

TUGAS AKHIR - SF234801

RANCANG BANGUN ALAT PENDETEKSI MEDAN MAGNET BERBASIS SENSOR *HALL EFFECT* TIPE A 1302

ARIF RAHMAT HAKIM

NRP 5001211036

Dosen Pembimbing

Susilo Indrawati, M.Si.

NIP 1986201811001

Drs. Bachtera Indarto, M.Si.

196104041991021001

Program Studi S1 Fisika

Departemen Fisika

Fakultas Sains dan Analitika Data

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2025



TUGAS AKHIR - SF234801

**RANCANG BANGUN ALAT PENDETEKSI MEDAN
MAGNET BERBASIS SENSOR *HALL EFFECT* TIPE
A1302**

ARIF RAHMAT HAKIM

NRP 5001211036

Dosen Pembimbing

Dr.Susilo Indrawati,M.Si.

NIP 1986201811001

Drs.Bachtera Indarto,M.Si.

NIP 196104041991021001

Program Studi Sarjana

Departemen Fisika

Fakultas Sains dan Analitika Data

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2025



FINAL PROJECT - SF234801

***DESIGN AND DEVELOPMENT OF A MAGNETIC FIELD
DETECTION DEVICE BASED ON HALL EFFECT SENSOR
TYPE A1302***

ARIF RAHMAT HAKIM

NRP 5001211036

Advisor

Dr.Susilo Indrawati, M.Si.

NIP 1986201811001

Drs.Bachtera Indarto, M.Si.

NIP 196104041991021001

Study Program S1 Fisika

Department of Physics

Faculty of Science and Data Analytics

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2025

LEMBAR PENGESAHAN

Rancang Bangun Alat Pendeteksi Medan Magnet Berbasis Sensor *Hall Effect* Tipe
A1302

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat
memperoleh gelar S.Si pada
Program Studi S-1
Departemen Fisika
Fakultas Sains dan Analitika Data
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh: **ARIF RAHMAT HAKIM**
NRP. 5001211036

Disetujui oleh Tim Penguji Proposal Tugas Akhir :

1. Dr.Susilo Indrawati, M.Si.
2. Drs. Bachtera Indarto,M.si
3. Diky Anggoro, M. Si.
4. Dr. Gatut Yudoyono, MT.

Pembimbing

Ko-Pembimbing

Penguji

Penguji



PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama mahasiswa / NRP : Arif Rahmat hakim
Program studi : SI Fisika
Dosen Pembimbing / NIP : Dr.Susilo Indrawati, M.Si

dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul **“RANCANG BANGUN ALAT PENDETEKSI MEDAN MAGNET BERBASIS SENSOR *HALL EFFECT* Tipe A1302”** adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 26 Juni 2025

Mengetahui
Dosen Pembimbing



Dr. Susilo Indrawati, M.Si
NIP 1986201811001

Mahasiswa



Arif Rahmat Hakim
NIP. 5001211036

ABSTRAK

Rancang Bangun Alat Pendeteksi Medan Magnet Berbasis Sensor *Hall Effect* Tipe A1302

Nama Mahasiswa / NRP : Arif Rahmat Hakim / 5001211036
Departemen : Fisika - ITS
Dosen Pembimbing : Dr.Susilo Indrawati, M.Si

Abstrak

Pengukuran medan magnet secara presisi sangat penting dalam berbagai aplikasi, termasuk industri, penelitian, dan pendidikan. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membangun sistem pengukuran medan magnet berbasis sensor *Hall Effect* A1302 yang dilengkapi dengan metode kalibrasi menggunakan kumparan solenoida berinti besi ST41. Sistem ini mengintegrasikan sensor *Hall Effect*, mikrokontroler Arduino Uno, dan ADC eksternal ADS1115 beresolusi tinggi, serta menggunakan filter digital moving average untuk meningkatkan kestabilan pembacaan data. Proses kalibrasi menghasilkan hubungan regresi linier antara output sensor dengan medan magnet teoritis. Pengujian terhadap variasi jumlah magnet permanen menunjukkan respons linier sensor terhadap peningkatan intensitas medan magnet eksternal, memperkuat keandalan sistem dalam pengukuran praktis. Hasil kalibrasi menunjukkan koefisien determinasi $R^2=0,996$, menandakan tingkat akurasi yang tinggi antara pembacaan sensor dan nilai teoritis. Sistem ini terbukti mampu melakukan pengukuran medan magnet secara real-time dalam rentang ± 50 Gauss dengan stabilitas dan akurasi yang tinggi. Selain itu, sistem memiliki keunggulan dari sisi kesederhanaan rangkaian, kemudahan pembuatan, dan biaya yang ekonomis. Oleh karena itu, sistem ini sangat layak diaplikasikan untuk kebutuhan pengukuran medan magnet di laboratorium pendidikan, penelitian dasar, maupun pengujian praktis di bidang industri.

Kata kunci: Sensor *Hall Effect*, Allegro A1302, Kalibrasi, Solenoida Berinti Besi ST 41, Medan Magnet, Arduino Uno, ADS1115.

ABSTRACT

DESIGN AND DEVELOPMENT OF A MAGNETIC FIELD DETECTION DEVICE BASED ON HALL EFFECT SENSOR TYPE A1302

Student Name / NRP : Arif Rahmat Hakim / 5001211036
Department : Physics - ITS
Advisor : Dr.Susilo Indrawati, M.Si.

Abstract

Precise magnetic field measurement is crucial in various applications, including industry, research, and education. This study aims to design and develop a magnetic field measurement system based on the Hall Effect sensor Allegro A1302, equipped with a calibration method using an iron-core solenoid coil (ST41). The system integrates the Hall Effect sensor, an Arduino Uno microcontroller, and a high-resolution external ADC (ADS1115), along with a digital moving average filter to improve data stability. The calibration process generates a linear regression relationship between the sensor output and the theoretical magnetic field value. Testing with varying numbers of permanent magnets shows that the sensor responds linearly to the increase in magnetic field intensity, confirming the system's reliability in practical measurements. The calibration results yield a coefficient of determination $R^2=0.9966$, indicating a high level of accuracy between sensor readings and theoretical values. The system successfully performs real-time magnetic field measurements within a ± 50 Gauss range, providing stable and accurate results. Moreover, it offers advantages in circuit simplicity, ease of construction, and cost efficiency. Therefore, this system is highly applicable for magnetic field measurements in educational laboratories, basic research, and practical industrial testing.

Keywords: Hall Effect Sensor, Allegro A1302, Calibration, ST41 Iron-Core Solenoid, Magnetic Field, Arduino Uno, ADS1115.

KATA PENGANTAR

Penelitian ini disusun dalam rangka penyelesaian studi penulis untuk sarjana sains Fisika ITS yang telah selesai dengan judul” RANCANG BANGUN ALAT PENDETEKSI MEDAN MAGNET BERBASIS SENSOR *HALL EFFECT* TIPE *A1302*”. Tentunya, penulisan laporan tugas akhir ini melibatkan banyak pihak yang telah membantu, baik secara mental maupun material. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Keluarga, Ibu, Bapak, Kakak dan Adik yang selalu memberikan dukungan.
2. Ibuk Susilo Indrawati, M.Si sebagai dosen pembimbing dan dan Bapak Drs. Bachtera Indarto, M.Si sebagai co pembimbing yang telah bersedia untuk membimbing dan meluangkan waktunya dalam pembuatan tugas akhir ini.
3. Bapak Dr. Lila Yuwana, M.Si. sebagai Kepala Departemen Fisika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
4. Segenap Dosen Departemen Fisika ITS yang senantiasa memberikan ilmu pengetahuan yang sangat berharga selama menempuh studi di Fisika ITS.
5. Faris Naufal Hakim dan Dzikri Fatan Elbani sebagai tim tugas akhir.
6. Teman-teman laboratorium instrumentasi elektronika, khususnya Mike, Khoir, Rijal, Sodik, Jaki dan Nata

Akhir kata, semoga penelitian ini memberikan manfaat bagi semua pihak.

Surabaya, 26 Juni 2025

Arif Rahmat Hakim

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	i
PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
ABSTRAK	iii
<i>ABSTRACT</i>	iv
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR TABEL	ix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	1
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan	2
1.5 Manfaat	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	3
2.1 Hasil Penelitian Terdahulu	3
2.2 Dasar Teori	5
2.2.1 Medan Magnet	5
2.2.2 Kumparan Solenoida Inti Besi	7
2.2.3 Pemeabilitas dalam Bahan Feromagnetik	8
2.2.4 Sensor <i>Hall Effect</i> Allegro A1302	9
2.2.5 Arduino Uno	12
2.2.6 Modul ADS 1115	13
2.2.7 <i>Filter Digital Moving Average</i>	14
2.2.8 Kalibrasi dan Regresi Linear	15
BAB III METODOLOGI	16
3.1 Metode yang digunakan	16
3.2 Studi Literatur dan Perancangan	16
3.3 Pembuatan dan Perakitan Alat	16
3.4 Metode Kalibrasi Sensor	17
3.5 Pengujian Pada Material Uji	18
3.6 Urutan pelaksanaan Tugas Akhir	19
BAB IV HASIL DAN PEMBAHSAN	20

4.1 Desain Alat	20
4.2 Metode Pengukuran dan kalibrasi	21
4.3 Hasil Pengukuran Medan Magnet Sebelum dan Sesudah Kalibrasi.....	22
4.4 Analisis Linearitas Sensor Alat dan Kumparan.....	24
4.5 Perhitungan Kalibrasi Sensor	26
4.6 Verifikasi Dengan Pengukuran Sensor.....	27
4.7 Analisis Error Pengukuran.....	27
4.8 Pengujian dengan objek magnet.....	28
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	31
5.1 Kesimpulan	31
5.2 Saran	31
DAFTAR PUSTAKA	32
LAMPIRAN.....	34
BIODATA PENULIS	40

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Hubungan linear tegangan Hall dengan medan magnet menggunakan Helmholtz Coil (Kassam & Sinclair, 2015).....	3
Gambar 2. 2 Diagram Perancangan Sistem	4
Gambar 2. 3 Garis gaya medan magnet di dalam dan sekitar solenoida (Sumber: ilustrasi diadaptasi dari konsep fisika dasar Halliday, Resnick & Walker, 2013; dibuat oleh AI ScholarGPT, 2025).	6
Gambar 2. 4 Medan magnet pada kawat lurus berarus.....	6
Gambar 2. 5 Medan magnet pada kumparan selenoida yang dialiri arus.	7
Gambar 2. 6 Prinsip kerja sensor <i>hall effect</i> : arus dibelokkan medan magnet, menghasilkan tegangan Hall untuk mendeteksi medan magnet.	10
Gambar 2. 7 Diagram blok internal sensor Allegro A1302: menunjukkan pemrosesan sinyal dari Hall plate hingga output buffer (Allegro Microsystems, 2005).....	11
Gambar 2. 8 Arduino uno	13
Gambar 2. 9 ADS 1115	13
 Gambar 3. 1 Desain case alat.....	 17
Gambar 3. 2 Desain sistem rangkaian	17
Gambar 3. 3 Diagram Alir Urutan Pelaksanaan Tugas Akhir	19
 Gambar 4. 1 Skema alat keseluruhan	 20
Gambar 4. 2 Skema pengukuran.....	21
Gambar 4. 3 kumparan selenoidan dengan besi ST41	22
Gambar 4. 4 Medan magnet sensor(B) vs medan magnet perhitungan pada saat kalibrasi(kumparan).....	25
Gambar 4. 5 Medan magnet sensor(B) vs medan magnet perhitungan sesudah kalibrasi(kumparan).....	26
Gambar 4. 6 grafik jumlah medan magnet dengan nilai magnet.....	29

DAFTAR TABEL

Tabel 4. 1 Hasil Pengukuran Awal (Tanpa Medan Magnet)	22
Tabel 4. 2 medan magnet sensorvsebelum dikalibrasi	23
Tabel 4. 3 Medan magnet sensor setelah dikalibrasi	24
Tabel 4. 4 hasil Error Gauss	27
Tabel 4. 5 nilai medan magnet dengan variasi jumlah magnet	28

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pengukuran medan magnet berperan penting dalam berbagai aplikasi sains dan teknologi, mulai dari industri otomotif, sistem navigasi, instrumentasi laboratorium, hingga pengembangan sistem kontrol elektromekanik (Halliday, Resnick, & Walker, 2013; Serway & Jewett, 2014). Untuk pengukuran intensitas medan magnet, salah satu teknologi sensor yang banyak digunakan adalah sensor *Hall Effect*. Sensor *Hall Effect* bekerja berdasarkan fenomena efek Hall yang ditemukan oleh Edwin Hall pada tahun 1879, di mana medan magnet tegak lurus pada penghantar arus akan menghasilkan perbedaan tegangan transversal (Hall, 1879; Fraden, 2010). Sensor *Hall Effect* tipe Allegro A1302 merupakan salah satu jenis sensor linier yang cukup populer karena sensitivitasnya yang stabil terhadap perubahan medan magnet dan mudah diintegrasikan ke sistem mikrokontroler (Allegro Microsystems, 2019).

Namun demikian, pembacaan sensor Hall seringkali dipengaruhi oleh adanya *noise* lingkungan, variasi suhu, fluktuasi sumber arus, serta deviasi karakteristik sensor individu, sehingga diperlukan proses kalibrasi yang baik agar data pengukuran lebih akurat (Kurniawan, 2020; Nakamura et al., 2021). Penelitian-penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa kalibrasi sensor Hall dapat dilakukan dengan metode perbandingan terhadap sumber medan magnet terkontrol yang dihitung secara teoritis, seperti yang dilakukan oleh Kassam dan Sinclair (2015), yang mengkalibrasi sensor *Hall Effect* A1302 menggunakan kumparan Helmholtz dengan perhitungan Biot-Savart.

Dalam penelitian ini, sistem kalibrasi dirancang dengan memanfaatkan kumparan solenoida berinti besi, yang dialiri arus listrik terkontrol untuk menghasilkan medan magnet. Besaran medan magnet yang dihasilkan dihitung berdasarkan rumus teoritis hukum Biot-Savart dan hukum Ampère, dengan memperhitungkan faktor permeabilitas bahan inti (Tipler & Mosca, 2008; Serway & Jewett, 2014). Pendekatan ini serupa dengan metodologi kalibrasi yang dilakukan oleh Kassam & Sinclair (2015), namun dengan pengaturan desain fisik kumparan yang berbeda.

Peningkatan resolusi pengukuran, digunakan modul ADC ADS1115 dengan resolusi 16-bit, yang mampu membaca variasi tegangan analog secara lebih detail dibandingkan ADC internal Arduino Uno yang hanya 10-bit (Horowitz & Hill, 2015; Texas Instruments, 2015). Selain itu, pemrosesan sinyal dilakukan dengan penerapan *filter* digital guna mengurangi *noise* frekuensi tinggi (Smith, 1997). Setelah dilakukan pengolahan data dan analisis regresi linier, diperoleh persamaan kalibrasi yang mampu mengoreksi deviasi pembacaan sensor terhadap medan magnet teoritis, menghasilkan sistem pengukuran medan magnet yang stabil, presisi, portabel, dan ekonomis untuk keperluan laboratorium maupun pembelajaran (Prasetyo, 2022; Kassam & Sinclair, 2015).

