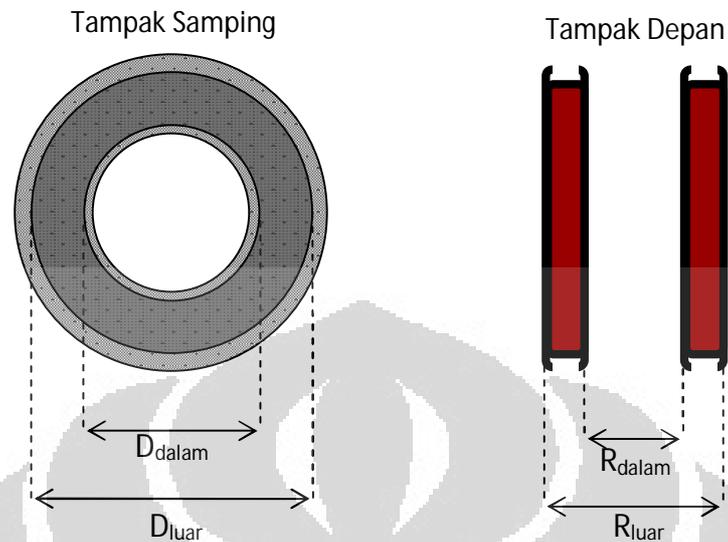
Seperti yang sudah diketahui, bahwa untuk menghitung medan magnet di sepanjang sumbu pusat kumparan pada kumparan Helmholtz dapat menggunakan hukum Biot Savart seperti yang terlihat pada Bab 2, dengan menggunakan Persamaan 2.18 karena medan magnet yang dihasilkan oleh masing-masing kumparan searah seperti terlihat pada Gambar 4.4, maka medan magnet yang dihasilkan oleh tiap-tiap kumparan bisa dijumlahkan. Arah medan magnet yang searah ini dikarenakan oleh arus listrik yang searah pula. Arah medan yang dihasilkan sesuai dengan kaidah tangan kanan yang telah kita ketahui



**Gambar 4.4.** Arah medan magnet yang disebabkan oleh arus listrik pada kumparan Helmholtz

Pada hukum Biot Savart, besaran yang dibutuhkan sudah diketahui, banyaknya lilitan untuk tiap kumparan adalah 210 lilitan, dan arus yang diberikan sudah diketahui. Akan tetapi, untuk jari-jari dan lebar Helmholtz, yang digunakan adalah nilai jari-jari efektif dan lebar efektif yang nilai keduanya adalah sama. Untuk besar jari-jari digunakan jari-jari efektif dikarenakan jari-jari kumparan mempunyai jari-jari dalam dan jari-jari luar seperti terlihat pada Gambar 4.5, dimana besar nilai jari-jari efektif adalah :

$$R_{ef} = \frac{D_{ef}}{2} = \frac{D_{luar} + D_{dalam}}{4} = \frac{R_{luar} + R_{dalam}}{2} \quad (4.1)$$



**Gambar 4.5.** Gambar penentuan jari-jari efektif kumparan Helmholtz

Dari hasil perhitungan, didapatkan data seperti pada Lampiran 2. Dari data yang didapat diplot grafik hubungan antara  $x$  dengan  $B$  seperti pada Gambar 4.6.

Dari Gambar 4.2. saat perhitungan terlihat bahwa untuk bentuk grafik yang didapat tidak jauh berbeda dengan hasil pengukuran. Terlihat bahwa semakin besar arus yang diberikan, maka semakin besar level medan magnet yang dihasilkan. Terlihat juga bahwa menurut perhitungan ada daerah homogen dalam kumparan Helmholtz tersebut.

Namun menurut perhitungan, daerah medan magnet homogen yang dihasilkan oleh kumparan Helmholtz terlihat lebih lebar bila dibandingkan dengan pengukuran. Hasil perhitungan memperlihatkan bahwa daerah medan magnet homogen terdapat pada jarak  $x$  interval 4 cm hingga 11 cm, yaitu daerah sekitar 7 cm di tengah-tengah antara dua kumparan.

Selain itu, level medan magnet yang dihasilkan untuk setiap variasi arus nilainya berbeda. Besar level medan magnet yang dihasilkan lewat pengukuran terlihat lebih besar daripada medan magnet yang didapat dari perhitungan, hanya ketika menggunakan arus kecil saja distribusi medan magnet saat pengukuran relative sama dengan distribusi medan magnet dengan perhitungan. Sebagai contoh level medan magnet ketika tegangan Helmholtz diberikan arus 0.31 A.

Hasil pengukuran memperlihatkan bahwa medan magnet yang dihasilkan maksimum 0.21 mT, sedangkan dari hasil perhitungan didapat maksimum 0.21 mT pula, terlihat dari grafik keduanya yang berhimpit. Begitu juga saat diberikan arus 0.45 A. Hasil pengukuran memperlihatkan bahwa medan magnet yang dihasilkan maksimum 0.31 mT, sedangkan dari hasil perhitungan didapat maksimum 0.31 mT pula. Untuk arus yang lebih besar barulah terlihat perbedaan nilai yang dihasilkan pengukuran dibandingkan dengan hasil perhitungan.

Dari Gambar 4.2. terlihat bahwa semakin besar arus yang diberikan ke kumparan Helmholtz, maka semakin besar pula nilai kesalahan literatur medan magnet antara hasil pengukuran dengan hasil perhitungan. Dapat diketahui dari nilai medan magnet saat arus 0.64 A, medan magnet di daerah homogen yang terukur adalah 0.46 mT, sedangkan menurut perhitungan didapat 0.43 mT, didapatkan nilai kesalahan literatur 6.5%. Semakin besar arus yang diberikan nilai kesalahan literatur yang dihasilkan semakin besar hingga menjadi 9.0%

