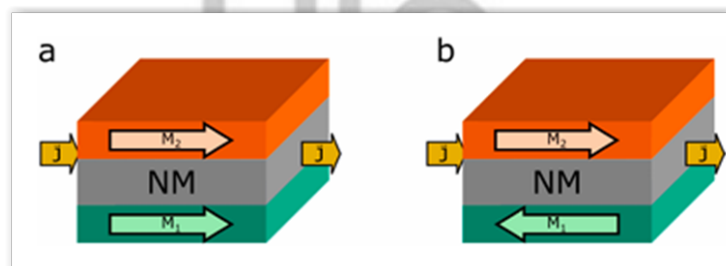


BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Giant Magnetoresistance* (GMR)

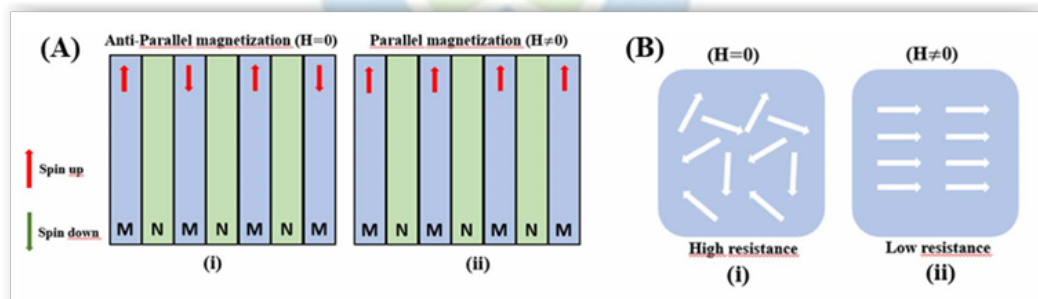
Efek *Giant Magnetoresistance* (GMR) merupakan fenomena kuantum yang terjadi pada struktur berlapis logam tipis, di mana resistivitas listrik material mengalami perubahan signifikan akibat adanya medan magnet eksternal (ricci., 2023). Fenomena ini pertama kali diamati pada multilayer yang terdiri dari lapisan feromagnetik yang dipisahkan oleh lapisan logam non-magnetik konduktif. Ketika orientasi magnetisasi lapisan feromagnetik sejajar, hamburan *spin* elektron menurun sehingga resistansi menjadi kecil. Sebaliknya, ketika orientasi magnetisasi antiparalel, hamburan *spin* meningkat dan resistansi naik drastis (ennen., 2016). Konfigurasi dasar penyusunan sensor GMR dalam bentuk plat disajikan sebagaimana Gambar 2.1 berikut.



Gambar 2.1 Sensor GMR pada Konfigurasi Plat saat (a) Lapisan Magnetisasi Paralel, dan (b) Lapisan Magnetisasi Antiparalel (Ennen et al., 2016)

Prinsip GMR lazim diaplikasikan dalam bidang biosensor. Ketika nanopartikel magnetik digunakan sebagai label, medan stray dari partikel tersebut mengubah kondisi magnetisasi lapisan feromagnetik pada chip GMR, sehingga resistansi berubah secara terukur. Perubahan ini dapat dibaca secara real-time sebagai sinyal listrik yang linier terhadap konsentrasi biomolekul target. Sensor *Giant Magnetore-*

sistance (GMR) merupakan salah satu perangkat sensor magnetik yang memiliki sensitivitas tinggi terhadap perubahan medan magnet eksternal. Fenomena GMR pertama kali dijelaskan oleh Mott melalui model saluran *spin* ganda pada tahun 1936, yang kemudian dikembangkan secara eksperimental oleh Baibich et al. pada tahun 1988 melalui struktur multilayer Fe/Cr (Raifan., 2016). Efek GMR muncul karena adanya hamburan elektron yang bergantung pada orientasi *spin*, di mana perbedaan konfigurasi paralel dan antiparalel magnetisasi pada lapisan feromagnetik dan non-magnetik menghasilkan perubahan resistansi listrik yang signifikan. Secara umum, struktur sensor GMR terdiri dari lapisan feromagnetik yang dipisahkan oleh lapisan nonmagnetik. Dalam keadaan paralel, hanya satu jenis elektron (misalnya *spin-up*) yang mengalami hamburan kuat, sehingga resistansi menjadi rendah. Sebaliknya, pada keadaan antiparalel, baik *spin-up* maupun *spin-down* mengalami hamburan signifikan, sehingga resistansi meningkat (vitajaya.,2023). Ilustrasi lebih lanjut terkait prinsip magnetoresistif pada sensor GMR disajikan pada Gambar 2.2 berikut.



Gambar 2.2 Ilustrasi Mekanisme *Giant Magnetoresistance* (GMR). (a) Struktur *Multilayer* dengan Lapisan Magnetik (M) dan Non-magnetik (N): (i) Orientasi Magnetisasi Antiparalel Menghasilkan Resistansi Rendah, sedangkan (ii) Orientasi Paralel Menghasilkan Resistansi Tinggi. (b) Mekanisme Transportasi *Spin*: (i) Orientasi *Spin* Acak Menyebabkan Resistansi Tinggi, sedangkan (ii) Penyelarasan *Spin* Akibat Pengaruh Medan Magnet Eksternal Menurunkan Resistansi.

Aplikasi awal sensor GMR yang paling menonjol adalah pada kepala baca (*read-head*) hard disk drive komersial sejak tahun 1997, yang memungkinkan peningkatan densitas data secara drastis (vitamaya.,2024). Dalam konfigurasi ini digunakan arsitektur *spin-valve*, yang terdiri atas tiga lapisan utama: lapisan referensi dengan magnetisasi tetap, lapisan non-magnetik, dan lapisan bebas (*free layer*) yang

dapat berubah orientasinya mengikuti medan eksternal (ennen., 2016). Mekanisme *exchange bias* digunakan untuk menstabilkan lapisan referensi agar tidak terpengaruh medan luar. Perubahan orientasi magnetisasi pada lapisan bebas akan mengubah resistansi total sistem, yang kemudian diterjemahkan sebagai sinyal baca digital. Selain bidang penyimpanan data, sensor GMR juga dikembangkan untuk berbagai aplikasi lain, termasuk sistem otomotif (sensor kecepatan rotasi, sudut, dan posisi), *non-destructive testing*, sensor arus, serta *magnetic random access memory* (MRAM) (Rifai et al., 2016). Keunggulan utama sensor GMR adalah sensitivitas tinggi, respon linier, kestabilan jangka panjang, dan kemampuan mendeteksi medan magnet dengan resolusi sangat kecil.