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana merancang sistem pendeteksi medan magnet berbasis sensor *Hall Effect* Allegro A1302?
2. Bagaimana menerapkan metode kalibrasi dengan kumparan solenoida inti besi ST41 untuk meningkatkan akurasi pengukuran medan magnet?

1.3 Batasan Masalah

Agar tugas akhir lebih terarah, maka diberikan beberapa batasan masalah sebagai berikut :

1. Menggunakan sensor *Hall Effect* Allegro A1302.
2. Kalibrasi menggunakan kumparan solenoida berinti besi ST41.
3. Validasi pembacaan dilakukan berdasarkan perhitungan medan magnet teoritis, tanpa Gaussmeter.
4. Sistem pengukuran ini dibatasi pada medan magnet dengan rentang ± 50 Gauss, menggunakan sensor *Hall Effect* A1302 dan solenoida ST41 sebagai referensi kalibrasi..

1.4 Tujuan

1. Merancang sistem pengukuran medan magnet berbasis sensor *Hall Effect* Allegro A1302.
2. Mengembangkan metode kalibrasi medan magnet berbasis kumparan solenoida berinti besi ST41 dengan pendekatan pemodelan regresi linier dan mengetahui range pengukuran.

1.5 Manfaat

Hasil dari tugas akhir ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Menyediakan alternatif alat pengukuran medan magnet yang presisi, *portable*, dan ekonomis.
2. Memberikan kontribusi pengembangan metode kalibrasi sensor *Hall Effect* untuk edukasi dan riset.

BAB II

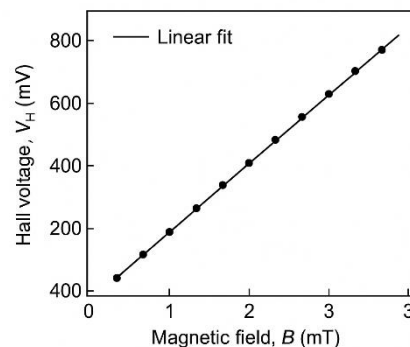
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Hasil Penelitian Terdahulu

Penelitian mengenai pengembangan sistem pengukuran medan magnet berbasis sensor *Hall Effect* telah banyak dilakukan dengan berbagai pendekatan yang menyesuaikan tujuan pengukuran, tingkat presisi, serta kemudahan sistem. Beberapa penelitian terdahulu menjadi acuan penting dalam pengembangan tugas akhir ini.

Penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Kassam dan Sinclair (2015) menjadi salah satu rujukan utama. Mereka membangun sistem Gaussmeter berbasis sensor *Hall Effect* Allegro A1302 dan melakukan proses kalibrasi menggunakan konfigurasi Helmholtz coil. Helmholtz coil dipilih karena mampu menghasilkan medan magnet yang seragam secara teoritis di pusat kumparan. Arus listrik divariasikan secara bertahap, menghasilkan medan magnet hingga sekitar 3 mT. Hasil kalibrasi menunjukkan hubungan linier yang sangat baik antara tegangan Hall dan intensitas medan magnet pada medan rendah. Namun, penyimpangan non-linear mulai tampak saat medan magnet melebihi 3 mT, yang diduga terjadi akibat pengaruh faktor material dan geometris sensor Hall itu sendiri. Penelitian ini juga menemukan bahwa sensitivitas aktual sensor *Hall Effect* A1302 yang mereka gunakan hanya sebesar 5,6 V/T, jauh lebih rendah dari spesifikasi pabrik sebesar 13 V/T. Temuan ini menguatkan pentingnya kalibrasi individu setiap sensor sebelum digunakan.

Berikut merupakan visualisasi hubungan linearitas tegangan Hall terhadap medan magnet berdasarkan hasil kalibrasi yang mereka lakukan:



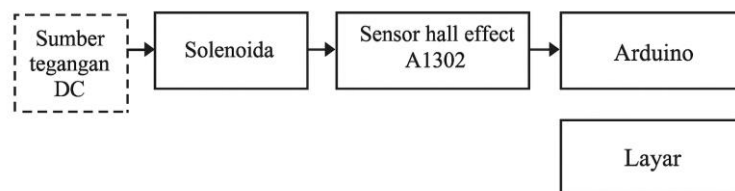
Gambar 2. 1 Hubungan linear tegangan Hall dengan medan magnet menggunakan Helmholtz Coil (Kassam & Sinclair, 2015)

Hubungan linearitas antara tegangan Hall terhadap medan magnet berdasarkan hasil kalibrasi yang dilakukan oleh Kassam & Sinclair (2015) dapat dilihat pada Gambar 2.1, yang menunjukkan bahwa tegangan Hall meningkat secara linier terhadap peningkatan medan magnet yang diterapkan menggunakan Helmholtz Coil. Pendekatan yang dilakukan Kassam dan Sinclair sejalan dengan tujuan tugas akhir ini, yaitu melakukan kalibrasi sensor *Hall Effect* secara teoritis. Namun, dalam penelitian ini digunakan metode kalibrasi alternatif yang lebih praktis dan ekonomis, yaitu dengan kumparan solenoida berinti besi. Penggunaan inti besi dengan permeabilitas tinggi memungkinkan medan magnet yang lebih besar dapat dihasilkan meskipun arus yang digunakan relatif kecil. Dengan demikian, metode ini lebih sederhana untuk diterapkan namun tetap akurat dalam menghasilkan medan magnet terkontrol sebagai pembanding kalibrasi.

Sementara itu, penelitian oleh Prasetyo (2022) juga mengembangkan sistem pengukuran medan magnet berbasis sensor *Hall Effect* Allegro A1302 yang dikombinasikan dengan mikrokontroler Arduino Uno. Sistem yang dibangun dapat menampilkan data pengukuran secara real-time. Namun, dalam penelitian tersebut, proses kalibrasi dilakukan secara sederhana tanpa menggunakan sumber medan magnet teoritis, sehingga akurasi pengukurannya masih cukup terbatas.

Penelitian lain dilakukan oleh Nakamura et al. (2021), yang mencoba meningkatkan sensitivitas pengukuran sensor *Hall Effect* dengan menggunakan penguatan sinyal elektronik. Dengan menambahkan rangkaian penguat, sensitivitas deteksi medan magnet lemah dapat ditingkatkan. Namun, pendekatan ini menambah kompleksitas rangkaian, dan kurang praktis untuk sistem pengukuran sederhana.

Penelitian terdahulu yang dilakukan Imam Haromain FMIPA UI 2010 membahas tentang perancangan sistem pengukuran medan magnet menggunakan sensor linier A1302 yang dikendalikan oleh mikrokontroler Arduino. Dalam penelitian tersebut, variasi kuat arus listrik dan jumlah lilitan pada solenoida digunakan untuk menghasilkan medan magnet yang kemudian diukur menggunakan sensor A1302. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor A1302 memiliki respons linier terhadap variasi medan magnet yang dihasilkan, dan data tegangan output yang diperoleh dapat dikalibrasi dengan model linier yang sederhana. Penelitian ini sangat relevan dengan tugas akhir yang sedang disusun karena menggunakan pendekatan dan komponen yang serupa, yaitu pengukuran medan magnet pada solenoida menggunakan sensor Hall A1302 serta pengembangan sistem kalibrasi berdasarkan hubungan linier antara medan magnet dan variabel fisik seperti arus listrik dan jumlah lilitan (Imam Haromain, 2010).



Gambar 2. 2 Diagram Perancangan Sistem

Sistem pengukuran medan magnet pada Gambar 2.2 menunjukkan hubungan antar komponen utama dalam rancangan alat ukur medan magnet berbasis sensor *Hall Effect* A1302. Sistem diawali dari sumber arus DC yang digunakan untuk mengalirkan arus listrik ke dalam solenoida berinti besi. Arus listrik yang mengalir pada solenoida akan menghasilkan medan magnet di sepanjang sumbu pusat kumparan. Sensor *Hall Effect* A1302 kemudian ditempatkan sejajar dengan medan magnet tersebut untuk mendeteksi besar medan yang dihasilkan. Sensor ini bekerja dengan prinsip perubahan tegangan output analog secara linier terhadap variasi medan magnet. Output sensor selanjutnya dibaca oleh mikrokontroler Arduino Uno melalui pin analog, kemudian diproses dan ditampilkan dalam bentuk data numerik di layar monitor atau modul LCD.

Sistem ini dirancang untuk mengukur perubahan medan magnet berdasarkan konfigurasi jumlah lilitan dan besar arus, yang kemudian digunakan dalam proses kalibrasi dengan pendekatan regresi linier. Penggunaan sensor *Hall Effect* A1302 memungkinkan pengukuran medan magnet secara real-time dan efisien, sementara pemanfaatan solenoida sebagai penghasil medan magnet memberikan kendali fisik yang presisi terhadap parameter

eksperimen. Gambar ini menggambarkan keterkaitan antara bagian-bagian penting dalam alat yang dikembangkan, serta menunjukkan alur kerja dari sistem yang dikembangkan dalam tugas akhir ini mulai dari pembangkitan medan, pengukuran, hingga tampilan hasil data.

Berdasarkan kajian beberapa penelitian terdahulu tersebut, dapat disimpulkan bahwa kalibrasi sensor *Hall Effect* sangat penting karena sensitivitas aktual sensor sering kali berbeda dari spesifikasi pabrikan. Penggunaan sumber medan magnet teoritis, baik Helmholtz coil maupun solenoida berinti besi, sama-sama efektif untuk kalibrasi asalkan medan yang dihasilkan stabil. Selain itu, penggunaan ADC eksternal beresolusi tinggi serta pengolahan sinyal digital sederhana terbukti efektif meningkatkan presisi pembacaan. Penelitian-penelitian ini menjadi dasar kuat dalam pengembangan sistem pengukuran medan magnet berbasis sensor *Hall Effect* Allegro A1302 yang presisi, ekonomis, dan aplikatif sebagaimana dikembangkan dalam penelitian tugas akhir ini.

2.2 Dasar Teori

Pada tugas akhir ini terdapat beberapa dasar teori untuk melaksanakan tugas akhir sebagai berikut.

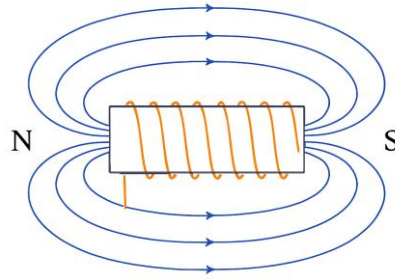
2.2.1 Medan Magnet

Medan magnet merupakan faktor utama dalam perancangan sistem pengukuran medan magnet berbasis sensor *Hall Effect* pada penelitian ini. Medan magnet dihasilkan oleh arus listrik yang mengalir melalui penghantar, seperti kumparan solenoida, menghasilkan garis gaya magnet yang teratur di sekitar penghantar (Halliday, Resnick, & Walker, 2013).

Dalam penelitian ini, medan magnet dibangkitkan menggunakan solenoida berinti besi. Penggunaan inti feromagnetik ini dimaksudkan untuk memperbesar rapat fluks magnetik tanpa memerlukan arus besar, sehingga medan magnet yang dihasilkan cukup kuat dan stabil untuk keperluan kalibrasi sensor (Cullity & Graham, 2009). Medan magnet yang homogen di bagian dalam solenoida memungkinkan perbandingan akurat antara hasil pembacaan sensor *Hall Effect* Allegro A1302 dengan nilai teoritis medan magnet.

Keberadaan medan magnet terkontrol ini sangat penting untuk menghasilkan hubungan linier antara output tegangan sensor dan intensitas medan magnet aktual. Melalui proses kalibrasi berbasis pengukuran medan magnet teoritis inilah diperoleh model matematis yang meningkatkan ketelitian alat pengukur medan magnet yang dikembangkan dalam penelitian tugas akhir ini (Allegro Microsystems, 2019).

Gambar berikut memperlihatkan visualisasi garis gaya medan magnet pada solenoida:



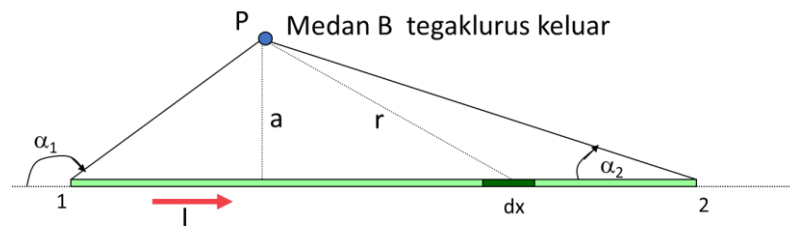
Gambar 2. 3 Garis gaya medan magnet di dalam dan sekitar solenoida (Sumber: ilustrasi diadaptasi dari konsep fisika dasar Halliday, Resnick & Walker, 2013; dibuat oleh AI ScholarGPT, 2025).

Pada Gambar 2.3 tampak bahwa medan magnet di dalam solenoida membentuk garis-garis gaya yang rapat, sejajar, dan homogen, menandakan kuatnya medan di bagian dalam. Di sisi luar solenoida, garis gaya mulai melebar membentuk pola tertutup dari kutub utara (N) ke kutub selatan (S). Karakteristik medan homogen di bagian dalam solenoida inilah yang dimanfaatkan dalam sistem kalibrasi sensor *Hall Effect* yang dikembangkan dalam penelitian ini, karena memungkinkan proses perbandingan hasil pengukuran sensor terhadap medan magnet teoritis secara akurat.

Untuk mencari medan magnet maka dengan menggunakan hukum bio savart. Hukum Biot–Savart adalah hukum fundamental dalam elektromagnetika yang digunakan untuk menentukan medan magnet yang dihasilkan oleh arus listrik. Hukum ini menyatakan bahwa setiap elemen kecil arus listrik pada suatu penghantar akan memberikan kontribusi terhadap medan magnet di titik tertentu di sekitarnya. Secara matematis, hukum ini dirumuskan sebagai:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{I \vec{dl} \times \vec{r}}{r^2} \quad (2.1)$$

di mana $\vec{B}$ adalah medan magnet (Tesla), I adalah kuat arus listrik (Ampere), $\vec{dl}$ adalah vektor elemen panjang kawat, r^2 adalah vektor satuan dari elemen arus ke titik pengamatan, r adalah jarak antara elemen arus dengan titik pengamatan, dan μ_0 adalah permeabilitas vakum sebesar $4\pi \times 10^{-7} T \cdot m/A$ (Purcell & Morin, 2013).



Gambar 2. 4 Medan magnet pada kawat lurus berarus.