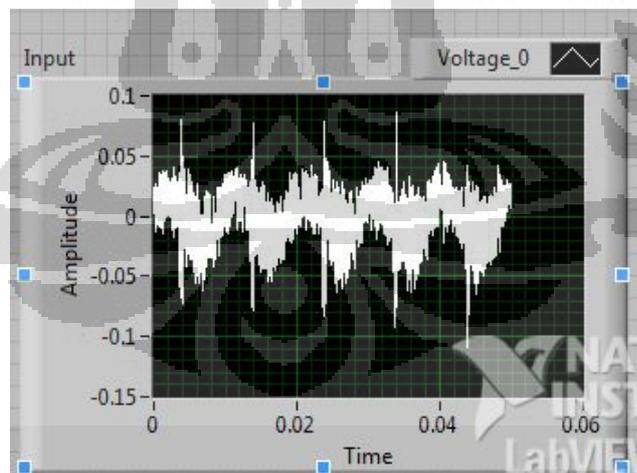
Nilai kesalahan literatur relatif kecil ini mungkin diakibatkan oleh beberapa faktor, antara lain pada saat pengukuran dipengaruhi oleh medan magnet lain yang mengakibatkan medan magnet di kumparan Helmholtz bertambah. Seperti medan magnet yang dihasilkan oleh trafo pada sumber tegangan DC, karena penulis tidak memperhatikan letak sumber tegangan yang cukup dekat dengan kumparan Helmholtz, sehingga mungkin mempengaruhi medan magnet pada kumparan tersebut. Selain itu mungkin juga akibat pengaruh medan magnet bumi yang masih mempengaruhi, walaupun posisi kumparan Helmholtz sudah diletakkan searah medan magnet bumi dan Teslameter yang sudah dikompensasi menjadi 0 mT saat kumparan Helmholtz belum diberi tegangan. Kemungkinan lain yang terjadi adalah ketidakakuratan alat ukur yang digunakan, selain karena tingkat presisi dari alat ukur yang digunakan hanya sampai dua angka dibelakang koma, sehingga tingkat ketelitiannya kurang akurat. Teslameter yang digunakan pun sebelumnya belum dikalibrasikan dengan medan magnet yang memang diketahui besarnya, sehingga keakuratannya patut dipertanyakan.

## 4.2. Penentuan nilai suseptibilitas sampel magnetik

### 4.2.1. Pengukuran tegangan induksi koil pick-up dengan Lock-In Amplifier

Untuk penentuan nilai suseptibilitas magnet dari suatu material, penulis terlebih dahulu mengukur nilai tegangan induksi yang dihasilkan oleh koil *pick-up*. Pengukuran ini menggunakan sebuah generator fungsi yang outputnya akan digunakan sebagai tegangan referensi dan sumber tegangan Helmholtz, yang dipasang secara paralel seperti terlihat pada Gambar 3.1. Ini dilakukan agar frekuensi yang dihasilkan oleh koil pick-up akan sama dengan frekuensi tegangan referensi, karena salah satu syarat penggunaan lock-in amplifier adalah bahwa tegangan input Lock-in dan tegangan referensinya memiliki frekuensi yang sama. Pada program Lock-in amplifier, nilai yang diukur adalah tegangan induksi koil pick-up, tegangan referensi, dan tegangan Helmholtz.

Pengukuran tegangan induksi ini menggunakan lock-in amplifier karena tegangan induksi merupakan salah satu tegangan yang rentan dengan noise, sehingga diperlukan suatu alat pengukuran yang dapat mengukur tegangan aslinya yang tertutupi oleh noise dengan cara menghilangkan noisennya, salah satunya dengan menggunakan program lock-in amplifier. Bentuk sinyal tegangan induksi dapat terlihat seperti pada Gambar 4.6.



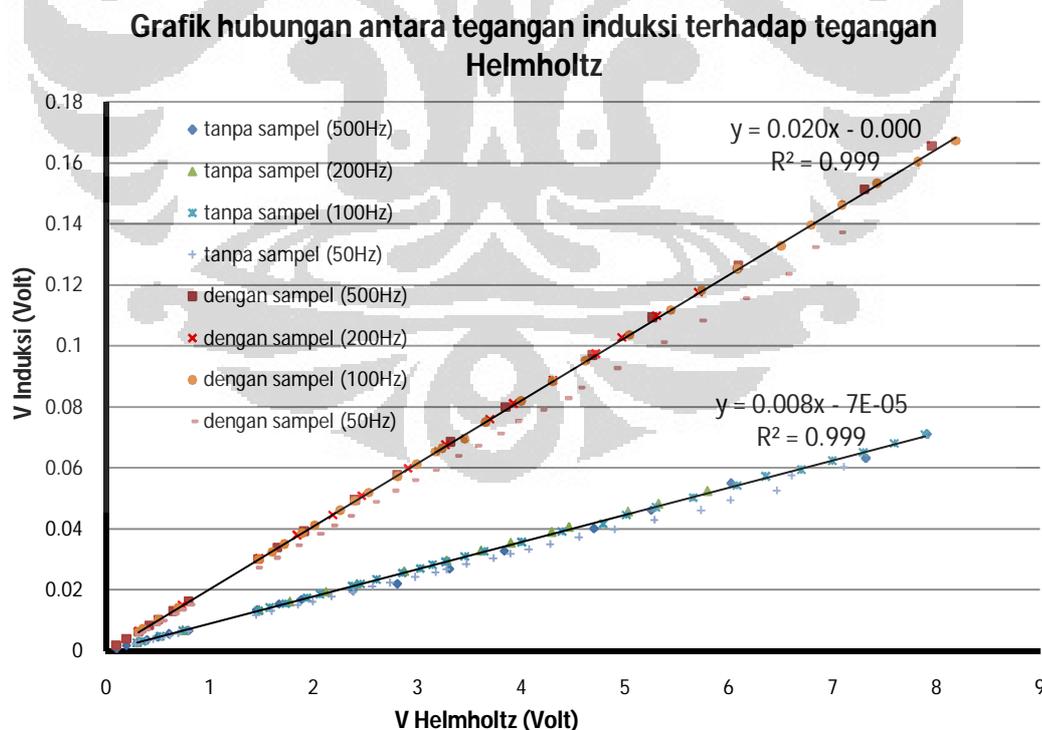
**Gambar 4.6.** bentuk sinyal tegangan induksi koil pick-up

Pengukuran yang mula-mula dilakukan adalah pengukuran tegangan induksi koil pick-up tanpa sampel magnetik di dalam intinya (berinti udara) untuk bermacam besar tegangan input Helmholtz dan kemudian divariasikan juga frekuensinya. Pengukuran selanjutnya adalah pengukuran tegangan induksi koil

pick-up dengan dimasukkan sampel magnetik pada inti koil pick-up. Sampel yang digunakan adalah FeSi, seperti yang telah dijelaskan pada Bab 3. Ketika dimasukkan terlihat perubahan pada tegangan induksi, dimana nilainya menjadi lebih besar dibandingkan ketika belum dimasukkan sampel magnetiknya.