Secara umum, dasar teoritis GMR berkaitan dengan transportasi elektron terpolarisasi *spin*. Elektron dengan arah *spin* yang sejajar dengan magnetisasi lapisan feromagnetik mengalami hamburan lebih kecil dibandingkan dengan *spin* yang berlawanan arah. Hal ini menyebabkan terjadinya perbedaan konduktivitas antara keadaan paralel dan antiparalel, yang menjadi inti dari mekanisme perubahan resistansi pada sensor GMR (Wibowo et al., 2023). Dalam implementasi perubahan resistansi pada GMR, rasio perubahan resistansi relatif diekspresikan sebagai

$$\frac{\Delta R}{R_0} \equiv MR(B),$$

dengan ΔR perubahan resistansi, R_0 resistansi referensi (tanpa medan), MR nilai magnetoresistansi, dan B nilai medan magnet. Dalam rentang medan kecil (linear region) kita dapat menulis aproksimasi linear:

$$\frac{\Delta R}{R_0} \approx \beta B, \quad (\text{koefisien } \beta \text{ bergantung pada material/struktur GMR}) \quad (2.1)$$

Dengan satuan yang konsisten, jika B dinyatakan dalam Oe maka β atau koefisien magnetoresistif bernilai per-Oe (ricci., 2016).

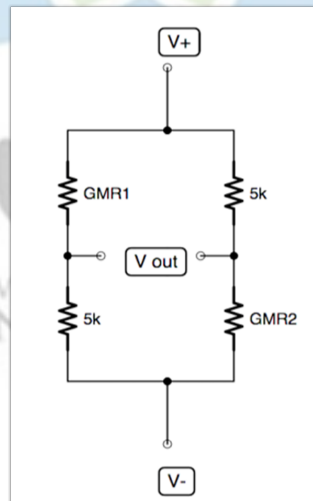
Definisikan rasio perubahan resistansi relatif sebagai

$$\frac{\Delta R}{R_0} \equiv \text{MR}(B),$$

dengan R_0 resistansi referensi (tanpa medan). Dalam rentang medan kecil (linear region) dapat ditulis aproksimasi linear:

$$\frac{\Delta R}{R_0} \approx \beta B, \quad (\text{koefisien } \beta \text{ bergantung pada material/struktur GMR}), \quad (2.2)$$

di mana β merupakan konstanta proporsionalitas yang menunjukkan sensitivitas resistansi terhadap medan magnet eksternal (ardiyanti., 2023). Dengan satuan yang konsisten, jika B dinyatakan dalam Oe maka β bernilai per-Oe. Konsep perubahan resistansi GMR dan linearitas dalam medan kecil telah dijelaskan secara eksperimental pada sensor berbasis multilayer maupun sensor komersial AAL024 (ricci., 2023).



Gambar 2.3 Konfigurasi Jembatan Wheatstone pada Sensor GMR

Gambar 2.3 menampilkan konfigurasi jembatan Wheatstone yang lazim digunakan pada sensor GMR. Konfigurasi umum chip GMR komersial (misalnya NVE AAL024) adalah jembatan Wheatstone dengan dua elemen sensing aktif (ricci.,

2023), dengan mengaplikasikan model sederhana:

$$\begin{aligned} R_1 &= R_0 + \Delta R, & R_2 &= R_0, \\ R_3 &= R_0 - \Delta R, & R_4 &= R_0. \end{aligned}$$

Dengan R_1 hingga R_4 adalah nilai resistansi pada konfigurasi jembatan *Wheatstone*, tegangan nodal kiri (V_L) dan kanan (V_R) terhadap tanah (pembagi atas/bawah) adalah

$$V_L = V_{in} \frac{R_2}{R_1 + R_2}, \quad V_R = V_{in} \frac{R_4}{R_3 + R_4},$$

sehingga keluaran jembatan (V_{out}):

$$V_{out} = V_L - V_R.$$

Untuk $|\Delta R| \ll R_0$ dilakukan ekspansi seri (small-signal). Dengan $\varepsilon = \Delta R/R_0$, diperoleh (menggunakan ekspansi Taylor orde pertama):

$$V_{out} \approx -V_{in} \frac{\varepsilon}{2} = -V_{in} \frac{\Delta R}{2R_0}. \quad (2.3)$$

dimana V_{out} adalah tegangan keluaran, V_{in} adalah tegangan masukan, dan ε adalah nilai permitivitas. Nilai Persamaan ini menunjukkan hubungan langsung, yaitu perubahan relatif resistansi ($\Delta R/R_0$) menghasilkan tegangan keluaran proporsional dengan setengah tegangan input (touil., 2022).

Jika $\Delta R/R_0 \approx \beta B$ disubstitusikan ke persamaan (2.3), maka:

$$V_{out} \approx -V_{in} \frac{\beta}{2} B. \quad (2.4)$$

Dengan demikian, sensitivitas sensor (tegangan per satuan medan) ($S_{V/B}$) adalah

$$S_{V/B} \equiv \frac{V_{out}}{B} \approx -\frac{V_{in} \beta}{2}.$$

Jika sensitivitas diekspresikan dalam satuan mV/Oe pada tegangan suplai tertentu V_{in} , maka:

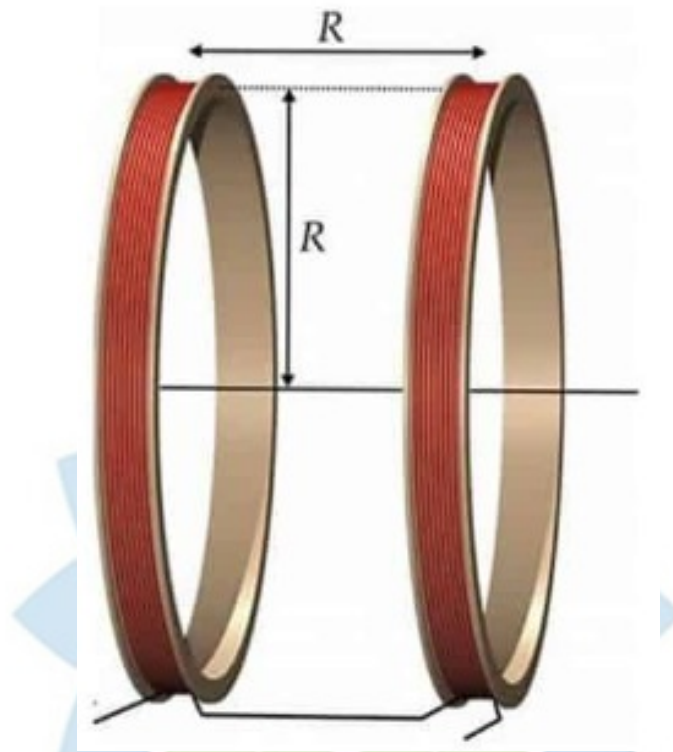
$$S_{\text{chip}} \text{ (mV/Oe)} = 1000 \cdot \frac{V_{in} \beta}{2}, \Rightarrow \beta = \frac{2 S_{\text{chip}}}{1000 V_{in}}. \quad (2.5)$$

dengan $S_{V/B}$ adalah sensitivitas sensor. Hubungan ini banyak digunakan pada karakterisasi sensor GMR berbasis chip komersial maupun sensor dengan lapisan nanopartikel magnetit (ardiyanti et al., 2023).