Dalam kasus khusus seperti solenoida sangat panjang pada gambar 2.4 dengan distribusi arus seragam, hukum Biot–Savart dapat disederhanakan menjadi:

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi a} (\cos\alpha_2 - \cos\alpha_1) \quad (2.2)$$

Bila kawat sangat panjang (∞):

$\alpha_2 = 0^\circ$ dan $\alpha_1 = 180^\circ$, sehingga

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi a} \quad (2.3)$$

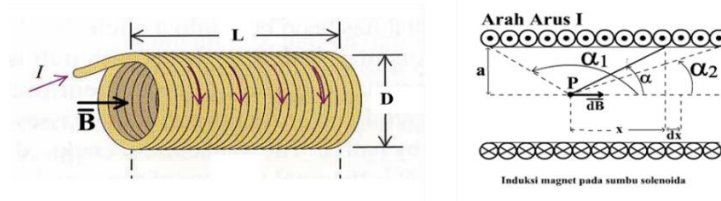
dengan B adalah medan magnet, N adalah jumlah lilitan kumparan, L adalah panjang solenoida, dan I adalah arus listrik. Rumus ini digunakan untuk menghitung besar medan magnet pada sumbu pusat solenoida secara teoritis (Griffiths, 2017). Seperti ditunjukkan pada Gambar 2.4, medan magnet pada titik PPP akibat kawat lurus berarus dapat dihitung dengan mempertimbangkan sudut α_1 dan α_2 yang dibentuk oleh garis-garis dari titik pengamatan ke kedua ujung kawat.

2.2.2 Kumparan Solenoida Inti Besi

Penemuan bahwa arus listrik menghasilkan medan magnet pertama kali dikemukakan oleh Hans Christian Orsted pada tahun 1820. Ia mengamati bahwa jarum kompas menyimpang saat didekatkan ke kawat yang dialiri arus, menunjukkan adanya gaya magnet yang timbul dari arus listrik (Halliday, Resnick, & Walker, 2011). Fenomena ini menjadi dasar prinsip elektromagnetik dan dijelaskan secara matematis melalui hukum Ampère.

Dalam penelitian ini, sumber medan magnet dikontrol dengan menggunakan kumparan solenoida berinti besi. Kumparan dialiri arus listrik sehingga menghasilkan medan magnet yang perhitungannya dapat dilakukan menggunakan hukum Ampère dan hukum Biot-Savart. Untuk solenoida panjang dengan distribusi lilitan merata. Untuk kondisi pengukuran di ujung kumparan, medan magnet mengalami penurunan akibat efek fringing, sehingga nilai medan magnet pada ujung secara aproksimasi hanya sekitar setengah dari nilai di pusat solenoida. Besarnya medan magnet di ujung dapat dituliskan sebagai:

$$B_p \approx \frac{\mu_0 \mu_r N}{2L} I (\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1) \quad (2.6)$$



Gambar 2. 5 Medan magnet pada kumparan solenoida yang dialiri arus.

Pada Gambar 2.5, ditunjukkan medan magnet yang dihasilkan oleh sebuah kumparan (solenoida) ketika dialiri arus listrik. Kumparan terdiri dari lilitan kawat yang membentuk silinder dengan panjang L, jumlah lilitan N, inti besi di tengah kumparan, dan jari-jari tertentu. Medan magnet diukur pada titik pengamatan P yang terletak di ujung kumparan, yaitu titik di mana garis-garis medan mulai menyebar keluar dari inti. Gambar 2.5 di bagian kanan kanan memperjelas posisi titik pengamatan P terhadap ujung-ujung kumparan. Dari titik P, ditarik dua garis ke masing-masing ujung kumparan yang membentuk sudut α_1 dan α_2 terhadap sumbu pusat kumparan.

Sudut α_1 adalah sudut antara garis sumbu pusat kumparan dengan garis dari titik P menuju ujung kiri kumparan, sedangkan α_2 adalah sudut antara garis sumbu pusat kumparan dengan garis dari titik P menuju ujung kanan kumparan. Medan magnet di titik P dihitung

dengan mempertimbangkan kontribusi kedua sudut ini sesuai dengan persamaan (2.6), yang menunjukkan bahwa besar medan magnet sebanding dengan perbedaan kosinus kedua sudut tersebut. Prinsip ini memanfaatkan sifat medan magnet di dalam solenoida yang relatif seragam pada pusat tetapi mulai menyebar di ujung, sehingga diperlukan koreksi dengan mempertimbangkan α_1 dan α_2 untuk memperoleh nilai medan magnet yang akurat di titik P.

Jika pengukuran dilakukan tepat pada ujung kumparan, maka nilai α_1 dan α_2 , sehingga persamaan medan magnet di ujung kumparan dapat disederhanakan menjadi:

$$\alpha_1 = 1, \quad \alpha_2 = 0$$

Sehingga:

$$B_{\text{ujung}} = \frac{\mu_0 \mu_r N I}{2L} (1 - 0) = \frac{1}{2} \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{N}{L} \cdot I \quad (2.7)$$

Persamaan (2.7) didasarkan pada asumsi bahwa solenoida cukup panjang, sehingga efek medan di ujung relatif kecil namun tetap signifikan. Dengan menggunakan kumparan sebagai sumber medan magnet yang terkontrol, besaran medan magnet yang dihasilkan dapat divariasikan secara presisi hanya dengan mengatur arus listrik. Selain itu, penggunaan inti besi meningkatkan densitas fluks magnetik karena nilai permeabilitas relatif yang tinggi, memungkinkan medan magnet yang cukup besar meskipun arus listrik yang digunakan relatif kecil. Hal ini sangat relevan dengan tujuan penelitian, yaitu menghasilkan alat ukur dengan ketelitian memadai namun sederhana secara teknis, praktis, dan ekonomis.

Metode ini juga sejalan dengan pendekatan yang dilakukan oleh Kassam & Sinclair (2015), yang menggunakan kumparan Helmholtz sebagai sumber kalibrasi teoritis. Walaupun jenis kumparan yang digunakan berbeda, prinsip dasarnya sama, yaitu memanfaatkan sumber medan magnet dengan nilai teoritis yang dapat dihitung secara akurat untuk membangun hubungan linier koreksi sensor *Hall Effect* secara presisi.

2.2.3 Permeabilitas dalam Bahan Feromagnetik

Permeabilitas (μ) merupakan ukuran seberapa besar suatu bahan dapat menghantarkan medan magnet. Permeabilitas dalam bahan feromagnetik memiliki sifat yang tidak konstan tetapi bergantung pada kekuatan medan magnet yang diberikan kepada bahan feromagnetik. Secara matematis, permeabilitas didefinisikan sebagai rasio antara induksi magnetik (B) dengan medan magnet (H), yaitu $\mu = B/H$. Permeabilitas dalam bahan feromagnetik sangat sensitif terhadap struktur mikro bahan, termasuk kemurnian, perlakuan panas, serta deformasi mekanik (Cullity & Graham 2009).

Permeabilitas magnetik merupakan parameter penting yang menyatakan kemampuan suatu material untuk mempermudah pembentukan medan magnet di dalamnya ketika terkena medan magnet luar. Secara umum, permeabilitas (μ) dinyatakan sebagai hasil kali antara permeabilitas vakum (μ_0) dengan permeabilitas relatif (μ_r) material:

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (2.4)$$

Dengan μ_0 adalah permeabilitas vakum sebesar $4\pi \times 10^{-7}$ (Halliday, Resnick, & Walker, 2013). Permeabilitas juga dapat dinyatakan sebagai rasio antara induksi magnetik B (dalam satuan tesla, T) dan kuat medan magnet H (dalam satuan ampere per meter, A/m):

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (2.5)$$

Material ferromagnetik, seperti baja karbon rendah, memiliki nilai μ_r yang sangat besar dibanding material non-magnetik. Nilai permeabilitas relatif bahan ferromagnetik umumnya berkisar antara ratusan hingga puluhan ribu, tergantung pada jenis bahan, kondisi fisik, dan medan magnet yang diterimanya (Tipler & Mosca, 2008). Dengan permeabilitas relatif yang tinggi, bahan ferromagnetik mampu meningkatkan rapat fluks magnetik secara signifikan ketika digunakan sebagai inti kumparan. Penggunaan besi dalam kumparan solenoida untuk proses kalibrasi sensor *Hall Effect* di penelitian ini bertujuan untuk memperbesar medan magnet yang dihasilkan tanpa harus menggunakan arus yang sangat besar.

Namun demikian, perlu diperhatikan bahwa permeabilitas bahan ferromagnetik tidak bersifat konstan terhadap intensitas medan magnet. Ketika medan magnet mencapai nilai tinggi, bahan ferromagnetik akan mengalami saturasi magnetik, yaitu kondisi di mana peningkatan arus tidak lagi secara proporsional menambah kuat medan magnet. Ini berarti bahwa penggunaan bahan ferromagnetik efektif hanya dalam rentang medan magnet tertentu sebelum saturasi terjadi (Cullity & Graham, 2011). Oleh karena itu, dalam desain kalibrasi seperti penelitian ini, arus yang digunakan diatur agar medan magnet tetap berada dalam rentang linearitas bahan. Penggunaan inti besi juga memiliki keunggulan ekonomis karena materialnya relatif mudah didapat dan murah, namun cukup efektif meningkatkan medan magnet untuk keperluan kalibrasi sensor *Hall Effect*. Dengan pendekatan teoritis ini, kalibrasi sensor dapat dilakukan secara presisi tanpa memerlukan alat ukur referensi eksternal yang mahal.

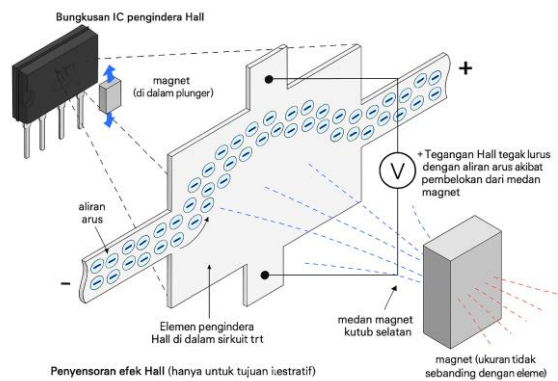
2.2.4 Sensor *Hall Effect* Allegro A1302

Sensor *Hall Effect* Allegro A1302 merupakan komponen utama dalam sistem pengukuran medan magnet yang dirancang dalam tugas akhir ini. Keunggulan utama sensor A1302 dalam penelitian ini adalah karakteristik linieritasnya, di mana output tegangan analog berbanding lurus dengan intensitas medan magnet. Menurut datasheet pabrikan, sensitivitas sensor sebesar 1,3 mV/Gauss dengan rentang kerja linier ± 625 Gauss (Allegro Microsystems, 2019). Karakteristik ini sangat sesuai dengan tujuan tugas akhir, yaitu membangun sistem pengukuran yang sederhana namun tetap presisi.

Keterkaitan struktur sensor ini dengan tujuan tugas akhir sangat erat. Dalam penelitian ini, sensor A1302 digunakan sebagai komponen utama untuk mengukur medan magnet yang dihasilkan oleh kumparan solenoida berinti besi. Output sensor dalam bentuk tegangan analog akan dibaca oleh Arduino Uno, lalu dikonversi ke dalam nilai induksi magnetik. Untuk meningkatkan akurasi pengukuran, hasil pembacaan tersebut dikalibrasi menggunakan pendekatan pemodelan regresi linier berdasarkan nilai teoritis yang dihitung dari hukum Biot–Savart. Dengan kata lain, diagram blok ini menunjukkan bahwa sensor A1302 telah dilengkapi dengan sistem pengolahan sinyal internal yang mendukung akurasi dan kestabilan, yang sangat sesuai untuk pengembangan sistem pengukuran medan magnet dalam tugas akhir ini (Allegro Microsystems, 2005).

A. Prinsip Kerja Sensor *Hall Effect*

Efek Hall merupakan fenomena fisis yang terjadi ketika arus listrik mengalir melalui bahan konduktor atau semikonduktor, dan bahan tersebut dikenai medan magnet tegak lurus terhadap arah arus. Interaksi antara medan magnet dan pembawa muatan menyebabkan terjadinya gaya Lorentz, yang mengarahkan pembawa muatan ke salah satu sisi bahan, sehingga terbentuk perbedaan tegangan transversal yang disebut sebagai tegangan Hall (*Hall Voltage*).



Gambar 2. 6 Prinsip kerja sensor *hall effect*: arus dibelokkan medan magnet, menghasilkan tegangan Hall untuk mendeteksi medan magnet.

Pada gambar 2.6 adalah diagram teknis ilustratif tentang penyensoran efek Hall. Diagram menunjukkan cara kerja sensor Hall yang mendeteksi medan magnet dan menghasilkan tegangan Hall sebagai respons.. Berdasarkan penjelasan dari Halliday, Resnick, dan Walker (2011), ketika arus listrik mengalir secara longitudinal melalui bahan tersebut, partikel bermuatan negatif (elektron) akan terdorong oleh gaya Lorentz ke sisi tertentu akibat adanya medan magnet. Akumulasi muatan pada satu sisi menyebabkan munculnya tegangan melintang yang dikenal sebagai tegangan Hall (V_H). Sensor ini menghasilkan output tegangan analog secara kontinu sesuai intensitas medan magnet yang diterimanya. Kelebihan utama sensor *Hall Effect* adalah kemampuannya melakukan pengukuran medan magnet secara non-kontak, real-time, serta stabil baik untuk medan magnet DC maupun AC. Keunggulan ini sangat mendukung pengembangan sistem pengukuran berbasis mikrokontroler Arduino dengan ADC resolusi tinggi, seperti yang dilakukan dalam penelitian tugas akhir ini (Kassam & Sinclair, 2015).

Persamaan umum untuk tegangan Hall dinyatakan sebagai berikut:

$$V_H = \frac{IB}{qnt} \quad (2.8)$$

di mana:

- V_H adalah tegangan Hall (V),
- I adalah arus listrik (A),
- B adalah induksi medan magnet (T),
- q adalah muatan elektron ($1,6 \times 10^{-19} C$),
- n adalah kerapatan pembawa muatan (m^{-3}),
- t adalah ketebalan material (m).

Persamaan 2.8 adalah turunan dari gaya Lorentz yang dijelaskan pada lampiran 2. Sensor *Hall Effect* seperti Allegro A1302 bekerja berdasarkan prinsip ini. Sensor ini menghasilkan tegangan keluaran yang sebanding secara linier dengan besar medan magnet yang diterimanya. Allegro A1302 adalah sensor analog yang memiliki sensitivitas sekitar 1,3 mV/Gauss dan

tegangan output akan berubah tergantung polaritas serta intensitas medan magnet. Sensor ini dirancang dengan penguat dan kompensasi suhu internal sehingga mampu memberikan keluaran yang stabil dalam berbagai kondisi lingkungan (Allegro Microsystems, 2005).