Pengukuran ini dilakukan dengan memvariasikan tegangan dan frekuensi Helmholtz dengan menggunakan tegangan referensi yang sama besarnya dengan tegangan sumber Helmholtz dikarenakan dipasang paralel. Frekuensi dari kedua sinyal ini dibuat sama agar komponen  $\omega_{in}$  sama dengan  $\omega_{out}$ , sehingga Persamaan 2.31 bisa dibuat sederhana Persamaan 2.32, dan didapatlah nilai outputnya sama dengan perkalian amplitudo tegangan induksi dengan tegangan referensi. Namun dalam persamaan tersebut masih terdapat sinyal noise yang masih tersisa, sehingga terdapatlah nilai *error* pada pengukuran.

Hasil pengukuran tegangan induksi untuk frekuensi 50 Hz, 100 Hz, 200 Hz dan 500 Hz dapat dilihat pada lampiran, kemudian dapat diplot grafik hubungan antara tegangan Helmholtz dengan tegangan induksi seperti pada Gambar 4.7.



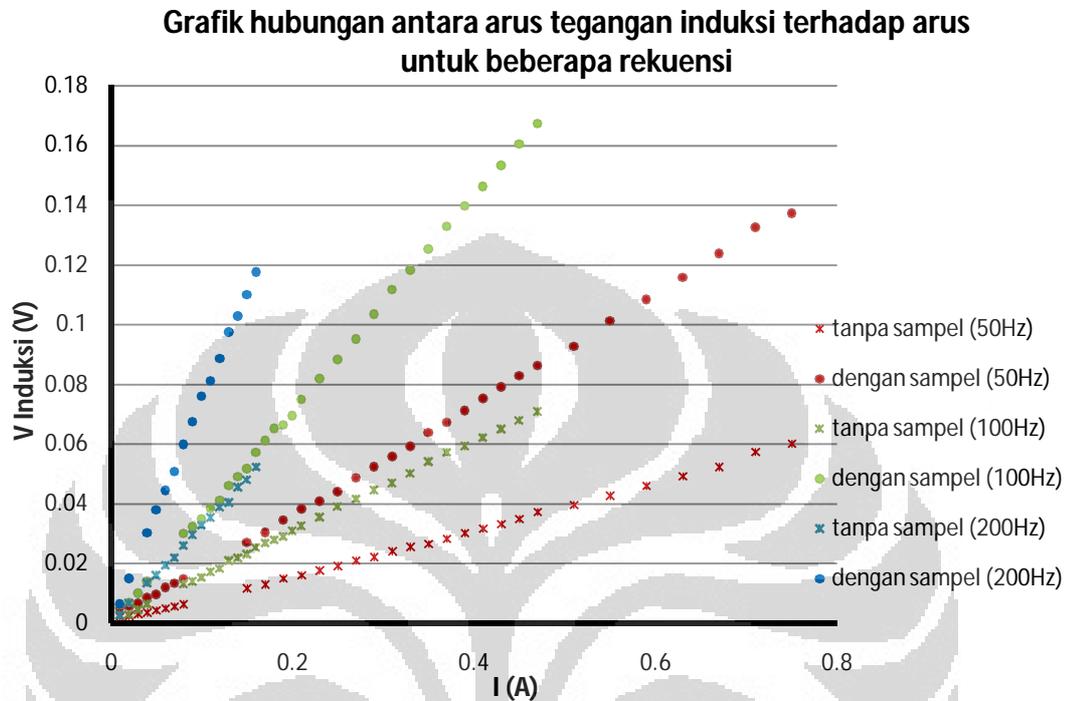
**Gambar 4.7.** Grafik hubungan antara tegangan induksi koil pick-up (V Induksi) dengan tegangan Helmholtz (V Helmholtz)

Dari Gambar 4.7. terlihat kecenderungan bahwa semakin besar tegangan yang diberikan ke kumparan Helmholtz, maka semakin besar pula tegangan induksi yang dihasilkan oleh koil *pick-up*. Ini dikarenakan bahwa medan magnet yang dihasilkan oleh kumparan Helmholtz akan bertambah besar sebanding dengan semakin besar arus yang diberikan, karena semakin besar tegangan Helmholtz, maka semakin besar pula arus yang masuk kumparan Helmholtz, sehingga tegangan induksi yang dihasilkan oleh koil *pick-up* juga semakin besar. Ketika koil *pick-up* dimasukkan sampel magnetik di dalamnya, terlihat bahwa tegangan induksi yang dihasilkan semakin besar pula. Ini merupakan efek dari magnetisasi yang terjadi pada bahan feromagnetik yang ketika berada dalam pengaruh medan magnet akan termagnetisasi sehingga mempengaruhi besar tegangan induksi yang dihasilkan oleh koil *pick-up*. Kenaikan tegangan induksi terlihat begitu linier sebanding dengan kenaikan tegangan Helmholtz. Begitu pula ketika frekuensi divariasikan, titik-titik sinyal pada grafik terlihat saling berhimpit.

Dari data yang didapat juga diplot grafik hubungan antara tegangan induksi dengan arus yang masuk ke dalam kumparan Helmholtz, seperti terlihat pada Gambar 4.8. Dari grafik Gambar 4.8. terlihat bahwa semakin besar frekuensi yang diberikan, maka arus yang masuk ke kumparan Helmholtz menjadi semakin kecil. Perlu diketahui bahwa arus yang terbaca ini didapat melalui pengukuran dengan multimeter yang dirangkai seri dengan kumparan Helmholtz, sehingga besarnya arus yang masuk ke Helmholtz tergantung dengan besarnya tegangan yang keluar dari generator fungsi. Pada Gambar 4.8., untuk frekuensi 50 Hz, arus maksimum yang dapat masuk ke Helmholtz adalah sekitar 0.75 A, dengan memberikan tegangan maksimum generator fungsi. Ketika frekuensi dinaikkan, dengan tegangan maksimum generator fungsi, arus maksimum yang terukur adalah 0.47 A. Ketika frekuensinya 200 Hz, arus maksimum yang terukur menjadi lebih kecil lagi menjadi 0.16 A. Pengurangan besar arus ini diakibatkan oleh reaktansi induktif dari Helmholtz. Seperti diketahui bahwa kumparan Helmholtz juga merupakan suatu induktor, yakni memiliki suatu karakteristik bahwa reaktansi induktifnya akan bertambah sebanding dengan kenaikan frekuensi sesuai dengan persamaan :

$$X_L = 2\pi fL \quad (4.2)$$

Jadi semakin besar  $X_L$ , semakin besar pula impedansi dari kumparan Helmholtz yang mengakibatkan arus yang masuk menjadi lebih kecil.