2.2 Sistem Instrumentasi GMR

2.2.1 Kumparan Helmholtz

Kumparan *Helmholtz* merupakan susunan dua kumparan lingkaran identik yang ditempatkan sejajar pada satu sumbu yang sama. Kedua kumparan mempunyai jumlah lilitan, jari-jari, dan arah arus yang sama. Jarak antarkumparan dibuat sama dengan jari-jari kumparan agar medan magnet di sekitar titik tengah sistem menjadi relatif seragam. Susunan ini banyak digunakan dalam pengukuran dan kalibrasi medan magnet karena besar medan yang dihasilkan dapat diatur melalui arus yang diberikan pada kumparan (yudhistira., 2019). Susunan dasar kumparan *Helmholtz* ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Susunan sepasang kumparan *Helmholtz*.

Sumber: Passive Components Europe (Passive Components Europe, 2026).

Gambar 2.4 memperlihatkan dua kumparan yang ditempatkan saling berhadapan dengan jarak antarkumparan sebesar d . Dalam konfigurasi *Helmholtz*, nilai d dibuat sama dengan jari-jari kumparan. Titik pengamatan berada pada sumbu x , tepat di tengah kedua kumparan. Ketika kedua kumparan dialiri arus dengan arah yang sama, medan magnet dari masing-masing kumparan saling menjumlah di daerah tengah. Konfigurasi tersebut menghasilkan medan magnet yang lebih seragam dibandingkan penggunaan satu kumparan saja (Patty., 2025).

Medan magnet yang dihasilkan berasal dari arus listrik yang mengalir pada kawat berbentuk lingkaran. Besar medan magnet pada sumbu sebuah kumparan dengan jari-jari R , jumlah lilitan N , dan arus listrik I , pada titik yang berjarak x dari pusat kumparan, dapat dinyatakan melalui Persamaan 2.6 (Apriyanti., 2017).

$$B(x) = \frac{\mu_0 N I R^2}{2 (R^2 + x^2)^{3/2}} \quad (2.6)$$

Pada Persamaan 2.6, $B(x)$ merupakan medan magnet pada titik pengamatan, μ_0 merupakan permeabilitas ruang hampa, N merupakan jumlah lilitan pada satu kumparan, I merupakan arus listrik, R merupakan jari-jari kumparan, dan x merupakan jarak titik pengamatan dari pusat kumparan. Nilai permeabilitas ruang hampa adalah:

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T m/A}. \quad (2.7)$$

Persamaan 2.6 menunjukkan bahwa medan magnet dipengaruhi oleh arus, jumlah lilitan, jari-jari kumparan, dan posisi titik pengamatan. Peningkatan arus atau jumlah lilitan akan meningkatkan medan magnet yang dihasilkan, sedangkan medan magnet akan berkurang ketika titik pengamatan semakin jauh dari pusat kumparan (Ardiyani.,2015).

Pada sepasang kumparan *Helmholtz*, jarak antarkumparan dibuat sama dengan R . Dengan demikian, setiap kumparan berjarak $R/2$ dari titik tengah sistem. Medan magnet total pada titik tengah merupakan hasil penjumlahan medan magnet dari kedua kumparan, sehingga dapat dituliskan sebagai:

$$B_H = 2 \left[\frac{\mu_0 N I R^2}{2 \left(R^2 + \left(\frac{R}{2} \right)^2 \right)^{3/2}} \right]. \quad (2.8)$$

Persamaan 2.8 selanjutnya dapat disederhanakan menjadi:

$$B_H = \left(\frac{4}{5} \right)^{3/2} \frac{\mu_0 N I}{R}. \quad (2.9)$$

Persamaan 2.9 merupakan persamaan medan magnet pada titik tengah sepasang kumparan *Helmholtz*. Persamaan tersebut menunjukkan bahwa medan magnet

berbanding lurus dengan jumlah lilitan dan arus listrik, tetapi berbanding terbalik dengan jari-jari kumparan (Ardiyani., 2015). Oleh karena itu, besar medan magnet dapat diatur dengan mengubah arus yang diberikan selama parameter fisik kumparan tetap.

Dalam penelitian ini, kumparan *Helmholtz* digunakan untuk menghasilkan medan magnet eksternal pada sensor GMR. Sensor ditempatkan di daerah tengah kumparan agar memperoleh medan magnet yang relatif seragam. Meskipun Persamaan 2.9 dapat digunakan untuk menghitung medan magnet secara teoritis, nilai medan magnet aktual tetap ditentukan melalui proses kalibrasi menggunakan gauss-meter. Pengukuran langsung dilakukan karena nilai medan magnet aktual dapat dipengaruhi oleh dimensi kumparan, jumlah lilitan, arus, dan posisi titik pengukuran (yudhistira.,2019).

2.2.2 Operational Amplifier (Op-Amp) Subtraktor

Operational amplifier atau penguat operasional (Op-Amp) merupakan komponen elektronika yang dapat digunakan untuk melakukan penguatan dan pengolahan sinyal analog. Salah satu konfigurasi Op-Amp adalah rangkaian subtraktor atau penguat diferensial, yaitu rangkaian yang menghasilkan tegangan keluaran berdasarkan selisih antara dua tegangan masukan. Rangkaian ini umumnya terdiri atas sebuah Op-Amp dan empat resistor yang menentukan besar penguatannya (Jung., 2022).

Pada rangkaian subtraktor, tegangan V_1 diberikan pada terminal pembalik (*inverting*), sedangkan tegangan V_2 diberikan pada terminal tak membalik (*non-inverting*). Terminal pembalik ditandai dengan simbol $(-)$, sementara terminal tak membalik ditandai dengan simbol $(+)$. Ketika Op-Amp bekerja dengan umpan balik negatif, tegangan pada kedua terminal masukan dapat dianggap mendekati sama pada kondisi ideal.

Tegangan pada terminal tak membalik ditentukan oleh pembagi tegangan yang dibentuk oleh R_3 dan R_4 , sehingga dapat dituliskan sebagai:

$$V_+ = \frac{R_4}{R_3 + R_4} V_2. \quad (2.10)$$

Dengan menganggap $V_- \approx V_+$, tegangan keluaran rangkaian dapat dinyatakan sebagai:

$$V_{\text{out}} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{R_4}{R_3 + R_4} V_2 - \frac{R_2}{R_1} V_1. \quad (2.11)$$

Pada Persamaan 2.11, V_{out} merupakan tegangan keluaran, V_1 dan V_2 merupakan dua tegangan masukan, sedangkan R_1 , R_2 , R_3 , dan R_4 merupakan resistor yang digunakan pada rangkaian subtraktor.