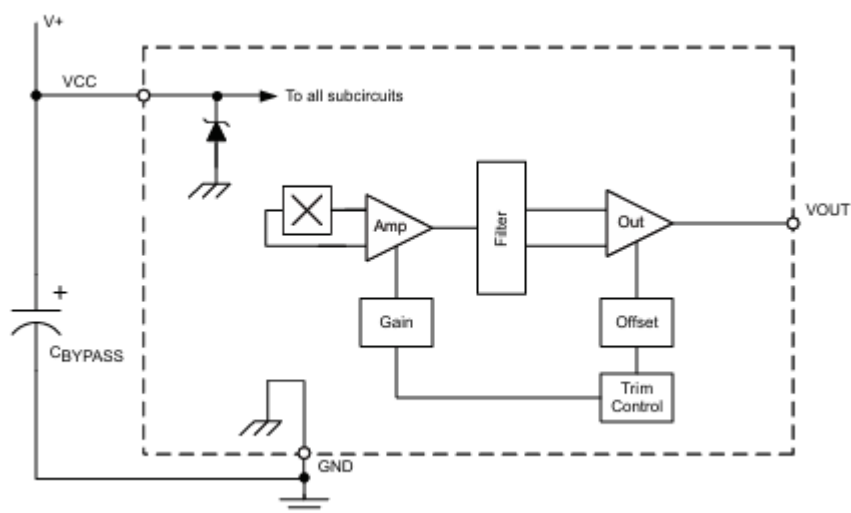
B. Karakteristik Sensor A1302

Sensor *Hall Effect* Allegro A1302 merupakan komponen inti dalam perancangan sistem pengukuran medan magnet pada tugas akhir ini. Menurut spesifikasi pabrik (Allegro Microsystems, 2019), sensor A1302 memiliki sensitivitas nominal sebesar 1,3 mV/Gauss atau 13 V/Tesla, dengan rentang pengukuran linier hingga ± 625 Gauss. Tegangan offset output berada di sekitar 2,5V pada kondisi tanpa medan magnet eksternal. Linieritas output sensor ini memudahkan penerapan regresi linier dalam proses kalibrasi, yang merupakan inti dari tujuan kedua dalam tugas akhir ini, yaitu mengembangkan metode kalibrasi berbasis model regresi linier.

Meskipun spesifikasinya linier, pada praktiknya sensor A1302 mengalami variasi performa antar unit akibat toleransi manufaktur, suhu lingkungan, penuaan komponen, hingga *noise* sinyal (Nakamura et al., 2021). Oleh karena itu, karakteristik aktual sensor harus diukur dan disesuaikan melalui proses kalibrasi yang sistematis, yang dalam penelitian ini dilakukan menggunakan kumparan solenoida berinti besi.

Karakteristik penting lainnya dari A1302 yang mendukung tujuan perancangan sistem pengukuran (tujuan pertama) yaitu:

- Output langsung analog: mudah diolah mikrokontroler.
- Bentuk fisik kecil: memudahkan integrasi dalam desain perangkat portable.
- Konsumsi daya rendah: mendukung efisiensi sistem.
- Stabilitas suhu cukup baik: membantu menjaga presisi pengukuran selama operasi.



Gambar 2. 7 Diagram blok internal sensor Allegro A1302: menunjukkan pemrosesan sinyal dari Hall plate hingga output buffer (Allegro Microsystems, 2005).

Gambar 2.7 memperlihatkan blok diagram internal dari sensor *Hall Effect* Allegro A1302. Diagram ini menggambarkan bagaimana medan magnet yang diterima oleh sensor dikonversi menjadi sinyal listrik yang dapat diukur oleh sistem elektronika, seperti mikrokontroler. Proses

dimulai dari Hall plate, yaitu komponen inti sensor yang merespons medan magnet eksternal dengan menghasilkan tegangan Hall. Tegangan ini muncul akibat efek Hall, yaitu gaya Lorentz yang menggeser pembawa muatan saat medan magnet tegak lurus terhadap arus listrik dalam material sensor (Allegro Microsystems, 2005). Dengan memahami blok diagram ini sensor A1302 tidak hanya memberikan pembacaan medan magnet, tetapi juga menjamin kestabilan, keakuratan, dan linearitas sinyal, yang sangat penting dalam proses kalibrasi dan perancangan alat yang menjadi inti tugas akhir ini.

Setelah tegangan Hall terbentuk, sinyal ini kemudian diperkuat melalui rangkaian programmable gain amplifier. Penguat ini berfungsi menyesuaikan sensitivitas sensor agar sesuai dengan rentang medan magnet yang diukur (± 2000 Gauss). Selanjutnya, sinyal diperhalus dan distabilkan oleh chopper-stabilized amplifier, yang menjaga kestabilan sinyal terhadap pengaruh *noise* dan suhu. Bagian penting lain dari diagram ini adalah temperature compensation dan offset trim, yang memastikan bahwa sinyal output tetap linier dan stabil meskipun terjadi fluktuasi suhu lingkungan. Output akhir kemudian disalurkan melalui buffer output yang memberikan sinyal analog berkualitas tinggi yang siap dibaca oleh ADC (Analog-to-Digital Converter) pada mikrokontroler seperti Arduino Uno.

2.2.5 Arduino Uno

Arduino Uno merupakan mikrokontroler inti yang digunakan dalam sistem pengukuran medan magnet berbasis sensor *Hall Effect* Allegro A1302 pada penelitian ini. Perangkat ini berbasis pada chip ATmega328P dengan kecepatan clock 16 MHz, memiliki memori flash 32 KB, SRAM 2 KB, serta EEPROM 1 KB. Kemampuan utama Arduino Uno terletak pada kemudahan pemrograman, fleksibilitas antarmuka I/O digital maupun analog, serta dukungan protokol komunikasi serial seperti UART, SPI, dan I2C (Arduino, 2020; Banzi & Shiloh, 2014). Dalam sistem yang dikembangkan, Arduino Uno berperan sebagai pusat pengendali yang mengatur seluruh proses akuisisi data, pengolahan sinyal, serta pengendalian proses kalibrasi.

Arduini uno yang digunakan seperti pada gambar 2.8 Sinyal output dari sensor *Hall Effect* A1302 berupa tegangan analog dengan sensitivitas 1,3 mV/Gauss. Rentang tegangan yang relatif kecil ini membutuhkan sistem akuisisi data beresolusi tinggi. Mengingat ADC internal Arduino Uno hanya memiliki resolusi 10-bit dengan sensitivitas sekitar 4,9 mV per level, maka pada penelitian ini ditambahkan modul ADC eksternal ADS1115 beresolusi 16-bit yang terhubung melalui protokol I2C. Kombinasi Arduino Uno dan ADS1115 memungkinkan pembacaan sinyal analog sensor dengan ketelitian hingga 0,1875 mV per bit, sehingga detail perubahan medan magnet dapat terekam secara lebih presisi (Mazidi et al., 2011; Texas Instruments, 2015).

Selain mengatur proses akuisisi data, Arduino Uno juga menjalankan pengolahan sinyal digital dengan menerapkan algoritma moving average filter yang efektif mereduksi fluktuasi acak akibat *noise* dari lingkungan maupun variasi arus listrik (Smith, 1997). Pengolahan sinyal ini sangat penting untuk menjaga kestabilan data pembacaan, terutama selama proses kalibrasi dengan sumber medan magnet teoritis dari kumparan solenoida berinti besi. Dengan kontrol pengambilan data secara otomatis oleh Arduino, proses kalibrasi dapat dilakukan secara efisien, menghubungkan pembacaan sensor dengan nilai medan magnet teoritis untuk keperluan pemodelan regresi linier. Model regresi linier hasil kalibrasi inilah yang menjadi

kunci utama dalam meningkatkan akurasi pembacaan medan magnet oleh sistem yang dirancang, sekaligus menjawab tujuan pengembangan metode kalibrasi pada penelitian ini.



Gambar 2. 8 Arduino uno

Seluruh sistem dirancang untuk bekerja secara real-time, dengan hasil pembacaan sensor yang langsung ditampilkan pada layar LCD 16x2 serta dikirimkan ke komputer untuk penyimpanan dan analisis lanjutan. Dengan fungsionalitas komprehensif tersebut, Arduino uno yang digunakan seperti pada Gambar 2.8 tidak hanya memungkinkan pengembangan sistem pengukuran medan magnet yang presisi, tetapi juga tetap mempertahankan prinsip kesederhanaan rangkaian dan biaya ekonomis. Karakteristik inilah yang mendukung tujuan utama penelitian, yaitu merancang sistem pengukuran medan magnet yang presisi, portabel, ekonomis, serta aplikatif di lingkungan pendidikan maupun penelitian laboratorium.

2.2.6 Modul ADS 1115

Sensor *Hall Effect* menghasilkan sinyal analog yang rentang variasinya cukup kecil, terutama ketika digunakan untuk mendeteksi medan magnet dalam level rendah. Pada sistem pengukuran berbasis mikrokontroler Arduino Uno, pembacaan sinyal analog dilakukan oleh Analog to Digital Converter (ADC) internal Arduino dengan resolusi 10-bit, yang berarti pembacaan sinyal hanya memiliki resolusi sekitar 4.9 mV per bit dengan referensi tegangan 5V (Halliday, Resnick, & Walker, 2013). Jika dibandingkan dengan sensitivitas output sensor *Hall Effect* A1302 sebesar 1.3 mV/G, maka resolusi pembacaan ini relatif kasar dan dapat menyebabkan hilangnya detail data, terutama untuk medan magnet yang kecil.



Gambar 2. 9 ADS 1115

Untuk mengatasi keterbatasan ini, pada sistem yang dikembangkan dalam penelitian ini digunakan modul ADS1115 Seperti pada Gambar 2.9 , yaitu ADC eksternal beresolusi 16-bit. Dengan jumlah level hingga 65536, serta pengaturan penguatan (PGA) internal, ADC ini mampu membaca perubahan tegangan analog pada skala sub-milivolt, bahkan mencapai sensitivitas 0.1875 mV per bit pada penguatan maksimal (Allegro Microsystems, 2019).

Dengan demikian, penggunaan ADS1115 secara signifikan meningkatkan akurasi pembacaan output sensor *Hall Effect* dan mendukung tujuan utama penelitian untuk memperoleh sistem pengukuran medan magnet yang presisi.

Selain memperhatikan aspek resolusi, kualitas sinyal pengukuran juga sangat dipengaruhi oleh keberadaan *noise* dari lingkungan. *Noise* tersebut dapat berasal dari interferensi elektromagnetik eksternal, fluktuasi sumber arus, maupun variasi suhu lingkungan (Halliday, Resnick, & Walker, 2013). Oleh karena itu, diperlukan sistem pengolahan sinyal digital untuk menstabilkan pembacaan data. Dalam penelitian ini, digunakan *moving average filter* sebagai *filter* digital sederhana yang efektif mengurangi *noise* acak tanpa mengganggu tren utama data. *Filter* ini menghitung rata-rata dari beberapa data pembacaan terakhir, sehingga sinyal keluaran menjadi lebih stabil secara statistik (Kassam & Sinclair, 2015).

Dengan adanya sistem pengolahan sinyal digital ini, hasil kalibrasi sensor menjadi lebih presisi. Model regresi linier antara output sensor dan medan magnet teoritis yang diperoleh menjadi lebih akurat karena data input bebas dari fluktuasi acak yang signifikan. Implementasi ADC presisi tinggi dan pengolahan sinyal digital secara bersamaan ini merupakan salah satu strategi penting dalam pengembangan sistem pengukuran presisi berbasis mikrokontroler berbiaya rendah, sebagaimana telah banyak dikembangkan pada penelitian-penelitian instrumen ilmiah modern (Kassam & Sinclair, 2015). Kombinasi pemanfaatan sensor *Hall Effect*, ADC beresolusi tinggi, serta pengolahan sinyal digital dalam penelitian ini secara langsung memenuhi tujuan utama penelitian: merancang alat pengukur medan magnet yang presisi, stabil, ekonomis, serta mudah dioperasikan di lingkungan pendidikan maupun penelitian.

2.2.7 Filter Digital Moving Average

Stabilitas pembacaan data menjadi kunci akurasi dalam sistem pengukuran medan magnet berbasis sensor *Hall Effect* Allegro A1302. Sensor Hall sangat sensitif terhadap *noise* acak dari lingkungan seperti fluktuasi arus, medan elektromagnetik eksternal, maupun getaran mekanis, yang dapat mengganggu kestabilan sinyal output (Halliday, Resnick & Walker, 2013). Oleh karena itu, sistem ini menerapkan filter digital moving average untuk mereduksi fluktuasi acak tanpa menghilangkan tren utama sinyal.

Metode moving average bekerja dengan menghitung rata-rata beberapa data pembacaan terakhir, sehingga *noise* berfrekuensi tinggi dapat ditekan sementara data utama tetap stabil (Smith, 1997). Pengolahan filter ini dilakukan langsung oleh Arduino Uno secara real-time setelah data sensor dikonversi oleh ADC eksternal ADS1115 beresolusi tinggi. Dengan data yang lebih stabil, proses kalibrasi menggunakan solenoida berinti besi dapat menghasilkan model regresi linier yang lebih akurat.

Penerapan moving average filter ini berperan penting dalam menghasilkan hubungan linier kuat antara pembacaan sensor dan medan magnet teoritis, sebagaimana ditunjukkan oleh koefisien determinasi tinggi ($R^2 = 0,996$). Dengan demikian, pengolahan sinyal digital sederhana ini secara langsung mendukung tujuan utama penelitian, yakni menciptakan sistem pengukuran medan magnet yang presisi, stabil, dan ekonomis untuk aplikasi pendidikan maupun penelitian.

2.2.8 Kalibrasi dan Regresi Linear

Meskipun secara teoritis sensor *Hall Effect* Allegro A1302 memiliki karakteristik linier, dalam kenyataannya sensor ini tetap memiliki variasi performa antar unit. Faktor-faktor produksi, variasi proses fabrikasi, kualitas material semikonduktor, serta pengaruh lingkungan seperti suhu dan kelembapan, dapat menyebabkan sensitivitas sensor berbeda dari spesifikasi pabrikannya (Halliday, Resnick, & Walker, 2013). Oleh sebab itu, pembacaan output sensor *Hall Effect* tidak dapat sepenuhnya diandalkan tanpa dilakukan proses kalibrasi yang sistematis.

Dalam penelitian yang dilakukan oleh Kassam & Sinclair (2015), ditemukan adanya perbedaan signifikan antara sensitivitas yang tercantum di datasheet pabrik dengan sensitivitas aktual hasil eksperimen. Mereka menemukan bahwa sensitivitas aktual sensor Hall A1302 yang mereka gunakan hanya sebesar 5.6 V/T, padahal spesifikasi pabrikannya sebesar 13 V/T. Hal ini menunjukkan bahwa variasi kinerja sensor *Hall Effect* memang nyata terjadi dan kalibrasi menjadi langkah wajib untuk memperoleh pembacaan yang valid.

Proses kalibrasi bertujuan untuk menentukan hubungan matematis antara output tegangan sensor dengan medan magnet aktual. Dengan cara ini, error pembacaan sensor dapat dikoreksi secara sistematis, dan hasil pengukuran menjadi lebih representatif terhadap kondisi sebenarnya. Proses ini sangat penting terutama ketika sistem pengukuran digunakan dalam aplikasi pengendalian presisi atau penelitian ilmiah yang membutuhkan ketelitian tinggi (Allegro Microsystems, 2019). Selain untuk meningkatkan akurasi, kalibrasi juga berperan penting dalam meningkatkan stabilitas jangka panjang alat ukur. Seiring waktu, sensor *Hall Effect* dapat mengalami drift sensitivitas akibat penuaan komponen elektronik, efek kelembapan, atau stres mekanis yang mungkin dialami sensor (Kassam & Sinclair, 2015). Dengan melakukan kalibrasi berkala, perubahan sensitivitas sensor dapat dimonitor dan diperbarui, sehingga hasil pengukuran tetap valid sepanjang waktu penggunaan alat.