**Gambar 4.8.** Grafik hubungan antara tegangan induksi koil pick-up (V Induksi) dengan arus yang mengalir pada kumparan Helmholtz (I)

#### 4.2.2. Perhitungan nilai suseptibilitas magnet

Berdasarkan Persamaan 2.36 diketahui bahwa nilai suseptibilitas magnet suatu bahan dapat ditentukan dengan perbandingan besar tegangan induksi dari koil pick-up dengan sampel ( $\epsilon_s$ ) terhadap tegangan induksi koil pick-up tanpa sampel ( $\epsilon_0$ ). Dari pengukuran yang telah dilakukan dapat ditentukan besar suseptibilitas magnet dari sampel magnetik yang digunakan untuk setiap frekuensi, seperti terlihat pada Lampiran. Data-data  $\epsilon_s/\epsilon_0$  yang didapat bisa dirata-ratakan sehingga didapatkan empat nilai  $\epsilon_s/\epsilon_0$  untuk setiap variasi frekuensi seperti terlihat pada Tabel 4.1.

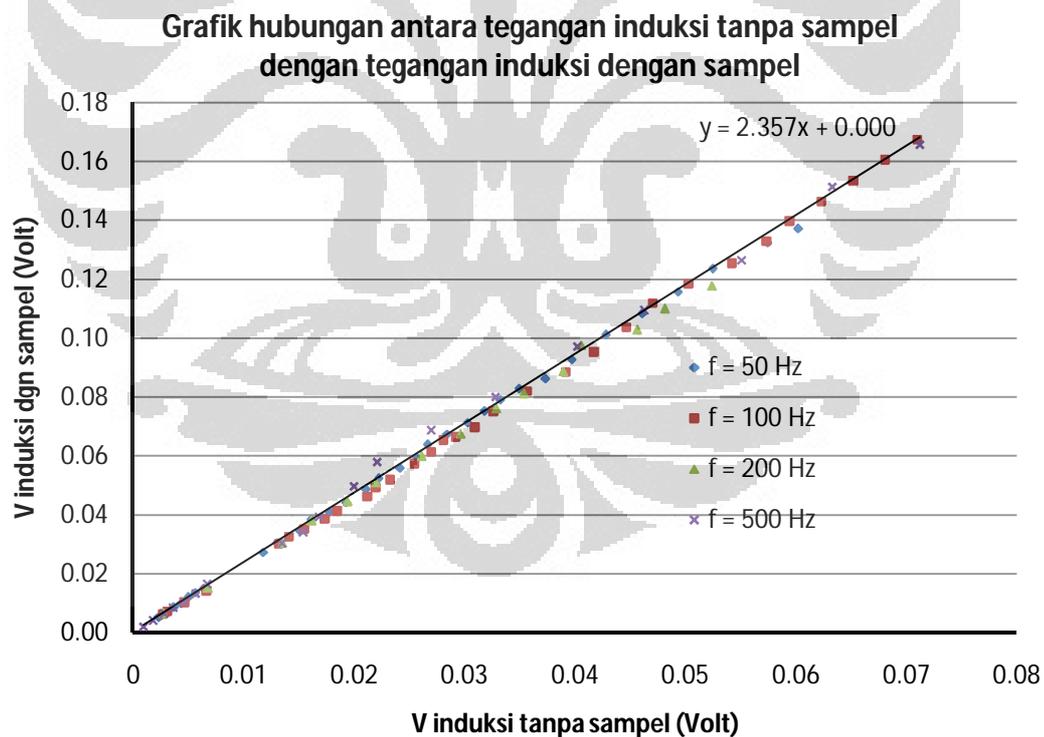
**Tabel 4.1.** Tabel nilai  $\epsilon_s/\epsilon_0$  untuk tiap frekuensi

Frekuensi	$\epsilon_s/\epsilon_0$
50 Hz	2.33557
100 Hz	2.29008
200 Hz	2.29942
500 Hz	2.33984

Dari Tabel 4.1 terlihat bahwa nilai suseptibilitas magnet yang didapat sekitar 2.3. Sampel yang digunakan adalah FeSi, yakni bahan feromagnetik yang biasa digunakan sebagai *core* pada trafo. Untuk bahan feromagnetik biasanya memiliki nilai suseptibilitas yang relatif sangat tinggi yang nilainya mencapai ribuan, namun dari hasil penelitian ini nilai suseptibilitas yang didapat sangat kecil bila dibandingkan dengan literatur.

Dari Persamaan 2.29, penulis bisa membuat grafik hubungan antara tegangan induksi tanpa sampel dengan tegangan induksi jika diberi sampel. Dengan asumsi bahwa medan magnet induksi sebanding dengan tegangan induksi yang dihasilkannya seperti pada Persamaan 2.34. Grafik dibuat dengan memplot  $\varepsilon_0$  sebagai sumbu x dan  $\varepsilon_s$  sebagai sumbu y, dan didapatkan Grafik seperti pada Gambar 4.9 dengan persamaan :

$$\varepsilon_s = (1 + \chi_m) \varepsilon_0 \quad (4.3)$$



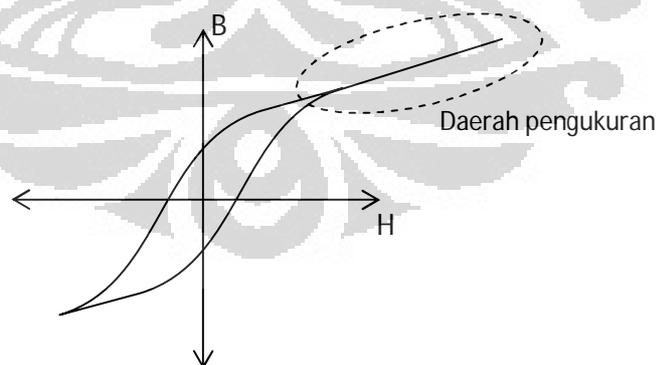
**Gambar 4.9.** Grafik hubungan antara tegangan induksi koil pick-up dengan sampel terhadap tegangan induksi koil pick-up tanpa sampel

Dari Gambar terlihat hubungan yang linier antara tegangan induksi tanpa sampel dengan tegangan induksi dengan sampel. Dari Persamaan 4.3 dapat kita

asumsikan bahwa gradien grafik sama dengan nilai suseptibilitas magnet ditambah satu ( $\chi_m+1$ ).