Agar rangkaian menghasilkan keluaran yang sebanding dengan selisih kedua masukan, rasio resistor pada kedua jalur dibuat sama, yaitu:

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3}. \quad (2.12)$$

Dengan memenuhi kondisi pada Persamaan 2.12, tegangan keluaran dapat disederhanakan menjadi:

$$V_{\text{out}} = \frac{R_2}{R_1} (V_2 - V_1). \quad (2.13)$$

Besar penguatan diferensial rangkaian kemudian dinyatakan sebagai:

$$A_d = \frac{V_{\text{out}}}{V_2 - V_1} = \frac{R_2}{R_1}, \quad (2.14)$$

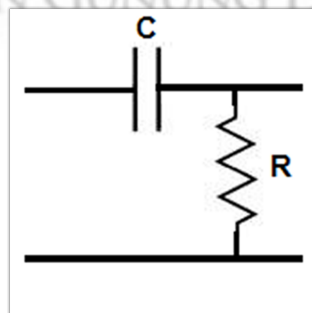
dengan A_d merupakan penguatan diferensial. Apabila nilai $R_2/R_1 = 1$, rangkaian bekerja dengan penguatan satu (*unity gain*) sehingga tegangan keluarannya sama dengan selisih kedua masukan. Apabila nilai R_2/R_1 lebih besar dari satu, selisih tegangan masukan akan diperkuat sesuai dengan rasio resistor yang digunakan (Ti et al., 2019).

Dalam instrumentasi GMR, sensor menghasilkan dua tegangan keluaran diferensial. Kedua tegangan tersebut dapat memiliki nilai yang berdekatan, sedangkan informasi respons sensor terdapat pada selisih di antara keduanya. Rangkaian Op-Amp subtraktor digunakan untuk mengambil dan memperkuat selisih tersebut sehingga sinyal lebih mudah dibaca oleh bagian konversi analog-ke-digital. Pada instrumen yang digunakan dalam penelitian ini, pengondisian sinyal dilakukan menggunakan LM358 sebelum tegangan diteruskan ke ADC dan diolah oleh mikrokontroler.

2.2.3 *Passive Low-Pass Filter (LPF)*

Low-pass filter (LPF) atau tapis lolos-rendah merupakan rangkaian yang melewatkan komponen sinyal berfrekuensi rendah dan melemahkan komponen sinyal berfrekuensi tinggi. Batas antara frekuensi yang dilewatkan dan mulai dilemahkan disebut frekuensi *cut-off* (f_c). Rangkaian disebut pasif karena hanya tersusun atas komponen pasif dan tidak memberikan penguatan terhadap sinyal keluaran (Firman-syah., 2017).

Salah satu bentuk LPF yang sederhana adalah filter resistor–kapasitor (RC). Resistor (R) merupakan komponen yang menghambat aliran arus listrik, sedangkan kapasitor (C) merupakan komponen yang menyimpan muatan listrik untuk sementara. Susunan dasar filter RC ditunjukkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 *Low Pass Filter*

Gambar 2.5 memperlihatkan resistor yang dipasang seri dengan sinyal masukan dan kapasitor yang terhubung antara titik keluaran dengan *ground*. Tegangan

keluaran diambil pada kapasitor. Pada frekuensi rendah, reaktansi kapasitor masih besar sehingga sebagian besar sinyal masukan muncul pada sisi keluaran. Ketika frekuensi meningkat, reaktansi kapasitor mengecil sehingga komponen berfrekuensi tinggi lebih mudah dialirkan menuju ground dan tegangan keluarannya menjadi lebih kecil (suryanto., 2017) Hubungan antara tegangan masukan dan tegangan keluaran pada filter RC orde pertama dapat dinyatakan melalui fungsi transfer:

$$H(j\omega) = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{1 + j\omega RC}, \quad (2.15)$$

dengan V_{in} merupakan tegangan masukan, V_{out} merupakan tegangan keluaran, j merupakan satuan imajiner, dan ω merupakan frekuensi sudut. Hubungan antara frekuensi sudut dan frekuensi sinyal dinyatakan sebagai:

$$\omega = 2\pi f, \quad (2.16)$$

dengan f merupakan frekuensi sinyal dalam hertz. Berdasarkan Persamaan 2.15, frekuensi *cut-off* filter RC dapat ditentukan menggunakan:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}. \quad (2.17)$$

Pada Persamaan 2.17, f_c merupakan frekuensi *cut-off*, R merupakan hambatan dalam ohm, dan C merupakan kapasitansi dalam farad. Pada frekuensi tersebut, amplitudo tegangan keluaran menjadi sekitar 0,707 kali amplitudo pada daerah frekuensi rendah atau mengalami penurunan sebesar 3 dB. Nilai resistor dan kapasitor menentukan batas frekuensi sinyal yang masih dapat dilewatkan oleh rangkaian (Supriyanto., 2023).

Dalam instrumentasi GMR pada penelitian ini, LPF digunakan pada bagian pengondisi sinyal untuk membantu mengurangi komponen derau berfrekuensi tinggi sebelum sinyal diteruskan ke *analog-to-digital converter* (ADC). Penyaringan terse-

but diperlukan karena perubahan sinyal yang dibaca sensor relatif kecil, sehingga gangguan dari rangkaian dan lingkungan dapat memengaruhi kestabilan hasil pengukuran.

2.2.4 Analog-to-Digital Converter (ADC)

Analog-to-Digital Converter (ADC) merupakan rangkaian yang digunakan untuk mengubah sinyal analog menjadi data digital agar dapat dibaca dan diolah oleh mikrokontroler. Proses konversi dilakukan melalui pengambilan sampel (*sampling*) dan kuantisasi. Kinerja ADC dipengaruhi oleh beberapa parameter, seperti resolusi, kecepatan pengambilan sampel, linearitas, dan tingkat derau (Shylu et al., 2020).

Salah satu jenis ADC yang digunakan untuk pengukuran sinyal berukuran kecil adalah ADC Delta-Sigma ($\Delta\Sigma$). ADC ini menggunakan *oversampling* dan *noise shaping* untuk membantu mengurangi pengaruh derau kuantisasi pada rentang sinyal yang diukur. Karakteristik tersebut membuat ADC Delta-Sigma sesuai digunakan pada sistem akuisisi data yang membutuhkan resolusi tinggi (Shylu et al., 2020).

Pada instrumentasi GMR dalam penelitian ini digunakan ADS1115, yaitu ADC Delta-Sigma dengan resolusi 16 bit. ADS1115 memiliki empat kanal masukan, kecepatan pengambilan data hingga 860 sampel per detik atau *samples per second* (SPS), serta komunikasi *Inter-Integrated Circuit* (I²C). Komponen ini juga dilengkapi *programmable gain amplifier* (PGA) untuk menyesuaikan rentang tegangan masukan. Dalam sistem pengukuran, ADS1115 mengubah tegangan keluaran yang telah melewati rangkaian pengondisi sinyal menjadi data digital sebelum diteruskan ke mikrokontroler (Shylu et al., 2020).

2.3 Nanofiber Fe₃O₄/PVA-GA/Kurkumin

2.3.1 *Electrospinning*

Electrospinning merupakan metode pembuatan serat berukuran sangat kecil dengan memanfaatkan medan listrik bertegangan tinggi. Pada metode ini, larutan polimer diberi muatan listrik hingga membentuk pancaran tipis yang disebut *jet*. Selama bergerak menuju kolektor, pelarut pada larutan menguap sehingga material polimer tertinggal dalam bentuk serat. Metode ini banyak digunakan karena susunan peralatannya relatif sederhana dan dapat diterapkan pada berbagai jenis polimer (Oktavia., 2022).