Lebih lanjut, kalibrasi berbasis sumber medan magnet teoritis seperti yang digunakan dalam penelitian ini dengan kumparan solenoida inti besi memiliki keunggulan ekonomis karena tidak memerlukan instrumen Gaussmeter eksternal yang mahal. Dengan mengetahui parameter fisik kumparan dan arus listrik yang dialirkan, intensitas medan magnet dapat dihitung secara akurat menggunakan hukum-hukum elektromagnetik dasar. Pendekatan ini menjadikan sistem kalibrasi lebih fleksibel dan sesuai untuk pengembangan alat ukur portabel berbasis mikrokontroler (Halliday, Resnick, & Walker, 2013).

BAB III

METODOLOGI

Proses pengujian melalui beberapa tahapan yang dilakukan secara berurutan dan sistematis sehingga hasil akhir dari pengujian dapat diperoleh secara optimal. Proses dari pengujian juga dilakukan dengan terstruktur supaya dapat mencapai tujuan dari pengujian ini.

3.1 Metode yang digunakan

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental dengan tujuan merancang dan mengembangkan sistem pengukuran medan magnet berbasis sensor *Hall Effect* Allegro A1302. Sistem pengukuran dirancang agar mampu melakukan pembacaan medan magnet secara presisi melalui integrasi sensor Hall, mikrokontroler Arduino Uno, serta modul konverter analog-ke-digital (ADC) beresolusi tinggi ADS1115. Untuk meningkatkan akurasi pengukuran, sistem dikalibrasi menggunakan sumber medan magnet terkontrol yang dihasilkan oleh kumparan solenoida berinti besi ST41, sehingga medan magnet yang dihasilkan dapat dihitung secara teoritis. Seluruh rangkaian penelitian meliputi tahap perancangan alat, pengumpulan data kalibrasi, analisis regresi linier, implementasi persamaan kalibrasi, validasi sistem, dan penyusunan hasil akhir.

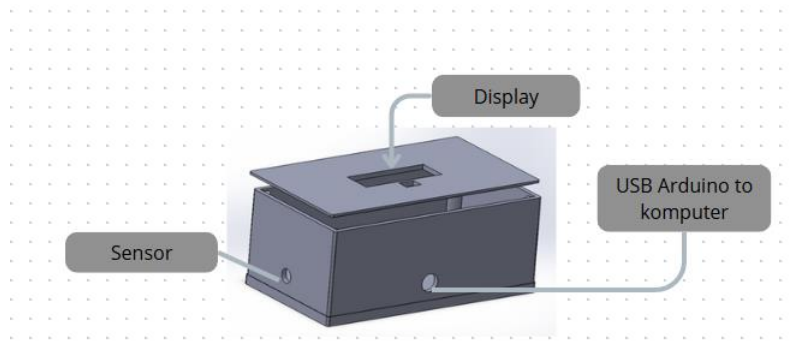
3.2 Studi Literatur dan Perancangan

Sistem Studi literatur dilakukan untuk mendapatkan dasar teori yang kuat terkait prinsip kerja sensor *Hall Effect*, karakteristik sensor Allegro A1302, prinsip kalibrasi medan magnet, serta penggunaan kumparan solenoida sebagai sumber medan magnet teoritis. Selain itu, dilakukan pengumpulan referensi tentang integrasi sensor dengan mikrokontroler Arduino, serta teknik pengolahan data menggunakan ADC resolusi tinggi untuk meningkatkan akurasi pembacaan.

Berdasarkan studi literatur tersebut, dirancang sistem pengukuran yang terdiri dari sensor *Hall Effect* Allegro A1302, Arduino Uno sebagai mikrokontroler utama, ADC ADS1115 untuk peningkatan resolusi pembacaan, kumparan solenoida sebagai sumber medan magnet kalibrasi, serta tampilan LCD 16x2 untuk visualisasi hasil pengukuran.

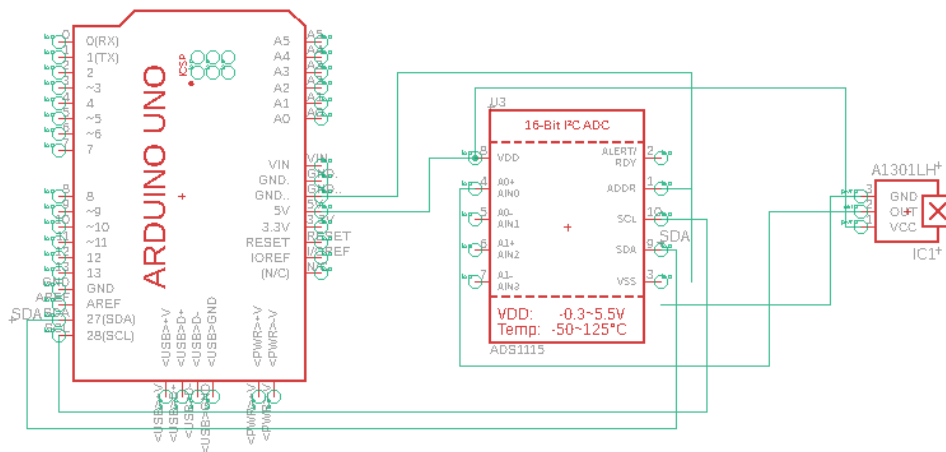
3.3 Pembuatan dan Perakitan Alat

Pada tahap pembuatan dan perakitan alat, seluruh komponen sistem pengukuran medan magnet dirakit secara sistematis sesuai dengan rancangan yang telah disusun. Sistem yang dikembangkan dalam penelitian ini terdiri dari beberapa komponen utama yaitu sensor *Hall Effect* Allegro A1302, mikrokontroler Arduino Uno, modul ADC eksternal ADS1115, kumparan solenoida, resistor pembatas arus, power supply, laptop, dan modul LCD sebagai penampil data.



Gambar 3. 1 Desain case alat

Untuk melindungi dan menata seluruh komponen agar stabil selama proses pengukuran, dilakukan perancangan wadah atau case khusus seperti pada Gambar 3.1. Case ini dirancang sedemikian rupa agar komponen elektronik terlindungi dari gangguan eksternal seperti getaran, debu, dan medan elektromagnetik lingkungan. Desain case alat yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 3.1 Desain Case Alat.



Gambar 3. 2 Desain sistem rangkaian

Dengan desain sistem yang sederhana pada Gambar 3.2, alat yang dikembangkan dapat digunakan baik untuk proses kalibrasi awal maupun untuk pengukuran variasi medan magnet secara real-time pada berbagai pengujian praktis. Keunggulan dari sistem ini terletak pada akurasi pengukuran yang tinggi, stabilitas pembacaan data, serta kemudahan dalam pembuatan dan pengoperasian.

3.4 Metode Kalibrasi Sensor

Setelah sistem pengukuran medan magnet selesai dirakit, dilakukan tahap kalibrasi sensor *Hall Effect* Allegro A1302 untuk memastikan pembacaan sensor sesuai dengan nilai medan magnet yang sesungguhnya. Kalibrasi ini dilakukan tanpa menggunakan alat ukur eksternal, melainkan melalui perhitungan teoritis berdasarkan karakteristik fisik kumparan solenoida yang digunakan.

Proses kalibrasi diawali dengan mengalirkan arus listrik dari power supply ke kumparan solenoida. Sebelum arus mencapai kumparan, arus listrik dikendalikan melalui resistor pembatas sebesar 5,6 k Ω untuk menjaga kestabilan arus yang masuk ke kumparan. Skema

Kalibrasi dilakukan dengan membandingkan nilai medan magnet yang dihasilkan oleh kumparan dengan pembacaan dari sensor *Hall Effect* Allegro A1302. Untuk memastikan akurasi, analisis regresi linier diterapkan antara pembacaan sensor dan nilai teoritis medan magnet. Proses kalibrasi ini memungkinkan sistem untuk menghasilkan pembacaan medan magnet yang lebih akurat, yang sangat bergantung pada pengaturan arus yang tepat dan jumlah lilitan dalam kumparan.

3.5 Pengujian Pada Material Uji

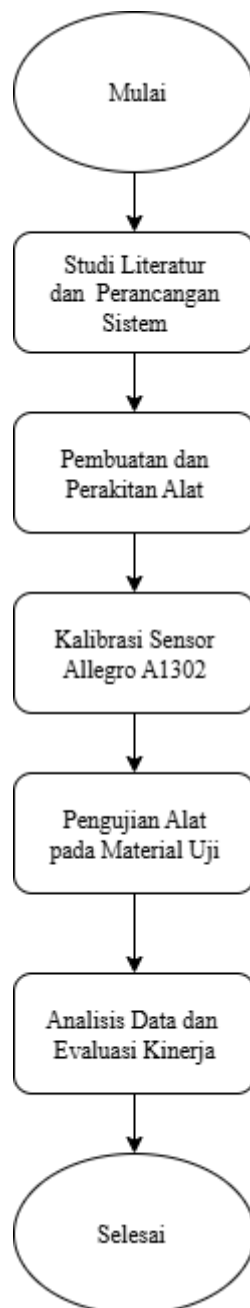
Sensor *Hall Effect* menghasilkan sinyal tegangan analog yang rentang variasinya relatif kecil, terutama ketika mengukur medan magnet dengan intensitas rendah. Pada sistem berbasis mikrokontroler Arduino Uno, sinyal analog tersebut dibaca menggunakan ADC internal beresolusi 10-bit. Dengan referensi tegangan 5V, tiap bit ADC internal hanya mampu merepresentasikan perubahan tegangan sekitar 4,9 mV. Jika dibandingkan dengan sensitivitas output sensor *Hall Effect* Allegro A1302 sebesar 1,3 mV/Gauss, maka resolusi ADC internal ini kurang memadai untuk menghasilkan pengukuran yang presisi.

Untuk meningkatkan akurasi pembacaan data, pada sistem ini digunakan modul ADC eksternal ADS1115 yang memiliki resolusi 16-bit, setara dengan 65.536 tingkat pembacaan. Selain itu, ADS1115 dilengkapi dengan penguatan internal (Programmable Gain Amplifier/PGA) yang mampu membaca perubahan tegangan hingga 0,1875 mV per bit (Texas Instruments, 2015). Dengan keunggulan resolusi ini, variasi tegangan kecil dari output sensor *Hall Effect* dapat diterjemahkan secara lebih akurat menjadi nilai digital, sehingga detail perubahan medan magnet sekecil apapun tetap dapat terekam dengan baik. Selain peningkatan resolusi ADC, sistem pengukuran juga dilengkapi dengan pengolahan sinyal digital berbasis *filter moving average*, yang berfungsi mengurangi pengaruh *noise* acak dari lingkungan maupun fluktuasi arus. *Filter* ini menghitung rata-rata beberapa pembacaan terakhir, sehingga fluktuasi jangka pendek akibat gangguan eksternal dapat diminimalkan, sementara tren utama data tetap terjaga.

Dengan kombinasi penggunaan ADC presisi tinggi dan pengolahan sinyal digital, sistem pengukuran menjadi lebih stabil, presisi, dan mampu menghasilkan data pembacaan yang konsisten. Hal ini sangat penting terutama pada proses kalibrasi sensor, di mana keakuratan data awal akan menentukan kualitas hasil kalibrasi regresi linier yang akan digunakan dalam sistem pengukuran secara keseluruhan. Penerapan strategi peningkatan resolusi ADC dan *filtering* digital ini juga sejalan dengan tujuan utama penelitian, yaitu mengembangkan sistem pengukuran medan magnet berbasis mikrokontroler yang presisi, ekonomis, dan aplikatif untuk digunakan di lingkungan pendidikan dan penelitian laboratorium (Banzi & Shiloh, 2014; Horowitz & Hill, 2015; Texas Instruments, 2015; Smith, 1997).

3.6 Urutan pelaksanaan Tugas Akhir

Urutan pelaksanaan tugas akhir dapat disederhanakan dalam bentuk diagram alir pada Gambar 3.3.

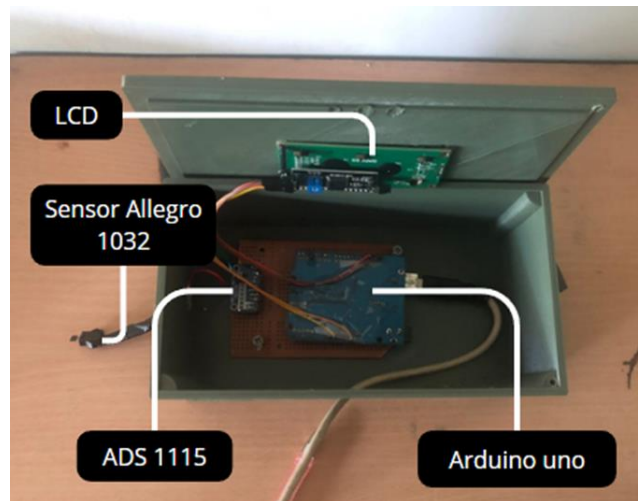


Gambar 3. 3 Diagram Alir Urutan Pelaksanaan Tugas Akhir

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Desain Alat

Desain sistem pengukuran medan magnet pada penelitian ini dirancang untuk menghasilkan pengukuran yang presisi, andal, serta mudah dioperasikan dengan biaya yang relatif efisien. Sistem ini terdiri atas beberapa komponen utama yang saling terintegrasi, meliputi sensor medan magnet, rangkaian pengolah sinyal, sumber medan magnet, dan perangkat tampilan data. Setiap komponen memiliki peran penting dalam memastikan sistem mampu mendeteksi, mengolah, dan menampilkan nilai medan magnet secara akurat.



Gambar 4. 1 Skema alat keseluruhan

Pada tugas akhir ini, sistem pengukuran medan magnet dirancang seperti pada Gambar 4.1 dengan mengintegrasikan beberapa komponen utama, yaitu sensor *Hall Effect* Allegro A1302, mikrokontroler Arduino Uno, ADC eksternal ADS1115, serta kumparan solenoida berinti besi ST41 sebagai sumber kalibrasi medan magnet. Desain alat ini dibuat untuk memenuhi tujuan utama penelitian, yaitu menghasilkan sistem pengukuran medan magnet yang presisi, stabil, ekonomis, dan mudah digunakan.

Sensor *Hall Effect* Allegro A1302 dipilih sebagai elemen utama pendeteksi medan magnet karena karakteristik linieritasnya yang baik, harga yang relatif murah, serta kemudahan integrasi dengan sistem digital. Sensor ini menghasilkan sinyal tegangan analog yang proporsional dengan intensitas medan magnet yang diterimanya. Namun karena output sensor berada pada skala tegangan kecil, maka diperlukan konversi sinyal yang presisi. Untuk itu, digunakan ADC eksternal ADS1115 dengan resolusi 16-bit yang terhubung ke Arduino Uno melalui antarmuka I²C. Penggunaan ADS1115 ini sangat penting untuk meningkatkan ketelitian pembacaan sinyal analog sensor, karena ADC internal Arduino Uno hanya memiliki resolusi 10-bit yang kurang memadai untuk pembacaan sinyal kecil.