Perbedaan nilai suseptibilitas yang sangat jauh ini bisa diakibatkan beberapa faktor, di antaranya mungkin disipasi energy yang terjadi pada koil pick-up. Kehilangan energi ini bisa disebabkan banyak faktor, antara lain magnetisasi yang tidak sempurna dikarenakan sampel yang digunakan sebagai inti dari koil pick-up dimensinya lebih kecil jika dibandingkan dengan rongga koil pick-up, sehingga masih ada rongga-rongga yang kosong ketika sampel dimasukkan ke dalam koil pick-up. Selain itu mungkin akibat pengaruh arus Eddy pada koil pick-up dan sampel. Ketika suatu konduktor yang dialiri arus listrik akan menghasilkan medan magnet yang dapat menginduksi konduktor lain disekitarnya sehingga menghasilkan suatu arus listrik yang dinamakan arus Eddy.

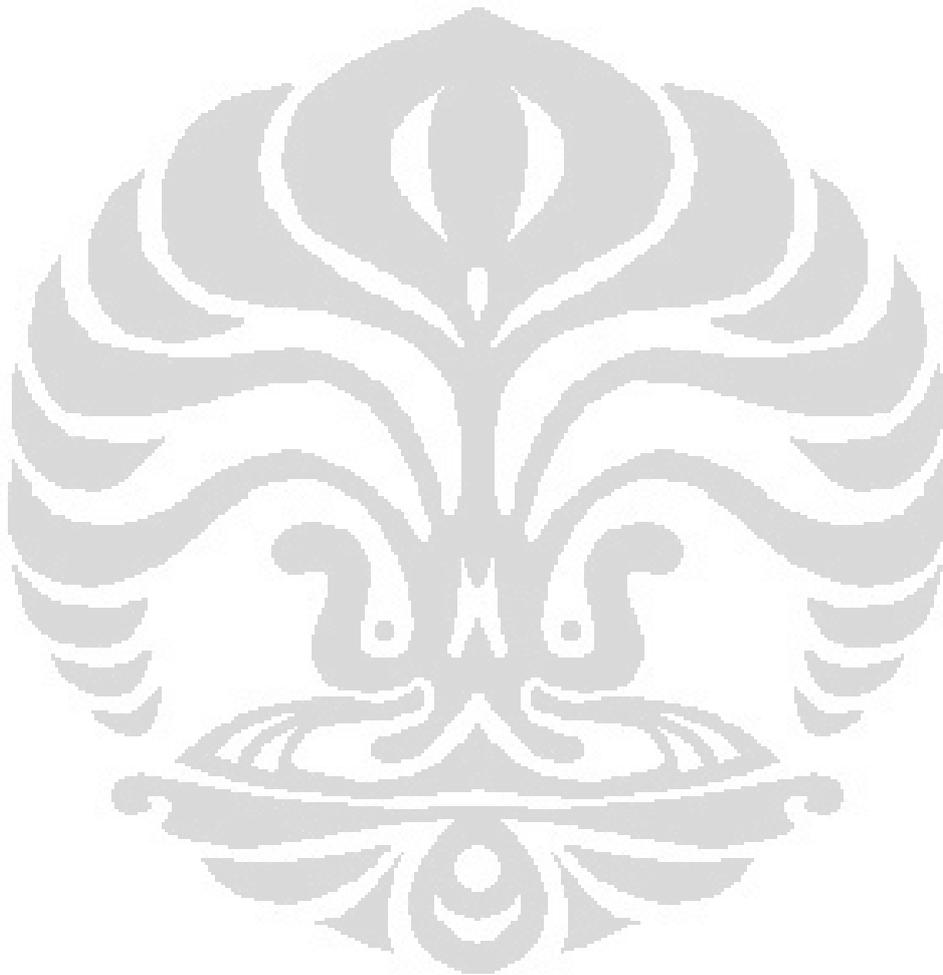
Kemungkinan lain yang bisa terjadi adalah bahwa pengukuran yang dilakukan terjadi pada daerah diatas kurva histerisis dari sampel yang digunakan seperti terlihat pada Gambar 4.9. FeSi adalah material *soft magnetic*, yang hanya membutuhkan medan magnet lemah untuk mencapai keadaan saturasi. Dalam penelitian ini, untuk menghasilkan medan magnet kecil pada kumparan Helmholtz cukup sulit, karena keterbatasan sumber tegangan yang digunakan. Generator fungsi yang digunakan sangat sulit untuk memvariasikan tegangan dalam orde yang kecil, sehingga sangat sulit untuk menghasilkan medan magnet lemah.



**Gambar 4.10.** kurva histeresis dan kemungkinan daerah pengukuran

Dari literatur, medan magnetik yang dibutuhkan untuk menurunkan kerapatan fluks dalam sebuah material magnetik menjadi nol, atau dapat disebut koersivitas, untuk FeSi diketahui sekitar 0.4-0.9 Oersted, atau sekitar 0.04-0.09 mT.

Kemungkinan lain adalah pengaruh dari induksi udara, sehingga untuk menghilangkannya diperlukan sebuah koil *pick-up* lagi dengan karakteristik yang sama, namun dengan arah lilitan yang berbeda[2]. Ini dilakukan untuk meminimalisasi nilai  $\mu_0 H$  pada perhitungan nilai  $B$ , sehingga yang didapat dari hasil pengukuran hanyalah tegangan induksi yang diukur karena efek dari magnetisasi yang dihasilkan oleh sampel yang digunakan.



## BAB 5 PENUTUP

### 5.1. Kesimpulan

Setelah melakukan penelitian ini, dapat diambil kesimpulan yaitu :

- Kumparan Helmholtz menghasilkan medan magnet homogen pada daerah tertentu antara dua kumparannya sepanjang garis tengah pusat kumparan
- Semakin besar arus yang diberikan ke dalam kumparan Helmholtz, maka semakin besar medan magnet yang dihasilkannya, ini sesuai dengan Hukum Biot Savart.
- Hasil pengukuran medan magnet kumparan Helmholtz sedikit lebih besar dibandingkan dengan perhitungan. Ini mungkin diakibatkan karena ada medan magnet lain yang ikut terukur ketika pengambilan data.
- Dari pengukuran dihasilkan data perubahan tegangan induksi koil pick-up sebelum dan sesudah diberikan sampel magnetik pada inti koil yang menunjukkan bahwa tegangan induksi setelah memakai sampel lebih besar dibanding dengan tanpa memakai sampel. Ini diakibatkan oleh efek magnetisasi dari bahan yang digunakan.
- Besar suseptibilitas yang didapat dari hasil pengukuran berbeda jauh dengan literatur yang mungkin dikarenakan daerah pengukuran yang dilakukan terjadi pada daerah diatas kurva histerisis dari sampel yang digunakan, yaitu FeSi.