Perangkat *electrospinning* yang digunakan untuk membentuk nanofiber ditunjukkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Perangkat *electrospinning* untuk pembuatan nanofiber.

Sumber: dokumentasi penelitian.

Gambar 2.6 memperlihatkan perangkat *electrospinning* yang terdiri atas unit pengatur tegangan, pompa suntik, jarum, dan kolektor yang ditempatkan di dalam ruang tertutup. Pompa suntik atau *syringe pump* merupakan alat yang mendorong larutan dari suntikan dengan laju yang dapat diatur. Jarum berfungsi sebagai *spinneret*, yaitu bagian tempat larutan keluar sebelum mengalami penarikan oleh medan listrik. Sementara itu, kolektor merupakan bagian yang digunakan untuk menangkap

dan mengumpulkan serat yang telah terbentuk.

Proses *electrospinning* dimulai dengan menempatkan larutan polimer di dalam suntikan. Larutan kemudian didorong secara perlahan menggunakan *syringe pump* hingga membentuk tetesan pada ujung jarum. Ketika tegangan tinggi diberikan antara jarum dan kolektor, tetesan tersebut mengalami gaya listrik. Apabila gaya listrik telah cukup besar untuk mengatasi tegangan permukaan larutan, tetesan akan tertarik menjadi *jet* yang bergerak menuju kolektor (Tatang., 2011).

Selama perjalanan dari ujung jarum menuju kolektor, pelarut mengalami penguapan dan diameter *jet* semakin mengecil. Material yang tersisa kemudian menempel pada permukaan kolektor dalam bentuk serat. Kumpulan serat tersebut selanjutnya membentuk lembaran nanofiber. Bentuk dan kestabilan serat yang dihasilkan dapat dipengaruhi oleh sifat larutan, tegangan yang diberikan, laju alir larutan, serta jarak antara ujung jarum dan kolektor (Oktavia., 2022).

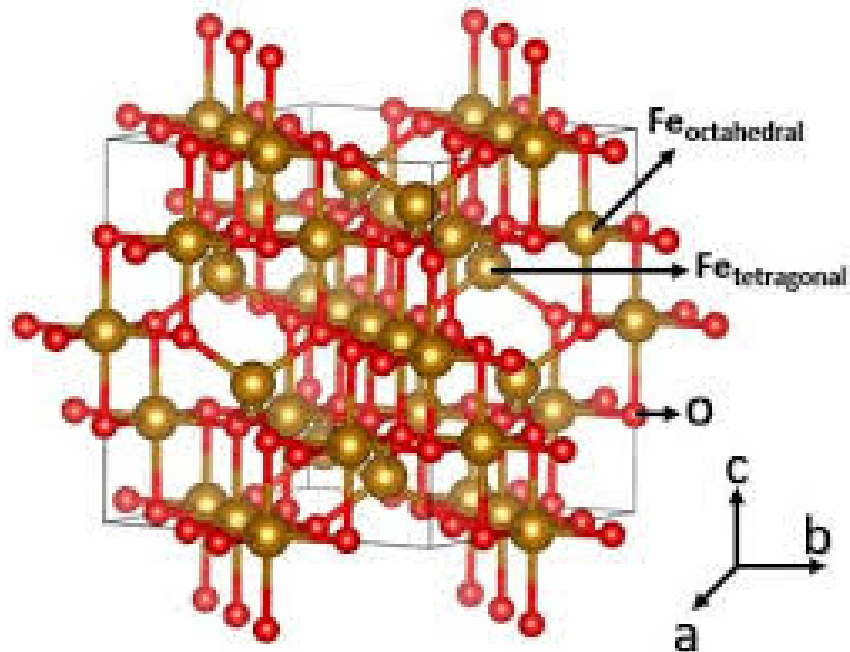
Dalam penelitian ini, metode *electrospinning* digunakan untuk membentuk nanofiber komposit $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PVA}$. Magnetit (Fe_3O_4) berperan sebagai komponen magnetik, sedangkan *polyvinyl alcohol* (PVA) digunakan sebagai matriks polimer pembentuk serat.

2.3.2 Fe_3O_4

Magnetit merupakan salah satu senyawa oksida besi dengan rumus kimia Fe_3O_4 . Senyawa ini tersusun atas unsur besi (Fe) dan oksigen (O), serta mengandung dua jenis ion besi, yaitu Fe^{2+} dan Fe^{3+} . Fe^{2+} merupakan ion besi dengan muatan positif dua, sedangkan Fe^{3+} merupakan ion besi dengan muatan positif tiga. Magnetit umumnya berwarna hitam dan memiliki sifat ferrimagnetik, yaitu keadaan ketika momen-momen magnetik di dalam material tersusun berlawanan arah, tetapi besarnya tidak sama sehingga material masih memiliki magnetisasi (Fitria., 2025).

Magnetit mempunyai struktur kristal spinel terbalik. Pada struktur ini, ion oksigen membentuk susunan kubik berpusat muka atau *face-centered cubic* (FCC),

sedangkan ion besi menempati dua jenis ruang di antara susunan oksigen, yaitu situs tetrahedral dan situs oktahedral. Situs tetrahedral merupakan posisi yang dikelilingi oleh empat ion oksigen, sedangkan situs oktahedral dikelilingi oleh enam ion oksigen. Susunan kristal magnetit ditunjukkan pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Struktur kristal magnetit Fe_3O_4 .

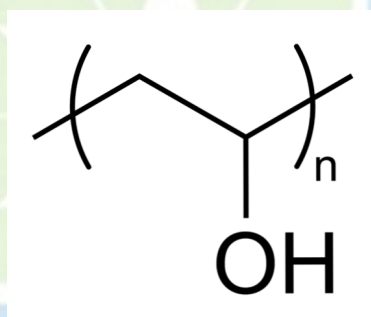
Sumber: repository.ub.ac.id.

Gambar 2.7 memperlihatkan ion Fe^{3+} pada situs tetrahedral serta ion Fe^{2+} dan Fe^{3+} pada situs oktahedral. Susunan tersebut dapat dituliskan sebagai $[\text{Fe}^{3+}]_{\text{Td}}[\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}]_{\text{Oh}}\text{O}_4$, dengan Td menunjukkan situs tetrahedral dan Oh menunjukkan situs oktahedral. Perpindahan elektron antara ion Fe^{2+} dan Fe^{3+} pada situs oktahedral ikut memengaruhi sifat listrik dan magnetik magnetit (Gupta., 2021).

Dalam penelitian ini, Fe_3O_4 digunakan sebagai komponen magnetik pada nanofiber $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PVA-GA/kurkumin}$. Keberadaan magnetit membuat material aktif dapat memberikan pengaruh terhadap medan magnet di sekitar sensor GMR. PVA berfungsi sebagai matriks pembentuk serat, sedangkan Fe_3O_4 memberikan sifat magnetik yang diperlukan dalam proses pembacaan sensor.