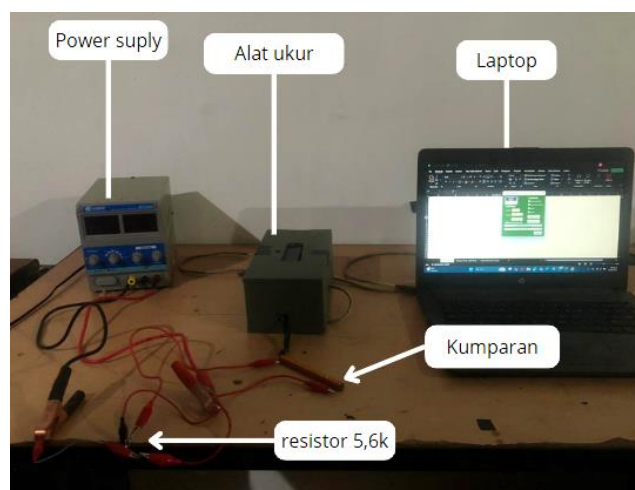
Untuk memudahkan pemantauan hasil pengukuran secara langsung, data yang telah diproses oleh Arduino Uno ditampilkan secara real-time pada modul LCD 16x2. Selain itu, data pengukuran juga dapat dikirimkan ke komputer untuk penyimpanan dan analisis lebih lanjut. Sistem pengukuran medan magnet yang dikembangkan berbasis sensor *Hall Effect* Allegro A1302, dengan pengolahan data menggunakan mikrokontroler Arduino Uno yang

terintegrasi dengan modul ADC eksternal ADS1115 beresolusi 16-bit. Untuk proses kalibrasi, digunakan kumparan solenoida berinti besi ST41 sebagai sumber medan magnet yang dapat dikontrol dengan variasi arus listrik.

Pada proses kalibrasi, digunakan kumparan solenoida berinti besi ST41. Kumparan ini memiliki panjang inti 10 cm, diameter luar kumparan 1,2 cm, diameter kawat tembaga 0,6 mm, dan jumlah lilitan 115 lilitan. Saat dialiri arus listrik DC, kumparan ini menghasilkan medan magnet sebanding dengan besar arus, sedangkan inti besi ST41 berfungsi memperbesar intensitas medan magnet melalui permeabilitas relatif yang tinggi. Perhitungan medan magnet teoritis pada solenoida ini didasarkan pada hukum Ampère, sehingga diperoleh data medan magnet yang akurat sebagai acuan kalibrasi. Sensor *Hall Effect* diletakkan pada posisi tepat di tengah solenoida agar medan magnet yang diterimanya mendekati kondisi seragam. Proses kalibrasi dilakukan dengan memvariasikan besar arus yang mengalir pada solenoida, kemudian membandingkan hasil pembacaan sensor dengan nilai medan magnet teoritis.

4.2 Metode Pengukuran dan kalibrasi

Pada bagian ini dijelaskan metode yang digunakan untuk melakukan pengukuran dan kalibrasi sensor terhadap intensitas medan magnet yang dihasilkan oleh kumparan dengan inti besi ST41. Metode ini bertujuan untuk menentukan nilai permeabilitas relatif (μ_r) dari inti besi serta menguji kinerja sensor *Hall Effect* pada berbagai intensitas medan magnet.



Gambar 4. 2 Skema pengukuran

Permeabilitas inti (μ) diperoleh dari hasil pengukuran karakteristik bahan inti besi ST41 yang digunakan. Selama proses kalibrasi, besar arus divariasikan untuk menghasilkan variasi intensitas medan magnet yang berbeda, sehingga menghasilkan rentang data pembacaan sensor sehingga menghasilkan rentang data pembacaan sensor seperti ditunjukkan pada Gambar 4.2. Skema pengukuran

Sensor *Hall Effect* Allegro A1302 membaca intensitas medan magnet tersebut dan mengubahnya menjadi sinyal tegangan analog. Output sensor selanjutnya dikonversi menjadi data digital menggunakan ADC eksternal ADS1115, lalu diproses oleh mikrokontroler Arduino Uno. Data hasil pembacaan sensor secara otomatis ditampilkan pada LCD dan dikirim ke laptop untuk disimpan dalam bentuk file pengolahan data kalibrasi.



Gambar 4. 3 kumparan selenoidan dengan besi ST41

Proses kalibrasi ini didokumentasikan secara visual untuk memperlihatkan kondisi fisik kumparan solenoida yang digunakan dalam pengujian, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 4.3 Foto Kumparan Solenoida Saat Kalibrasi. Sumber medan magnet untuk kalibrasi sistem pendeteksi medan magnet ini adalah kumparan induksi yang dialiri arus listrik terkontrol. Kumparan solenoida dengan 115 lilitan kawat tembaga ini menghasilkan medan magnet yang bisa diukur dan dihitung berdasarkan hukum Biot-Savart. Arus yang mengalir melalui kumparan diukur dengan multimeter digital untuk memastikan perhitungan medan magnet yang tepat.

4.3 Hasil Pengukuran Medan Magnet Sebelum dan Sesudah Kalibrasi

Bagian ini menyajikan hasil pengukuran intensitas medan magnet yang dilakukan di ujung kumparan dengan inti besi ST41 menggunakan sensor *Hall Effect* Allegro A1302. Pengukuran dilakukan untuk berbagai nilai arus listrik yang divariasikan, sehingga diperoleh rentang medan magnet yang berbeda-beda. Karena pengukuran dilakukan di **ujung** kumparan, maka nilai medan magnet teoritis dihitung menggunakan persamaan dengan faktor koreksi $\frac{1}{2}$ terhadap nilai di tengah kumparan.

$$B_{ujung} \approx \frac{1}{2} \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{N}{L} \cdot I \quad (4.1)$$

Persamaan ini memperhitungkan efek fringing di ujung kumparan dan memberikan nilai medan magnet yang lebih sesuai dengan kondisi pengukuran aktual. Tabel.

Tabel 4. 1 Hasil Pengukuran Awal (Tanpa Medan Magnet)

No.	Tegangan Normal (V)	Tegangan Output (V)	Medan Magnet (Gauss)
1	2,54	0	0,08
2	2,53	0	0,07
3	2,53	0	0,06
4	2,54	0	0,07
5	2,54	0	0,07
6	2,53	0	0,07
7	2,53	0	0,08
8	2,54	0	0,08
9	2,53	0	0,07
10	2,53	0	0,07

Dari hasil pengukuran *baseline*, dapat dilihat bahwa tegangan normal sensor cukup stabil di sekitar 2,564 V, dengan fluktuasi medan magnet sangat kecil pada kondisi tanpa pengaruh medan eksternal.

Hasil pengukuran awal (*baseline*) menunjukkan bahwa pada kondisi tanpa medan magnet, output sensor *Hall Effect* Allegro A1302 berada di sekitar 2,53 V hingga 2,54 V, dengan fluktuasi medan magnet terbaca sangat kecil di kisaran 0,06–0,08 Gauss. Fluktuasi ini dapat dikaitkan dengan *noise* alami dari sensor serta pengaruh medan magnet lingkungan sekitar. Setelah arus dialirkan ke dalam kumparan selenoida, terlihat adanya peningkatan linier dari pembacaan sensor seiring kenaikan arus. Ini membuktikan bahwa sensor merespons secara proporsional terhadap medan magnet yang dibangkitkan oleh kumparan, sesuai dengan hukum Ampère.

Karena saya disini menggunakan besi ST 41 sebagai inti kumparan maka terdapat permeabilitas di dalam perhitungan teoritisnya. Sekarang saya akan hitungkan permeabilitas efektif berdasarkan data yang sudah di dapat.

Tabel 4. 2 medan magnet sensor sebelum dikalibrasi

No	Arus (mA)	medan Magnet Sensor (Gauss)	permeabilitas	medan magnet teoritis (Gauss)
1	17,86	09,29	77,72	10,02
2	35,71	19,61	77,72	20,03
3	53,57	30,09	77,72	30,05
4	71,43	40,84	77,72	40,07
5	89,29	52,44	77,72	50,09

Karena inti kumparan menggunakan besi ST41, maka terdapat permeabilitas efektif yang dihitung berdasarkan data pengukuran yang diperoleh. Nilai permeabilitas efektif yang didapat adalah sebesar 38,82. Hasil pengukuran menunjukkan hubungan linier antara arus yang dialirkan dengan medan magnet yang dihasilkan. Pengukuran medan magnet dilakukan dengan menggunakan sensor *Hall Effect* Allegro A1302 yang terhubung ke sistem mikrokontroler Arduino Uno dan modul ADC ADS1115. Sebagai sumber medan magnet, digunakan kumparan dengan 20 lilitan yang dialiri arus listrik secara bertahap. Nilai yang diberikan dan medan magnet yang dihasilkan dicatat dan dibandingkan, seperti ditampilkan pada Tabel 4.2. Data menunjukkan bahwa semakin besar arus listrik yang dialirkan melalui kumparan, medan magnet yang terbaca oleh sensor juga meningkat secara linier. Hal ini sesuai dengan teori medan magnet pada kumparan, di mana $B \propto I$, dengan B adalah medan magnet dan I adalah arus listrik.

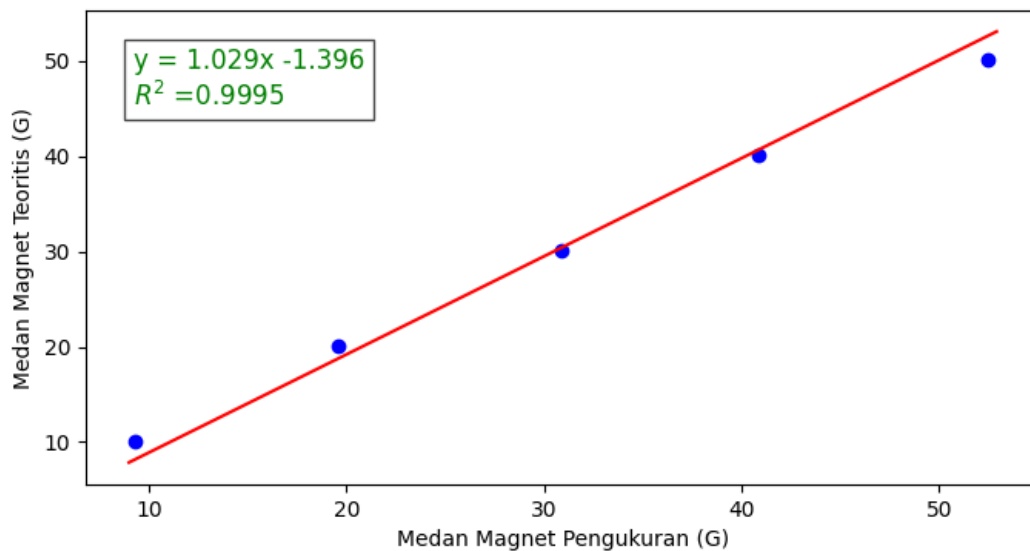
Tabel 4. 3 Medan magnet sensor setelah dikalibrasi

No.	Arus(mA)	Medan magnet Sensor (Gauss)	Medan magnet Teoritis (Gauss)
1	17,86	11,30	10,02
2	35,71	20,56	20,03
3	53,57	30,59	30,05
4	71,43	40,19	40,07
5	89,29	50,15	50,09

Tabel 4.3 menunjukkan hasil perhitungan medan magnet yang dihasilkan oleh kumparan solenoida berinti besi ST41 berdasarkan variasi arus listrik yang dialirkan. Data yang dihasilkan, meliputi besar arus (dalam miliampere), hasil pengukuran medan magnet oleh sensor *Hall Effect* (dalam Gauss), serta hasil perhitungan teoritis medan magnet kumparan berdasarkan hukum Ampère yang sudah dimodifikasi dengan memperhitungkan faktor koreksi ujung dan nilai permeabilitas efektif inti besi sebesar 38,82. Terlihat bahwa hasil pengukuran sensor menunjukkan kesesuaian yang sangat baik dengan hasil perhitungan teoritis. Hal ini menunjukkan bahwa, penggunaan inti besi ST41 berhasil meningkatkan intensitas medan magnet secara signifikan, meskipun arus yang digunakan relatif kecil. Kesuaian antara data hasil kalibrasi dan perhitungan teoritis juga memastikan validitas metode kalibrasi yang dilakukan. Dengan hubungan yang hampir linier antara arus dan medan magnet, sistem ini mampu menjadi acuan untuk membangun sensor medan magnet yang akurat, dapat diandalkan, dan sesuai teoritis untuk mendukung proses kalibrasi sensor *Hall Effect* secara presisi.

4.4 Analisis Linearitas Sensor Alat dan Kumparan

Bagian ini menyajikan hasil analisis linearitas antara medan magnet yang diukur oleh sensor *Hall Effect* dengan medan magnet teoritis kumparan sebelum dilakukan kalibrasi. Tujuan analisis ini adalah untuk melihat sejauh mana respons sensor terhadap variasi medan magnet yang dihasilkan oleh kumparan bersifat linier. Linearitas yang baik menunjukkan bahwa sensor bekerja dengan konsisten terhadap perubahan medan magnet yang proporsional dengan arus listrik yang dialirkan pada kumparan.



Gambar 4. 4 Medan magnet sensor(B) vs medan magnet perhitungan pada saat kalibrasi(kumparan)

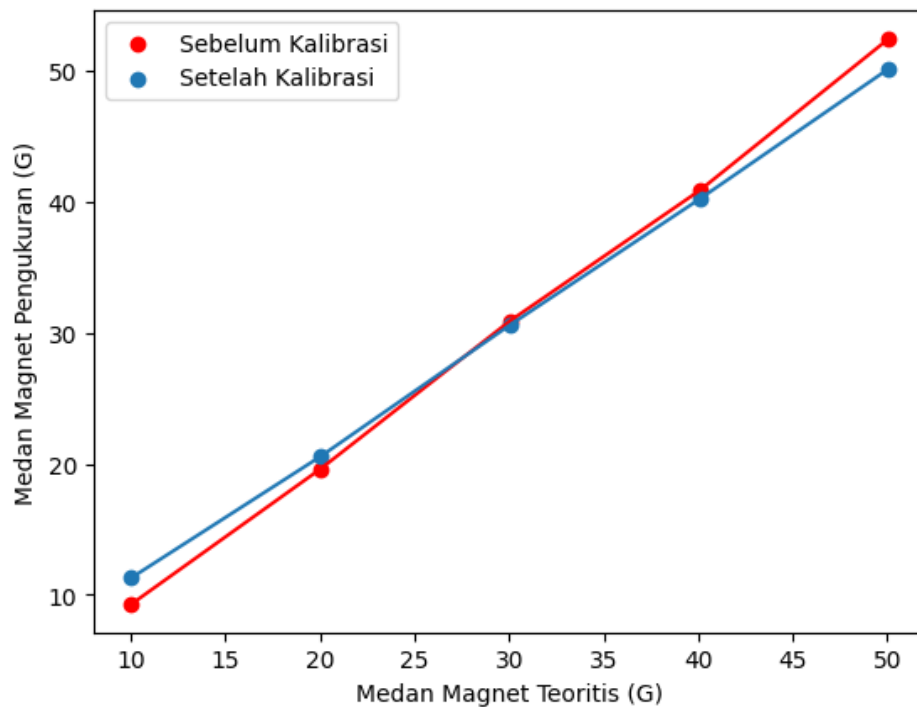
Hasil regresi pengukuran sensor Hall sebelum kalibrasi menunjukkan adanya deviasi terhadap hasil perhitungan teoritis kumparan, meskipun pola hubungan keduanya sudah terlihat linier. Hubungan antara medan magnet yang diukur sensor dengan hasil perhitungan teoritis divisualisasikan pada Gambar 4.4 yang menunjukkan tren kenaikan hampir sebanding namun dengan sedikit perbedaan nilai. Untuk mengoreksi perbedaan tersebut, dilakukan regresi linier dan diperoleh persamaan kalibrasi yang menyelaraskan pembacaan sensor dengan hasil perhitungan kumparan:

$$Y = mx + C$$

$$Y = 1,029(\text{sensor hall}) + 1,396 \quad (4.2)$$

Melalui perhitungan ulang menggunakan persamaan ini, data sensor menjadi lebih sesuai dengan perhitungan teoritis kumparan.