### 5.2. Saran

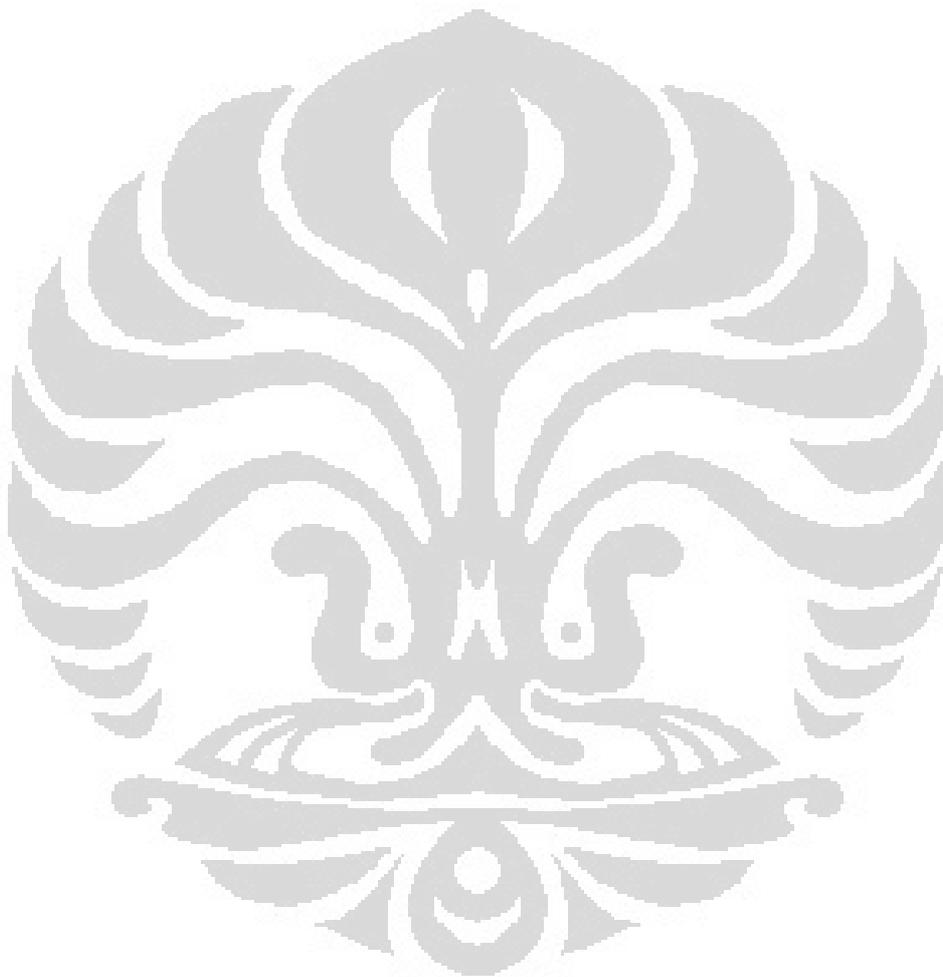
Penelitian lebih lanjut yang dapat dilakukan untuk penelitian ini adalah:

- Menggunakan sumber tegangan yang dapat menghasilkan sinyal kecil, agar kumparan Helmholtz dapat menghasilkan medan magnet yang kecil juga untuk pengukuran bahan soft magnetic.
- Menggunakan sampel bahan feromagnetik yang mempunyai koersivitas yang tinggi.
- Menggunakan dua koil *pick-up* untuk mengkompensasi nilai medan magnet luarnya.

## DAFTAR ACUAN

- [1] J. P. Sinnecker, *et al.*, "A System for AC Low Fields magnetic Characterization of Soft Magnetic Materials," *IEEE Transaction on Magnetics*, vol. Vol. 30 No. 2, pp. 1067-1069, March 1994.
- [2] A. Daire, *Low Level Measurement Techniques*: Keithley Instruments, 2005.
- [3] D. W. Hastuti, "Rancang Bangun Lock-in Amplifier Berbasis USB 9215A Sebagai Deteksi Tegangan Induksi Pada Medan Magnet Helmholtz," Skripsi, Departemen Fisika, Universitas Indonesia, Depok, 2009.
- [4] H. I. R. Putra, "Virtual Lock-in Amplifier Berbasis DAQ 9215A," Skripsi, Departemen Fisika, Universitas Indonesia, Depok, 2010.
- [5] S. S. Mat-Isa, *et al.*, "AC Magnetization Characteristics for Soft Magnetic Materials Using LabView," presented at the IEEE Student Conference on Research and Development (SCORED 2009), Serdang, 2009.
- [6] R. A. Serway and J. W. Jewett, *Physics for Scientists and Engineers*, 6th ed.: Thomson Brooks/Cole, 2004.
- [7] Endarko and G. Yudoyono, *Draf Modul Fisika*. Jakarta: Biro Perencanaan dan Kerjasama Luar Negeri Departemen Pendidikan Nasional, 2007.
- [8] R. H. Arjadi, "Sistem Pengukuran Medan Magnetik Dari Sumber Medan Elektromagnetik Helmholtz," *AMTeQ*, pp. 81-92, 2006.
- [9] C. H. Colwell. (1997, 10 Mei 2010). *PhysicsLAB*. Available: <http://dev.physicslab.org>
- [10] Oxford, "Kamus Lengkap Fisika," Edisi Baru ed: Erlangga, 2004.
- [11] D. Halliday and R. Resnick, *Physics*. Jakarta: Erlangga, 1997.
- [12] R. Fitzpatrick. (2002, 13 Mei 2010). *Magnetic Susceptibility and Permeability*. Available: <http://farside.ph.utexas.edu/teaching/jk1/lectures/node46.html>
- [13] Suryono, *et al.*, "Karakterisasi Sensor Magnetik Efek Hall UGN3503 Terhadap Sumber Magnet dan Implementasinya pada Pengukuran Massa," *Berkala Fisika*, vol. 12 No.1, 2009.
- [14] 1 Mei 2010. *About Lock-In Amplifiers*. Available: <http://www.thinksrs.com/downloads/PDFs/ApplicationNotes/AboutLIAs.pdf>

- [15] P. Kroemer, *et al.*, "PC-Based Digital Lock-In Detection of Small Signals in the Presence of Noise," University Of Texas at Austin, Austin.
- [16] "User Guide and Specifications NI USB-9215 Series," ed. Texas: National Instruments, 2007.
- [17] J. J. Stupak Jr., "A Method Of Calibrating Helmholtz Coils for the Measurement of Permanent Magnets," in *IMCSD 24th Annual Proceedings*, Oregon, 1995.