2.3.3 Polivinil Alkohol (PVA)

Polivinil alkohol atau *polyvinyl alcohol* (PVA) merupakan polimer sintesis yang dapat larut dalam air. Polimer adalah molekul berukuran besar yang tersusun atas satuan-satuan kecil yang berulang. PVA bersifat hidrofilik, yaitu mudah berinteraksi dengan air, karena memiliki banyak gugus hidroksil pada rantai polimernya. Gugus hidroksil merupakan gugus kimia yang tersusun atas atom oksigen dan hidrogen, yang dituliskan sebagai OH (Fitria., 2025). Struktur dasar PVA ditunjukkan pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Struktur kimia polivinil alkohol (PVA).

Sumber: Wikimedia Commons.

Gambar 2.8 memperlihatkan satuan berulang PVA yang dapat dituliskan sebagai $[-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{OH})-]_n$. Simbol n menunjukkan banyaknya satuan yang berulang dalam rantai polimer. Gugus OH yang terdapat pada setiap satuan berulang memungkinkan PVA berinteraksi dengan air dan dengan bahan lain melalui ikatan hidrogen. Ikatan hidrogen merupakan gaya tarik antarmolekul yang melibatkan atom hidrogen dan atom yang memiliki keelektronegatifan tinggi, seperti oksigen.

Dalam penelitian ini, PVA digunakan sebagai matriks pembentuk nanofiber. Matriks merupakan bahan utama yang menjadi tempat komponen lain tercampur atau terikat. PVA membantu membentuk larutan polimer yang dapat diproses menggunakan metode *electrospinning*, sedangkan Fe_3O_4 ditambahkan sebagai komponen magnetik. Keberadaan PVA juga membantu mempertahankan partikel Fe_3O_4 di dalam campuran sehingga material dapat dibentuk menjadi lembaran nanofiber

(Fathurin., 2022). Setelah serat terbentuk, PVA dimodifikasi menggunakan glutaraldehida untuk meningkatkan kestabilannya terhadap air.

2.3.4 Glutaraldehida

Glutaraldehida atau *glutaraldehyde* (GA) merupakan senyawa organik dengan rumus kimia $C_5H_8O_2$. Senyawa ini tersusun atas lima atom karbon (C), delapan atom hidrogen (H), dan dua atom oksigen (O). Glutaraldehida memiliki dua gugus aldehida, yaitu gugus fungsi $-CHO$ yang terletak pada kedua ujung rantai karbonnya. Keberadaan dua gugus tersebut membuat GA dapat digunakan sebagai bahan pengikat silang atau *crosslinker* (Rahayu., 2017). Bentuk larutan glutaraldehida ditunjukkan pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Ilustrasi larutan glutaraldehida (GA).

Gambar 2.9 memperlihatkan glutaraldehida dalam bentuk larutan. Pengikat silang merupakan bahan yang menghubungkan satu rantai polimer dengan rantai polimer lainnya sehingga terbentuk jaringan yang lebih stabil. Pada PVA, glutaraldehida dapat berinteraksi dengan gugus hidroksil ($-OH$) yang terdapat pada rantai polimer. Proses tersebut membantu mengurangi kecenderungan PVA untuk mengembang atau larut ketika terkena air (Rahayu., 2017).

Dalam penelitian ini, glutaraldehida digunakan untuk memodifikasi nanofiber $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PVA}$ sebelum penambahan kurkumin. Modifikasi tersebut bertujuan membantu mempertahankan bentuk nanofiber ketika bersentuhan dengan larutan sampel. Proses pemberian GA dilakukan melalui paparan uap dan dilanjutkan dengan pemanasan.

2.3.5 Kurkumin

Kurkumin merupakan senyawa berwarna kuning hingga jingga yang terdapat pada rimpang kunyit. Senyawa ini termasuk dalam kelompok kurkuminoid, yaitu kelompok senyawa alami yang memberikan warna khas pada kunyit. Kurkumin memiliki rumus kimia $\text{C}_{21}\text{H}_{20}\text{O}_6$, yang tersusun atas unsur karbon (C), hidrogen (H), dan oksigen (O). Kunyit sebagai salah satu sumber alami kurkumin ditunjukkan pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10 Kunyit sebagai sumber alami kurkumin.

Gambar 2.10 memperlihatkan rimpang dan serbuk kunyit yang mengandung kurkumin. Pada struktur kimianya, kurkumin memiliki beberapa gugus fungsi, antara lain gugus hidroksil ($-\text{OH}$), gugus metoksi ($-\text{OCH}_3$), dan gugus karbonil ($\text{C}=\text{O}$). Gugus fungsi merupakan bagian tertentu dari suatu molekul yang memengaruhi sifat dan kemampuan senyawa tersebut untuk berinteraksi dengan senyawa lain.

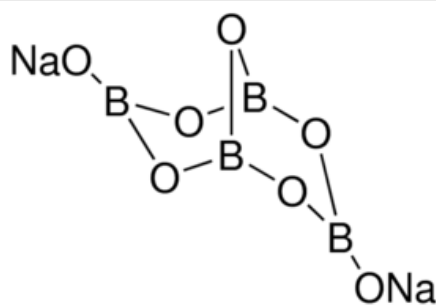
Kurkumin dapat berinteraksi dengan senyawa borat yang berasal dari boraks dan menghasilkan perubahan warna pada kondisi tertentu. Sifat tersebut menjadi dasar penggunaan kurkumin dalam beberapa metode sederhana untuk mengenali keberadaan boraks (Novitasari., 2022). Dalam penelitian ini, kurkumin digunakan sebagai komponen pengenal kimia pada nanofiber $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PVA-GA}$. Fe_3O_4 tetap berperan sebagai komponen magnetik, sedangkan kurkumin membantu memberikan bagian aktif yang dapat berinteraksi dengan boraks.

2.4 Sampel Uji

2.4.1 Boraks

Boraks merupakan senyawa natrium borat yang umumnya dijumpai dalam bentuk natrium tetraborat dekahidrat dengan rumus kimia $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$. Senyawa ini tersusun atas unsur natrium (Na), boron (B), oksigen (O), hidrogen (H), serta sepuluh molekul air kristal. Istilah dekahidrat menunjukkan bahwa setiap satu satuan senyawa boraks mengikat sepuluh molekul air di dalam struktur kristalnya. Boraks berbentuk padatan putih, mudah larut dalam air, dan menghasilkan larutan yang bersifat basa lemah (Ibrahim., 2024).

Struktur boraks mengandung ion natrium dan bagian bermuatan negatif yang tersusun atas atom boron serta oksigen. Gambaran sederhana struktur tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11 Ilustrasi struktur bagian tetraborat pada senyawa boraks.

Sumber: Unacademy.

Gambar 2.11 memperlihatkan beberapa atom boron yang terhubung melalui atom oksigen, sedangkan ion natrium berfungsi menyeimbangkan muatan negatif pada bagian borat. Ketika dilarutkan dalam air, boraks menghasilkan ion natrium dan beberapa bentuk spesies borat. Interaksi spesies borat dengan air menyebabkan larutannya memiliki sifat basa lemah (Gupta., 2021).