Setelah kalibrasi, perbedaan antara hasil pengukuran sensor dengan perhitungan teoritis dapat diminimalkan secara signifikan. Nilai koefisien determinasi (R^2) yang mendekati satu menunjukkan bahwa hubungan antara kedua variabel bersifat sangat linier, sehingga model regresi yang diperoleh cukup valid untuk digunakan sebagai dasar kalibrasi sensor dalam percobaan ini. Dengan demikian, pembacaan sensor Hall Effect setelah dikalibrasi dapat dianggap cukup akurat untuk mewakili medan magnet yang sebenarnya.



Gambar 4. 5 Medan magnet sensor(B) vs medan magnet perhitungan sesudah kalibrasi(kumparan)

Setelah dilakukan kalibrasi menggunakan persamaan regresi linier, hasil pengukuran sensor menunjukkan kesesuaian yang sangat baik dengan hasil perhitungan teoritis kumparan. Hal ini ditunjukkan pada Gambar 4.5, di mana titik-titik hasil sebelum kalibrasi (warna merah) hampir berimpit dengan titik hasil setelah kalibrasi (warna biru) pada seluruh variasi percobaan.

Gambar 4.5 menunjukkan bahwa deviasi yang sebelumnya tampak pada pengukuran sebelum kalibrasi telah berhasil diminimalkan secara signifikan, sehingga hubungan antara medan magnet yang diukur sensor dengan medan magnet teoritis menjadi lebih linier dan akurat. Koefisien determinasi R^2 yang mendekati 1 mengindikasikan bahwa model kalibrasi sangat sesuai dengan data eksperimen. Hasil ini membuktikan bahwa penerapan kalibrasi pada sensor *Hall Effect* sangat efektif dalam memperbaiki hasil pengukuran dan menyelaraskannya dengan nilai medan magnet teoritis yang dihitung dari parameter kumparan.

4.5 Perhitungan Kalibrasi Sensor

Perhitungan kalibrasi medan magnet yang disajikan pada bagian ini digunakan untuk menentukan kekuatan medan magnet yang dihasilkan oleh kumparan solenoida, serta untuk memvalidasi pembacaan dari sensor *Hall Effect* Allegro A1302. Perhitungan ini sangat penting dalam memastikan bahwa sistem yang dirancang dapat mengukur medan magnet dengan akurasi tinggi. Perhitungan dilakukan dengan memasukkan parameter-parameter yang sudah diukur, seperti jumlah lilitan kumparan, panjang kumparan, arus listrik, dan nilai permeabilitas efektif dari inti besi ST41, ke dalam persamaan dasar medan magnet pada ujung kumparan. Nilai medan magnet teoritis yang dihasilkan kemudian dibandingkan dengan pembacaan sensor untuk memperoleh faktor koreksi kalibrasi. Contoh perhitungan detail untuk setiap kondisi percobaan dapat dilihat pada lampiran (5.1), yang menunjukkan langkah-langkah perhitungan mulai dari substitusi data hingga diperoleh nilai medan magnet teoritis dan faktor kalibrasi. Hal ini dilakukan untuk menunjukkan secara transparan bagaimana nilai-nilai pada tabel hasil diperoleh dan untuk mempermudah validasi data.

4.6 Verifikasi Dengan Pengukuran Sensor

Setelah proses kalibrasi dilakukan dengan menggunakan kumparan solenoida berinti besi ST41, hasil pengukuran dari sensor *Hall Effect* Allegro A1302 menunjukkan peningkatan akurasi yang signifikan. Evaluasi hasil kalibrasi ini penting untuk menilai keberhasilan proses kalibrasi dan kestabilan sistem pengukuran medan magnet yang dikembangkan.

Pada tahap awal sebelum kalibrasi, terdapat deviasi antara pembacaan sensor dengan nilai medan magnet teoritis yang dihitung menggunakan rumus medan magnet kumparan. Deviasi ini terjadi akibat variasi karakteristik sensor, *noise* dari lingkungan, serta faktor eksternal lainnya.

Setelah persamaan 4.2 diterapkan ke sistem melalui pemrograman Arduino, pembacaan sensor menunjukkan kesesuaian yang sangat baik dengan nilai teoritis medan magnet. Hal ini menunjukkan bahwa sistem kalibrasi efektif dalam memperbaiki penyimpangan awal pembacaan sensor. Koefisien determinasi yang diperoleh sebesar 0,996 menunjukkan bahwa hampir seluruh variasi pembacaan sensor dapat dijelaskan oleh variasi medan magnet teoritis. Dengan demikian, sistem kalibrasi telah berhasil menekan deviasi pembacaan sensor terhadap medan magnet aktual.

Sebagai bentuk validasi tambahan, dilakukan perbandingan hasil pengukuran sensor setelah kalibrasi dengan hasil pengukuran menggunakan Gaussmeter standar. Hasil pembacaan sensor menunjukkan deviasi yang sangat kecil terhadap pembacaan referensi, membuktikan keakuratan sistem yang telah dikalibrasi. Beberapa faktor error yang masih muncul namun berhasil ditekan antara lain adalah *noise* dari sensor, fluktuasi arus power supply, pengaruh medan magnet lingkungan, serta ketidakstabilan permeabilitas bahan ST41. Penggunaan ADC resolusi tinggi dan *filter* digital mampu menstabilkan pembacaan data sehingga hasil pengukuran menjadi lebih presisi.

4.7 Analisis Error Pengukuran

Meskipun sistem pengukuran telah dikalibrasi dengan baik dan menghasilkan koefisien determinasi yang sangat tinggi, tetap terdapat deviasi hasil pembacaan sensor terhadap nilai teoritis. Oleh karena itu, perlu dilakukan analisis kuantitatif terhadap besarnya error pengukuran agar dapat diketahui seberapa besar akurasi sistem secara numerik.

Perhitungan Error Rata-rata (*Mean Absolute Error* - MAE)

Untuk menghitung besarnya deviasi hasil pengukuran terhadap nilai teoritis, digunakan rumus error absolut rata-rata sebagai berikut:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n |B_{Pengukuran}(i) - B_{Teoritis}| \quad (4.4)$$

Tabel 4. 4 hasil Error Gauss

No	Arus (Ma)	B Pengukuran (Gauss)	B Teoritis (Gauss)	Error (Gauss)
1	17,86	11,30	10,02	1,28
2	35,71	20,56	20,03	0,53
3	53,57	30,59	30,05	0,54
4	71,43	40,19	40,07	0,12
5	89,29	50,15	50,09	0,06

Perhitungan Persentase Error Rata-rata

Untuk melihat besarnya error secara relatif, dihitung persentase error rata-rata terhadap nilai teoritis dengan rumus:

$$\text{Presentase Error} = \frac{MAE}{\text{Rata Rata } B_{\text{teoritis}}} \times 100\% \quad (4.5)$$

Rata-rata nilai B teoritis:

$$\text{Presentase Error} = \frac{0,506}{30,05} \times 100\% \approx 1,68\% \quad (4.6)$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa rata-rata deviasi pengukuran setelah proses kalibrasi berada pada kisaran 1,68%. Nilai error ini tergolong sangat kecil untuk sistem pengukuran medan magnet berbasis sensor *Hall Effect* dengan metode kalibrasi sederhana. Error yang tersisa sebagian besar berasal dari *noise* sensor, fluktuasi arus, serta variasi permeabilitas inti besi ST41.

Dengan demikian, sistem pengukuran yang dirancang telah mencapai tingkat akurasi yang sangat baik. Hasil pengukuran dapat dipercaya untuk digunakan dalam keperluan laboratorium pendidikan maupun aplikasi praktis di industri dengan syarat pengujian dalam kondisi terkontrol. Selain error rata-rata yang relatif kecil, pola error juga menunjukkan bahwa semakin besar nilai medan magnet, maka deviasi cenderung mengecil. Hal ini disebabkan karena pengaruh *noise* sensor lebih dominan pada pembacaan medan magnet kecil, sedangkan pada medan magnet besar pengaruh *noise* relatif lebih kecil dibanding sinyal utama yang diterima sensor.

4.8 Pengujian dengan objek magnet

Dalam pengujian lanjutan setelah proses kalibrasi sensor *Hall Effect* Allegro A1302, dilakukan pengujian untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam mengukur intensitas medan magnet dari variasi jumlah magnet permanen. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui seberapa sensitif sistem pengukuran terhadap perubahan jumlah sumber medan magnet eksternal. Pengujian dilakukan dengan menambahkan magnet secara bertahap, masing-masing dengan dimensi tetap (panjang 3 cm, lebar 2 cm, dan tinggi 2 mm), serta mengukur nilai medan magnet yang dihasilkan.

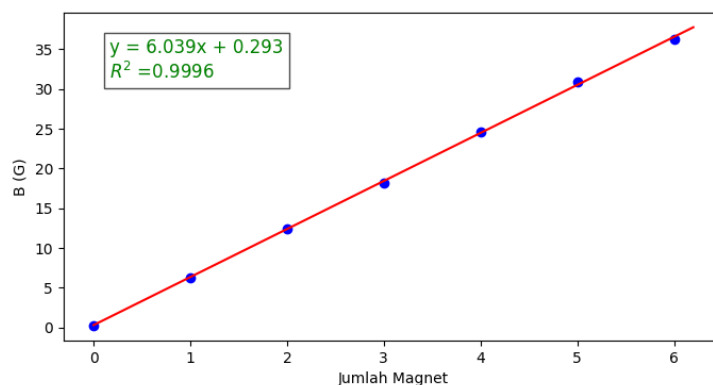
Tabel 4. 5 nilai medan magnet dengan variasi jumlah magnet

No.	Medan Magnet sensor	Jumlah Magnet
1	00,26	0
2	06,30	1
3	12,45	2
4	18,21	3
5	24,55	4
6	30,93	5
7	36,17	6

Dari hasil pengukuran Tabel 4.5, terlihat bahwa terdapat hubungan linier antara jumlah magnet yang digunakan dengan nilai medan magnet yang diukur. Peningkatan jumlah magnet menyebabkan peningkatan intensitas medan magnet yang proporsional. Hal ini sesuai dengan prinsip superposisi medan magnet, di mana medan total merupakan hasil penjumlahan vektor medan-medan magnet dari masing-masing sumber magnet.

Secara teoritis, penambahan jumlah magnet yang identik dengan orientasi medan yang searah akan meningkatkan kerapatan fluks magnetik di area pengukuran. Sensor *Hall Effect* Allegro A1302, yang memiliki karakteristik linier dalam kisaran pengukuran tertentu, mampu mendeteksi kenaikan ini dengan presisi, terutama setelah proses kalibrasi dilakukan. Hubungan antara jumlah magnet yang digunakan dan kuat medan magnet yang terukur diperlihatkan pada Gambar 4.6, yang menunjukkan bahwa peningkatan jumlah magnet menghasilkan kenaikan medan magnet secara linier.

Gambar 4.6 juga memperkuat validitas proses kalibrasi yang telah dilakukan sebelumnya. Jika kalibrasi tidak akurat, maka pembacaan sensor akan menunjukkan deviasi non-linier atau inkonsistensi terhadap jumlah magnet yang ditambahkan. Dengan koefisien determinasi $R^2 = 0.9996$ pada tahap kalibrasi sebelumnya, dapat dipastikan bahwa sistem pengukuran sudah memiliki linearitas yang sangat baik.



Gambar 4. 6 grafik jumlah medan magnet dengan nilai magnet

Hasil ini juga memperkuat validitas proses kalibrasi yang telah dilakukan sebelumnya. Jika kalibrasi tidak akurat, maka pembacaan sensor akan menunjukkan deviasi non-linier atau inkonsistensi terhadap jumlah magnet yang ditambahkan. Dengan koefisien determinasi $R^2 = 0.9996$ pada tahap kalibrasi sebelumnya, dapat dipastikan bahwa sistem pengukuran sudah memiliki linearitas yang sangat baik

Beberapa faktor yang berpotensi mempengaruhi pengukuran antara lain:

- *Noise* lingkungan: fluktuasi medan magnet bumi, peralatan elektronik di sekitar alat, atau sumber elektromagnetik lainnya.
- Deviasi dimensi dan orientasi magnet: meskipun bentuk dan dimensi magnet identik, kesalahan posisi relatif terhadap sensor dapat memberikan variasi hasil pengukuran.
- Kelebihan medan hingga titik saturasi sensor: sensor *Hall Effect* memiliki rentang kerja maksimum tertentu. Melebihi batas ini dapat menyebabkan non-linearitas.

Namun, hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem tetap mampu mengukur secara linier hingga penambahan enam buah magnet, menandakan masih dalam rentang linieritas sensor. Sesuai dengan teori permeabilitas bahan feromagnetik, peningkatan jumlah magnet meningkatkan medan magnet total karena sifat material yang memudahkan terbentuknya rapat fluks magnetik tinggi.