## LAMPIRAN 1

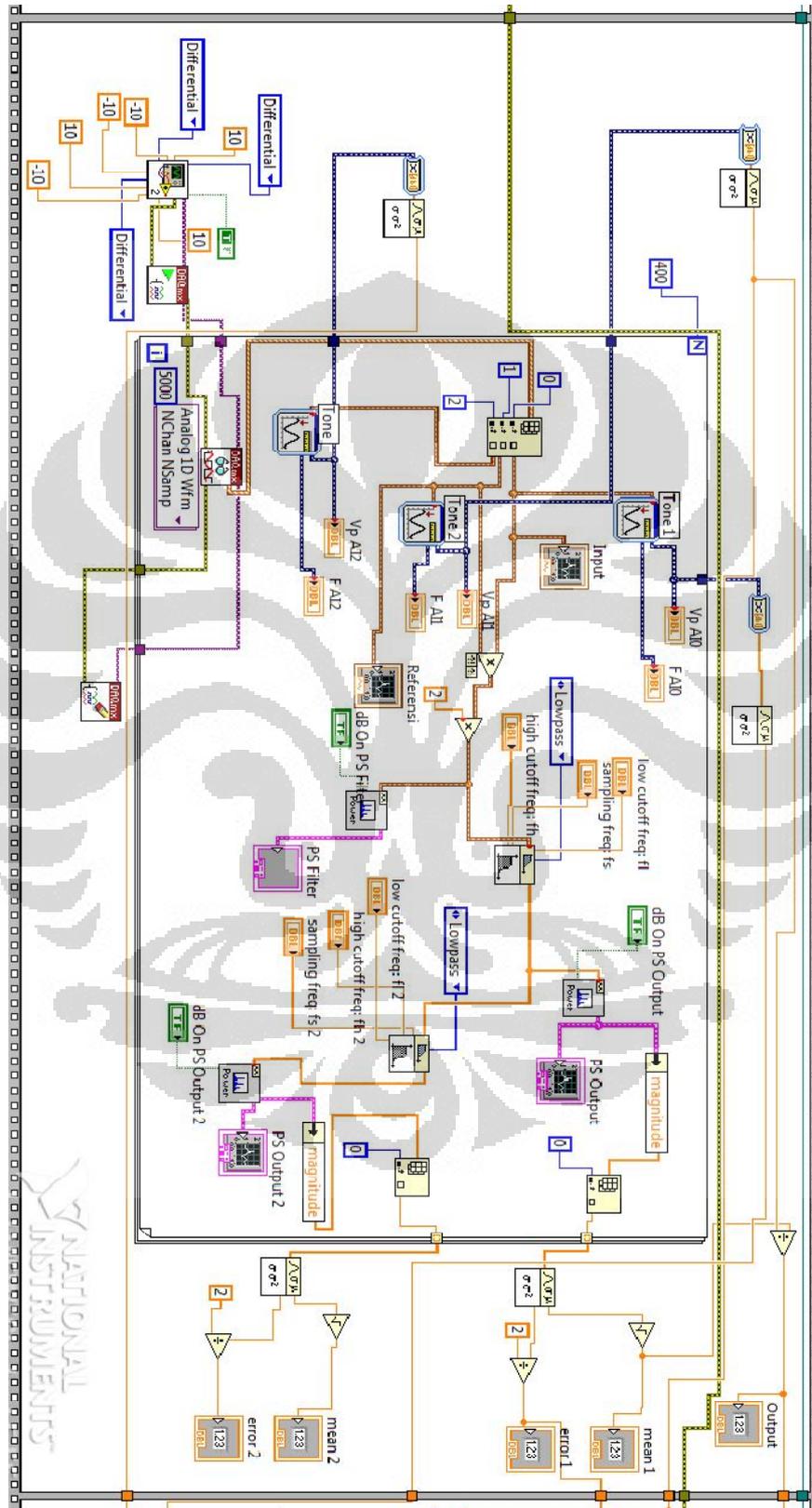
Data hasil pengukuran medan magnet sepanjang pusat kumparan Helmholtz

I (A)	0.31	0.45	0.64	0.78	1.02	1.33	1.55	1.79	2.00
x (cm)	B (mT)								
0	0.18	0.27	0.40	0.49	0.66	0.88	1.02	1.15	1.30
1	0.19	0.29	0.42	0.51	0.68	0.93	1.08	1.21	1.37
2	0.20	0.30	0.44	0.54	0.69	0.94	1.11	1.25	1.41
3	0.20	0.31	0.45	0.55	0.72	0.96	1.13	1.28	1.45
4	0.21	0.31	0.46	0.56	0.73	0.97	1.14	1.30	1.46
5	0.21	0.31	0.46	0.56	0.74	0.97	1.14	1.31	1.47
6	0.21	0.31	0.46	0.56	0.74	0.97	1.14	1.31	1.47
7	0.21	0.31	0.46	0.56	0.74	0.97	1.14	1.31	1.47
8	0.21	0.31	0.46	0.56	0.74	0.97	1.14	1.31	1.47
9	0.21	0.31	0.46	0.56	0.74	0.97	1.14	1.31	1.47
10	0.21	0.31	0.46	0.56	0.74	0.97	1.14	1.31	1.47
11	0.21	0.31	0.45	0.55	0.74	0.97	1.14	1.30	1.46
12	0.20	0.30	0.45	0.54	0.73	0.95	1.13	1.28	1.45
13	0.20	0.29	0.44	0.52	0.72	0.92	1.11	1.25	1.41
14	0.19	0.28	0.42	0.50	0.70	0.89	1.07	1.21	1.37
15	0.18	0.26	0.41	0.48	0.66	0.85	1.02	1.16	1.30