Boraks digunakan dalam beberapa keperluan nonpangan, seperti bahan pembersih, pengawet kayu, dan bahan tambahan pada proses industri. Namun, boraks tidak digunakan sebagai bahan tambahan pangan. Penyalahgunaannya masih dapat dijumpai pada beberapa produk pangan karena dapat memengaruhi tekstur dan daya simpan bahan (Ramli., 2019). Dalam penelitian ini, boraks digunakan sebagai analit utama. Borat yang berasal dari larutan boraks dapat berinteraksi dengan kurkumin pada nanofiber $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PVA-GA}/\text{kurkumin}$, kemudian perubahan respons material diamati menggunakan sensor GMR.

2.4.2 Formalin

Formalin merupakan larutan formaldehida di dalam air. Formaldehida adalah senyawa organik dengan rumus kimia CH_2O yang tersusun atas satu atom karbon (C), dua atom hidrogen (H), dan satu atom oksigen (O). Senyawa ini memiliki gugus aldehida atau $-\text{CHO}$, yaitu gugus fungsi yang mengandung ikatan rangkap antara atom karbon dan oksigen. Dengan demikian, formalin tidak merujuk pada satu molekul tertentu, melainkan pada larutan yang mengandung formaldehida (PubChem.).

Formalin banyak digunakan untuk keperluan nonpangan, seperti pengawetan spesimen dan bahan desinfektan. Senyawa ini tidak digunakan sebagai bahan tambahan pangan, tetapi keberadaannya masih dapat dijumpai akibat penyalahgunaan pada beberapa produk makanan (Santoso., 2024). Dalam penelitian ini, formalin digunakan sebagai bahan pembanding untuk mengetahui perbedaan respons sensor GMR terhadap boraks dan terhadap senyawa lain pada rentang konsentrasi pengujian

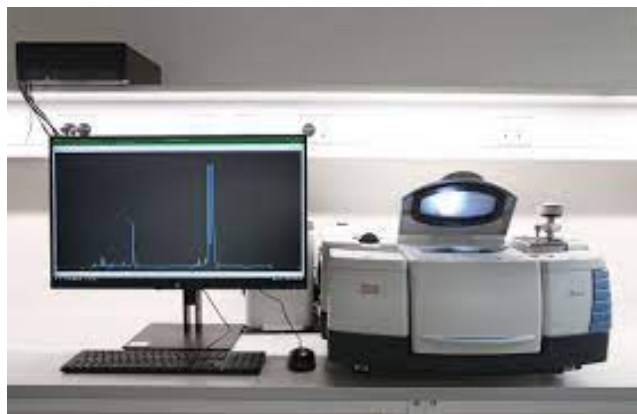
yang sama.

2.5 Karakterisasi Material

2.5.1 *Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)*

Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) merupakan metode karakterisasi yang digunakan untuk mengenali gugus fungsi pada suatu material berdasarkan penyerapan radiasi inframerah. Gugus fungsi adalah bagian tertentu dalam molekul yang menentukan sifat dan interaksi kimianya. Ketika radiasi inframerah mengenai sampel, ikatan kimia di dalam material akan menyerap energi pada bilangan gelombang tertentu dan mengalami getaran berupa peregangan atau pembengkokan ikatan (Ibrahim et al., 2024).

Hasil pengukuran FTIR ditampilkan dalam bentuk spektrum yang menghubungkan bilangan gelombang dengan intensitas serapan. Bilangan gelombang dinyatakan dalam satuan cm^{-1} dan menunjukkan daerah energi radiasi inframerah. Setiap pita serapan pada spektrum dapat dikaitkan dengan getaran gugus fungsi tertentu. Perangkat FTIR yang digunakan untuk melakukan pengukuran secara umum ditunjukkan pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12 Ilustrasi perangkat *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR).

Sumber: cantumkan sumber asli gambar.

Gambar 2.12 memperlihatkan unit utama FTIR yang terhubung dengan komputer. Sampel ditempatkan pada bagian pengukuran, kemudian radiasi inframerah diarahkan menuju sampel. Sinyal yang diterima oleh detektor diolah oleh komputer hingga menghasilkan spektrum. Detektor merupakan bagian alat yang menerima radiasi setelah berinteraksi dengan sampel.

Dalam penelitian ini, FTIR digunakan untuk membandingkan spektrum nanofiber $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PVA}$, $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PVA-GA}$, dan $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PVA-GA/kurkumin}$. Perbandingan dilakukan dengan memperhatikan kemunculan dan pergeseran pita serapan pada masing-masing sampel. Pergeseran pita digunakan sebagai petunjuk adanya perubahan lingkungan gugus fungsi setelah penambahan glutaraldehida dan kurkumin (Fitria., 2025).

2.6 Regresi Linear

Regresi linear merupakan metode yang digunakan untuk menggambarkan hubungan antara dua variabel dalam bentuk garis lurus. Dalam penelitian ini, konsentrasi sampel digunakan sebagai variabel bebas, sedangkan perubahan medan magnet sensor (ΔB) digunakan sebagai variabel terikat. Persamaan umum regresi linear dapat dituliskan sebagai (Montgomery et al., 2012):

$$\widehat{\Delta B} = \beta_0 + \beta_1 C, \quad (2.18)$$

dengan $\widehat{\Delta B}$ merupakan respons yang diperkirakan oleh model, C merupakan konsentrasi sampel, β_0 merupakan nilai konstanta, dan β_1 merupakan kemiringan garis. Nilai kemiringan menunjukkan besar perubahan respons sensor untuk setiap kenaikan satu satuan konsentrasi.

Regresi linear sesuai digunakan apabila kenaikan konsentrasi menghasilkan perubahan respons yang relatif tetap. Semakin dekat titik-titik pengukuran terhadap garis regresi, semakin baik model tersebut menggambarkan pola data. Dalam

penelitian ini, regresi linear digunakan untuk melihat kecenderungan hubungan antara konsentrasi dan respons pada boraks, formalin, NaCl, MSG, serta ekstrak bakso yang dikondisikan dengan boraks.

Kesesuaian model dinilai menggunakan koefisien determinasi (R^2), *root mean square error* (RMSE), dan *leave-one-concentration-out root mean square error* (LOCO RMSE). Nilai R^2 yang lebih tinggi menunjukkan bahwa model dapat menjelaskan perubahan data dengan lebih baik, sedangkan nilai RMSE dan LOCO RMSE yang lebih rendah menunjukkan kesalahan model yang lebih kecil.

2.7 Regresi Polinomial Orde Dua

Regresi polinomial orde dua digunakan ketika hubungan antara konsentrasi dan respons tidak membentuk garis lurus, tetapi menunjukkan pola melengkung. Model ini merupakan pengembangan regresi linear dengan menambahkan komponen kuadrat dari variabel konsentrasi. Persamaan regresi polinomial orde dua dapat dituliskan sebagai (Montgomery et al., 2012):

$$\widehat{\Delta B} = \beta_0 + \beta_1 C + \beta_2 C^2, \quad (2.19)$$

dengan $\widehat{\Delta B}$ merupakan respons yang diperkirakan oleh model, C merupakan konsentrasi sampel, sedangkan β_0 , β_1 , dan β_2 merupakan koefisien regresi. Koefisien β_2 menunjukkan kelengkungan kurva. Nilai β_2 yang negatif menghasilkan kurva yang cenderung melandai, sedangkan nilai positif menghasilkan kurva yang melengkung ke atas.