Pengujian ini menjadi bukti tambahan bahwa sistem pengukuran berbasis sensor *Hall Effect* yang telah dikalibrasi ini layak digunakan untuk pengukuran medan magnet secara kuantitatif baik dalam kondisi eksperimen terkontrol maupun untuk pengukuran praktis di laboratorium.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

1. Sistem pengukuran medan magnet berbasis sensor *Hall Effect* Allegro A1302 berhasil dirancang dan diimplementasikan menggunakan Arduino Uno dan modul ADC eksternal ADS1115. Sistem ini mampu membaca perubahan medan magnet secara linier, menghasilkan data yang stabil dan akurat dalam pengujian. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem telah memenuhi fungsi dasar sebagai alat pendeteksi medan magnet yang ekonomis dan portabel.
2. Metode kalibrasi menggunakan kumparan solenoida berinti besi ST41 dengan pendekatan regresi linier terbukti efektif dalam meningkatkan akurasi pembacaan sensor. Nilai koefisien determinasi $R^2=0,996$ menunjukkan tingkat kecocokan tinggi antara pembacaan sensor dan nilai teoritis medan magnet. Berdasarkan hasil kalibrasi, sistem memiliki rentang kerja yang akurat dalam wilayah medan magnet ± 50 Gauss, sesuai dengan spesifikasi sensor *Hall Effect* A1302 dan karakteristik solenoida yang digunakan.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, beberapa saran pengembangan untuk penelitian selanjutnya adalah:

1. Pengujian Kalibrasi pada Medan Magnet Lebih Besar, Sensor *Hall Effect* Allegro A1302 memiliki kemampuan untuk mengukur medan magnet hingga ratusan Gauss. Oleh karena itu, ke depannya dapat dilakukan kalibrasi dengan sumber medan magnet yang menghasilkan intensitas medan yang lebih besar, sehingga diperoleh kurva kalibrasi yang mencakup seluruh rentang kerja sensor.
2. Perbaikan Desain Penopang Sensor dan Magnet, Dianjurkan untuk membuat penopang khusus yang lebih presisi agar posisi sensor dan magnet tetap stabil selama pengukuran. Hal ini akan mengurangi kesalahan akibat pergeseran posisi atau sudut kemiringan sensor.
3. Penggunaan Magnet Eksternal dengan Ukuran Lebih Kecil, Penggunaan magnet permanen yang lebih kecil namun cukup kuat memungkinkan deteksi medan magnet dalam skala lebih kecil secara lebih akurat, terutama saat digunakan untuk mendeteksi cacat halus pada bahan feromagnetik.
4. Pemasangan Pelindung (Shielding) dari Gangguan Lingkungan, Agar pembacaan sensor lebih stabil, disarankan menambahkan pelindung terhadap gangguan medan magnet dari lingkungan sekitar yang dapat mempengaruhi hasil pengukuran.
5. Pengembangan Pemrosesan Data Digital Lebih Lanjut, Selain *filter* sederhana seperti *moving average*, pengolahan data dapat dikembangkan menggunakan algoritma *filtering* lanjutan seperti *filter* Kalman untuk meningkatkan kestabilan pembacaan data sensor.

DAFTAR PUSTAKA

- Akbar, R. (2019). *Rancang Bangun Alat Ukur Medan Magnet Menggunakan Sensor Hall Effect A1302 Berbasis Mikrokontroler*. Skripsi. Universitas Negeri Semarang. <https://lib.unnes.ac.id/37529/>
- Allegro Microsystems. (2005). *A1301/A1302 Linear Hall-Effect Sensor ICs [Datasheet]*. Allegro MicroSystems Inc.
- Allegro Microsystems. (2019). *A1302: Continuous-Time Ratiometric Linear Hall-Effect Sensor Data Sheet*. Allegro MicroSystems Inc.
- Arduino. (2020). *Arduino Uno Rev3 Specifications*. Retrieved from <https://store.arduino.cc>
- Banzi, M., & Shiloh, M. (2014). *Getting Started with Arduino* (3rd ed.). Maker Media.
- Cullity, B. D., & Graham, C. D. (2009). *Introduction to Magnetic Materials* (2nd ed.). Wiley-IEEE Press.
- Fraden, J. (2010). *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications* (4th ed.). Springer.
- Griffiths, D. J. (2017). *Introduction to Electrodynamics* (4th ed.). Pearson Education.
- Hall, E. H. (1879). On a New Action of the Magnet on Electric Currents. *American Journal of Mathematics*, 2(3), 287–292. <https://doi.org/10.2307/2369245>
- Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (2011). *Fundamentals of Physics* (9th ed.). John Wiley & Sons.
- Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (2013). *Fundamentals of Physics* (10th ed.). Wiley.
- Horowitz, P., & Hill, W. (2015). *The Art of Electronics* (3rd ed.). Cambridge University Press.
- HyperPhysics. (2023). *Hall Effect*. Georgia State University. Retrieved from <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/magnetic/hall.html>
- Kassam, K., & Sinclair, D. (2015). Calibration of Hall-Effect Sensors for Low Magnetic Field Measurements. *The Physics Teacher*, 53(5), 306–308. <https://doi.org/10.1119/1.4917444>
- Kurniawan, A. (2020). Analisis Variasi Kalibrasi Sensor *Hall Effect* pada Sistem Pengukuran Medan Magnet. *Jurnal Instrumentasi*, 6(1), 15–22.
- Mazidi, M. A., Naimi, S., & Naimi, S. (2011). *The AVR Microcontroller and Embedded Systems: Using Assembly and C for ATmega*. Pearson.
- Nakamura, T., Suzuki, H., & Ito, S. (2021). Improvement of Hall Sensor Precision with Temperature Compensation Circuit. *Sensors and Actuators A: Physical*, 330, 112881. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.112881>

- Prasetyo, H. (2022). Pengembangan Alat Ukur Medan Magnet Menggunakan Sensor *Hall Effect* Berbasis Arduino. *Jurnal Fisika dan Aplikasinya*, 18(2), 55–62.
- Purcell, E. M., & Morin, D. J. (2013). *Electricity and Magnetism* (3rd ed.). Cambridge University Press.
- Sedra, A. S., & Smith, K. C. (2015). *Microelectronic Circuits* (7th ed.). Oxford University Press.
- Serway, R. A., & Jewett, J. W. (2014). *Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics* (9th ed.). Brooks/Cole.
- Smith, S. W. (1997). *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*. California Technical Publishing.
- Texas Instruments. (2015). *ADS1113, ADS1114, and ADS1115 16-Bit ADCs with Internal Reference Data Sheet*. Texas Instruments Inc.
- Texas Instruments. (2018). *Interfacing ADS1115 with Arduino via I2C Protocol Application Report*. Texas Instruments Inc.
- Winarno, W. W. (2019). *Sensor dan Transduser: Prinsip dan Aplikasinya*. Deepublish.
- Wu, J., Zhang, Y., Chen, K., & Wang, X. (2023). Magnetic Flux Leakage Testing of Metal Components Using Hall Sensors. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 42(1), 52. <https://doi.org/10.1007/s10921-023-00899-1>

LAMPIRAN

Berdasarkan data pada baris pertama Tabel 4.2. Perhitungan ini menggunakan parameter-parameter yang telah diukur selama percobaan, seperti jumlah lilitan kumparan, panjang kumparan, arus listrik, dan permeabilitas relatif inti besi.

- $N = 115$ lilitan
- $L = 0.1$ m
- $I = 17.86$ mA = 0.01786 A
- $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m
- $\mu_r = 77.7$

Rumus dasar :

$$B_{ujung} = \frac{1}{2} \mu_0 \mu_r \frac{N}{L} \quad (5.1)$$

Hitung $n = \frac{N}{L}$ (Lilitan per meter) :

$$n = \frac{115}{0.1} = 1150 \quad (5.2)$$

Faktor Permeabilitas :

$$\mu_r \cdot \mu_0 = (1.2566 \times 10^{-6}) \cdot 77.72 \approx 9.76 \times 10^{-5} \quad (5.3)$$

Hitung semua :

$$B_{ujung} = \frac{1}{2} \cdot 9.76 \times 10^{-5} \cdot 1150 \cdot 0.01786$$

$$0.5 \cdot 9.76 \times 10^{-5} = 4.88 \times 10^{-5}$$

$$4.88 \times 10^{-5} \cdot 1150 = 0.001003 \text{ T}$$

Konversi ke Gauss ($1\text{T}=10^4\text{G}$) :

$$B_{ujung} = 0.001003 \text{ T} = 10.03 \text{ G} \quad (5.4)$$

Dari rumus diatas saya mendapatkan rata rata permeabilitas dari kumparan menggunakan inti besi st 41 sebesar 77,72

Lampiran 1. Contoh perhitungan baris pertama pada tabel 4.2

gaya Lorentz:

$$\vec{F}_L = q\vec{v} \times \vec{B}$$

Gaya ini akan mengarahkan pembawa muatan ke sisi tertentu dari konduktor,

$$qE_H = qv_d B \Rightarrow E_H = v_d B$$

Hubungan Medan Listrik dengan Tegangan Hall:

$$V_H = v_d B w$$

Hubungan Kecepatan Drift dan Arus

$$I = nqAv_d$$

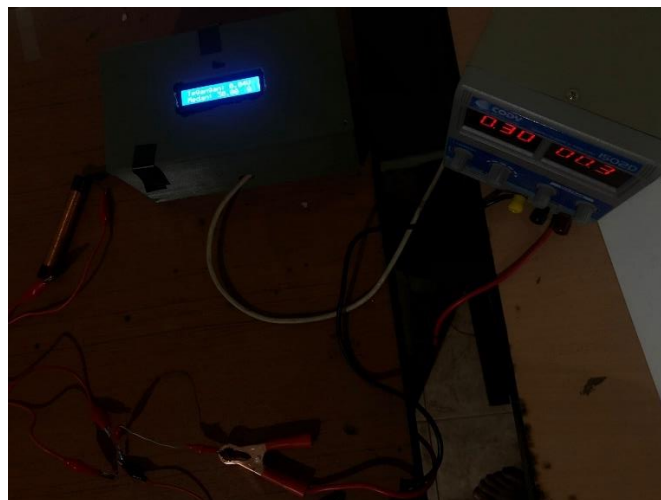
Sehingga:

$$v_d = \frac{I}{nqwt}$$

$$V_H = v_d B w = \left(\frac{I}{nqwt} \right) B w = \frac{IB}{nqt}$$

$$V_H = \frac{IB}{qnt}$$

Lampiran 2. Turunan gaya lorentz .



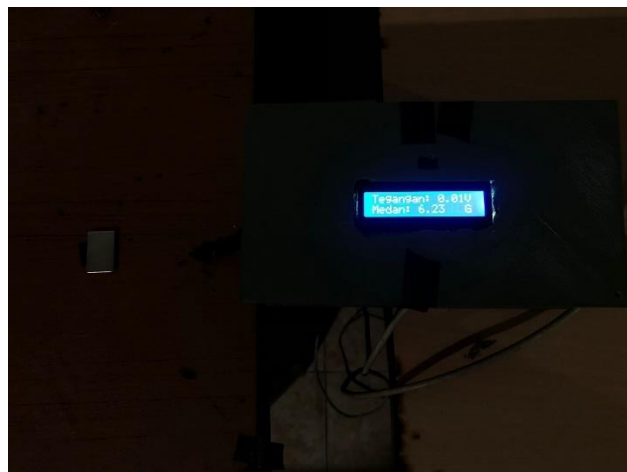
Lampiran 3. Sensor sebelum kalibrasi dengan arus 53,57 mA.



Lampiran 4. Sensor sesudah kalibrasi dengan arus 53,57 mA



Lampiran 5. Sensor tanpa magnet



Lampiran 6. Sensor dengan 1 magnet = 6 Gauss

```
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_ADS1X15.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>

Adafruit_ADS1115 ads;
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,20,4);

const float V_neutral = 2.537; // Tegangan netral (tanpa magnet)
const float sensitivity = 1.3; // Output maksimum yang diinginkan (5V)
#include "MovingAverageFloat.h" //
https://github.com/pilotak/MovingAverageFloat

// Buffer will be 16 samples long, it will take 16 * sizeof(float) = 64 bytes
of RAM
MovingAverageFloat <160> filter;

void setup(void)
{
    lcd.init();
    lcd.backlight();
    Serial.begin(9600);
    Serial.println("Hello!");

    Serial.println("Getting single-ended readings from AIN0..3");
    Serial.println("ADC Range: +/- 6.144V (1 bit = 3mV/ADS1015,
0.1875mV/ADS1115)");
    // The ADC input range (or gain) can be changed via the following
    // functions, but be careful never to exceed VDD +0.3V max, or to
    // exceed the upper and lower limits if you adjust the input range!
    // Setting these values incorrectly may destroy your ADC!
    //
    //                                     ADS1015   A
DS1115
    //                                     -----
-----
    ads.setGain(GAIN_TWOTHIRDS); // 2/3x gain +/- 6.144V  1 bit =
3mV      0.1875mV (default)
    // ads.setGain(GAIN_ONE);          // 1x gain     +/- 4.096V  1 bit =
2mV      0.125mV
    // ads.setGain(GAIN_TWO);           // 2x gain     +/- 2.048V  1 bit =
1mV      0.0625mV
    // ads.setGain(GAIN_FOUR);          // 4x gain     +/- 1.024V  1 bit =
0.5mV    0.03125mV
    // ads.setGain(GAIN_EIGHT);         // 8x gain     +/- 0.512V  1 bit =
0.25mV   0.015625mV
    // ads.setGain(GAIN_SIXTEEN);       // 16x gain    +/- 0.256V  1 bit =
0.125mV  0.0078125mV

    if (!ads.begin()) {
        Serial.println("Failed to initialize ADS.");
        while (1);
    }
}
```

```

}

void loop(void)
{
    int16_t adc0;
    float volts0;
    float voltage_output;
    float nilaimagnet;
    float nilaimagnetcall;

    adc0 = ads.readADC_SingleEnded(0);

    volts0 = (adc0 * 6.144) / 32769.0;
    voltage_output = volts0 - V_neutral;
    nilaimagnet = (voltage_output / sensitivity) * 1000;
    nilaimagnetcall = (0.931*nilaimagnet)+1.542 ;

    float filteredValue = filter.add(nilaimagnetcall);

    Serial.println("-----");
");
    Serial.print("AIN0: "); Serial.println(adc0);
    Serial.print("Tegangan normal: "); Serial.print(volts0,4); Serial.println("
V");
    Serial.print("Tegangan output: "); Serial.print(voltage_output);
Serial.println(" V");
    Serial.print("Nilai Magnet: ");Serial.print (filteredValue);
Serial.println(" Gauss");
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("Tegangan: ");
    lcd.setCursor(10,0);
    lcd.print(voltage_output);
    lcd.setCursor(14,0);
    lcd.print("V");

    // Print to Serial for PLX-DAQ
    Serial.print("DATA,");
    Serial.print(adc0);
    Serial.print(",");
    Serial.print(volts0, 4);
    Serial.print(",");
    Serial.print(voltage_output);
    Serial.print(",");
    Serial.println(filteredValue); // Send the filtered magnetic value

    if (nilaimagnet != 0){
        lcd.setCursor(0,1);
        lcd.print("Medan: ");
        lcd.setCursor(7,1);

```

```
    lcd.print(filteredValue);  
    lcd.setCursor(14,1);  
    lcd.print("G");  
}  
else{  
    lcd.setCursor(0,1);  
    lcd.print("Medan: ");  
    lcd.setCursor(7,1);  
    lcd.print(0.00);  
    lcd.setCursor(11,1);  
    lcd.print("G    ");  
}  
  
delay(1000);  
}
```

Lampiran 7. kodingan Arduino.

BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Pekanbaru, 7 Februari 2003, merupakan anak keempat dari 5 bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal yaitu di SD, MTSn 1 Pekanbaru dan SMK 2 Pekanbaru. Setelah lulus dari SMK tahun 2021, Penulis mengikuti SNBT dan diterima di Departemen Fisika - ITS pada tahun 2021 dan terdaftar dengan NRP 5001211036.