Data hasil perhitungan medan magnet sepanjang pusat kumparan Helmholtz

I (A)	0.31	0.45	0.64	0.78	1.02	1.33	1.55	1.79	2.00
x (cm)	B (mT)								
0	0.20	0.29	0.41	0.50	0.65	0.85	0.99	1.14	1.28
1	0.20	0.29	0.42	0.51	0.67	0.87	1.01	1.17	1.31
2	0.21	0.30	0.42	0.52	0.68	0.88	1.03	1.19	1.33
3	0.21	0.30	0.43	0.52	0.68	0.89	1.04	1.20	1.34
4	0.21	0.30	0.43	0.52	0.69	0.90	1.04	1.20	1.35
5	0.21	0.30	0.43	0.53	0.69	0.90	1.05	1.21	1.35
6	0.21	0.30	0.43	0.53	0.69	0.90	1.05	1.21	1.35
7	0.21	0.30	0.43	0.53	0.69	0.90	1.05	1.21	1.35
8	0.21	0.30	0.43	0.53	0.69	0.90	1.05	1.21	1.35
9	0.21	0.30	0.43	0.53	0.69	0.90	1.05	1.21	1.35
10	0.21	0.30	0.43	0.52	0.69	0.90	1.04	1.20	1.35
11	0.21	0.30	0.43	0.52	0.68	0.89	1.04	1.20	1.34
12	0.21	0.30	0.42	0.52	0.68	0.88	1.03	1.19	1.33
13	0.20	0.29	0.42	0.51	0.67	0.87	1.01	1.17	1.31
14	0.20	0.29	0.41	0.50	0.65	0.85	0.99	1.14	1.28
15	0.19	0.28	0.40	0.48	0.63	0.82	0.96	1.11	1.24

Block Diagram Program Lock In Amplifier



### LAMPIRAN 3

Data tegangan Helmholtz dan tegangan induksi koil pick-up pada frekuensi 50 Hz

V Helmholtz (Volt)	V Induksi tanpa sampel (Volt)	V Induksi dengan sampel (Volt)	Arus (Ampere)
0.286160	0.002297	0.005277	0.01
0.316176	0.002523	0.005828	0.02
0.391011	0.003133	0.006877	0.03
0.453446	0.003674	0.008699	0.04
0.534589	0.004336	0.009855	0.05
0.613249	0.005013	0.012133	0.06
0.694388	0.005642	0.013535	0.07
0.793604	0.006386	0.015047	0.08
1.447504	0.011768	0.027205	0.15
1.592130	0.013067	0.030513	0.17
1.847300	0.015088	0.034652	0.19
1.988747	0.016128	0.038428	0.21
2.172700	0.017757	0.041014	0.23
2.379218	0.019293	0.044187	0.25
2.564775	0.021060	0.048793	0.27
2.736558	0.022253	0.052474	0.29
2.978186	0.024153	0.055940	0.31
3.176587	0.025722	0.059351	0.33
3.280655	0.026683	0.063937	0.35
3.471004	0.028395	0.067350	0.37
3.730855	0.030284	0.071283	0.39
3.897453	0.031818	0.075322	0.41
4.072407	0.033243	0.079112	0.43
4.280211	0.034946	0.082902	0.45
4.556086	0.037312	0.086301	0.47
4.896718	0.039734	0.092737	0.51
5.283069	0.042820	0.101263	0.55
5.733042	0.046096	0.108424	0.59
6.015519	0.049333	0.115716	0.63
6.461462	0.052483	0.123710	0.67
6.606446	0.057426	0.132483	0.71
7.105960	0.060196	0.137256	0.75

Data tegangan Helmholtz dan tegangan induksi koil pick-up pada frekuensi 100 Hz

V Helmholtz (Volt)	V Induksi tanpa sampel (Volt)	V Induksi dengan sampel (Volt)	Arus (Ampere)
0.302824	0.002688	0.006298	0.01
0.351638	0.003088	0.007142	0.02
0.522910	0.004622	0.010238	0.03
0.742870	0.006605	0.014165	0.04
1.473941	0.013170	0.030131	0.08
1.578147	0.014083	0.032451	0.09
1.734055	0.015456	0.035054	0.10
1.937935	0.017319	0.038611	0.11
2.059642	0.018442	0.041269	0.12
2.373137	0.021165	0.046192	0.13
2.453744	0.021932	0.049176	0.14
2.605288	0.023255	0.051894	0.15
2.852915	0.025449	0.057299	0.16
3.026793	0.026965	0.061304	0.17
3.146548	0.028082	0.065309	0.18
3.271222	0.029177	0.066472	0.19
3.459093	0.030911	0.069635	0.20
3.644857	0.032606	0.075109	0.21
4.002977	0.035633	0.081992	0.23
4.395312	0.039165	0.088446	0.25
4.788647	0.041697	0.095227	0.27
5.013847	0.044618	0.103636	0.29
5.297227	0.047007	0.111869	0.31
5.656661	0.050260	0.118394	0.33
6.079631	0.054183	0.125386	0.35
6.352304	0.057296	0.132943	0.37
6.696538	0.059404	0.139780	0.39
6.995080	0.062292	0.146330	0.41
7.293622	0.065180	0.153416	0.43
7.592164	0.068068	0.160543	0.45
7.890706	0.070956	0.167341	0.47

Data tegangan Helmholtz dan tegangan induksi koil pick-up pada frekuensi 200 Hz

V Helmholtz (Volt)	V Induksi tanpa sampel (Volt)	V Induksi dengan sampel (Volt)	Arus (Ampere)
0.304614	0.002750	0.006539	0.01
0.741159	0.006730	0.015104	0.02
1.476875	0.013490	0.030364	0.04
1.774243	0.016147	0.038066	0.05
2.122810	0.019392	0.044569	0.06
2.418797	0.021970	0.050891	0.07
2.874575	0.026111	0.059962	0.08
3.281927	0.029654	0.067528	0.09
3.616123	0.032880	0.076069	0.10
3.900459	0.035380	0.081223	0.11
4.294831	0.038936	0.088670	0.12
4.461874	0.040565	0.097525	0.13
5.029459	0.045658	0.102858	0.14
5.321217	0.048179	0.110003	0.15
5.792291	0.052402	0.117687	0.16

Data tegangan Helmholtz dan tegangan induksi koil pick-up pada frekuensi 500 Hz

V Helmholtz (Volt)	V Induksi tanpa sampel (Volt)	V Induksi dengan sampel (Volt)
0.103229	0.000957	0.001974
0.198792	0.001831	0.004007
0.305401	0.002793	0.006352
0.396950	0.003651	0.008442
0.499817	0.004612	0.010279
0.608127	0.005662	0.013160
0.795082	0.006712	0.016318
1.454214	0.013462	0.030216
1.665369	0.015421	0.033978
1.881441	0.016886	0.039264
2.377262	0.020006	0.049598
2.805467	0.022087	0.057828
3.308322	0.027001	0.068571
3.835743	0.032827	0.079973
4.698322	0.040221	0.097099
5.250554	0.046271	0.109398
6.019509	0.055121	0.126435
7.315264	0.063311	0.151385
7.902322	0.071213	0.165611