Dalam penelitian ini, regresi polinomial orde dua digunakan untuk mengikuti pola respons yang kenaikannya tidak sama pada seluruh rentang konsentrasi. Model ini terutama diperlukan ketika respons meningkat cukup besar pada konsentrasi rendah hingga menengah, kemudian perubahan respons menjadi lebih kecil pada konsentrasi yang lebih tinggi.

Kesesuaian regresi polinomial dibandingkan dengan regresi linear menggunakan nilai R^2 , RMSE, dan LOCO RMSE. Model yang dipilih adalah model yang lebih mampu mengikuti pola data dengan nilai R^2 lebih tinggi serta RMSE dan LOCO RMSE lebih rendah. Model polinomial pada penelitian ini hanya digunakan untuk menggambarkan hubungan pada rentang konsentrasi yang diuji dan tidak digunakan untuk memperkirakan respons di luar rentang tersebut.

2.8 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu digunakan untuk melihat perkembangan metode deteksi boraks berbasis kunyit atau kurkumin serta penggunaan sensor *Giant Magnetoresistance* (GMR) dalam membaca perubahan medan magnet. Penelitian yang dipilih memiliki hubungan dengan komponen utama penelitian ini, yaitu boraks, kurkumin, sampel pangan, material magnetik, dan instrumentasi GMR. Ringkasan penelitian tersebut disajikan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Penelitian terdahulu yang berkaitan dengan deteksi boraks berbasis kurkumin dan penggunaan sensor GMR

Penulis	Judul	Hasil Penelitian
Christica dkk. (2026)	Uji Kualitatif Boraks pada Bakso dan Mie Kuning Menggunakan Ekstrak Kunyit sebagai Indikator Alami	Ekstrak kunyit digunakan untuk menguji boraks pada sampel bakso dan mi kuning. Sampel yang mengandung boraks menunjukkan perubahan warna menjadi merah kecokelatan atau jingga tua, sedangkan sampel negatif tetap berwarna kuning. Metode ini dapat digunakan sebagai pemeriksaan awal, tetapi hasilnya masih bersifat kualitatif.

Bersambung ke halaman berikutnya

Tabel 2.1 – lanjutan

Penulis	Judul	Hasil Penelitian
Fitrah (2024)	Batas Deteksi <i>Test Kit</i> Sederhana Berbahan Dasar Kunyit untuk Mendeteksi Boraks pada Bakso dengan Kandungan yang Berbeda	<i>Test kit</i> berupa tusuk gigi yang direndam dalam ekstrak kunyit digunakan pada bakso dengan beberapa kadar boraks. Boraks mulai dapat terdeteksi pada kadar 0,05% dengan waktu pengujian 60 detik. Perbedaan warna yang lebih jelas terlihat pada kadar boraks yang lebih tinggi.
Malik dkk. (2024)	Perbandingan Metode <i>Rapid Test Kit</i> dengan Indikator Alami dalam Mendeteksi Kandungan Boraks pada Sampel Makanan	Pengujian dilakukan pada 30 sampel pangan menggunakan <i>rapid test kit</i> dan indikator kunyit. Kedua metode menghasilkan 19 sampel positif secara keseluruhan, tetapi tidak selalu memberikan hasil yang sama pada setiap sampel. Indikator kunyit lebih sederhana dan terjangkau, tetapi perubahan warnanya dapat dipengaruhi oleh kondisi sampel.

Bersambung ke halaman berikutnya

Tabel 2.1 – lanjutan

Penulis	Judul	Hasil Penelitian
Nurlailia dkk. (2021)	Analisis Kualitatif Kandungan Boraks pada Makanan di Wilayah Kota Banyuwangi	Pengujian menggunakan <i>test kit</i> boraks dilakukan pada 15 sampel pangan, termasuk bakso, pentol, kerupuk, tahu walik, dan cimol. Sebanyak 10 sampel menunjukkan hasil positif berdasarkan perubahan warna pada <i>test strip</i>. Penelitian ini menunjukkan penggunaan reagen berbasis kurkumin untuk pemeriksaan boraks pada berbagai matriks pangan.
Wu dkk. (2022)	<i>Giant Magnetoresistance Biosensors in Biomedical Applications</i>	Penelitian ini merangkum perkembangan sensor GMR untuk aplikasi biomedis, keamanan pangan, dan pengujian berbasis partikel magnetik. Sensor GMR dapat mengubah perubahan medan magnet di sekitar permukaan sensor menjadi perubahan sinyal listrik yang dapat diukur.

Bersambung ke halaman berikutnya

Tabel 2.1 – lanjutan

Penulis	Judul	Hasil Penelitian
Wang dkk. (2025)	<i>Integrated Microfluidic Giant Magnetoresistance Biosensor Platform for Magneto-resistive Immunoassay of Myoglobin</i>	Sensor GMR dipadukan dengan sistem mikrofluida dan partikel magnetik untuk mendeteksi mioglobin. Interaksi pada sistem pengujian menghasilkan perubahan magnetik yang kemudian dibaca oleh sensor GMR. Penelitian ini menunjukkan bahwa GMR dapat digunakan bersama material magnetik dalam sistem pengukuran.
Maulida dkk. (2025)	Pengembangan Aplikasi Sensor Giant Magnetoresistance Seri AB001-02 untuk Desain Alat Ukur Massa Berbasis Mikrokontroler ATmega328p	Sensor GMR seri AB001-02 digunakan untuk membaca perubahan medan magnet akibat perubahan posisi magnet. Perubahan medan tersebut menghasilkan perubahan tegangan keluaran yang dapat dibaca oleh mikrokontroler. Hasil ini menunjukkan bahwa sensor GMR dapat digabungkan dengan sistem akuisisi data berbasis mikrokontroler.

Bersambung ke halaman berikutnya

Tabel 2.1 – lanjutan

Penulis	Judul	Hasil Penelitian
Siswanto (2026)	Implementasi <i>Random Forest</i> Instrumentasi Sensor <i>Giant Magnetoresistance</i> dengan Nanofiber $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PVA-GOx}$ untuk Uji Sensitivitas Glukosa Monohidrat Non-Invasif pada Saliva	Instrumentasi GMR digunakan bersama nanofiber $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PVA-GOx}$ untuk mengukur respons terhadap glukosa pada saliva. Penelitian tersebut menggunakan sistem pengondisi sinyal, akuisisi data, dan perangkat GMR yang menjadi dasar pengembangan instrumen dalam penelitian ini. Analit dan komponen pengenalan yang digunakan berbeda karena penelitian tersebut menggunakan glukosa dan enzim GOx.

Berdasarkan Tabel 2.1, penggunaan kunyit atau kurkumin untuk mendeteksi boraks umumnya dilakukan melalui pengamatan perubahan warna. Metode tersebut mudah diterapkan dan dapat digunakan untuk pemeriksaan awal, tetapi sebagian besar hasilnya masih berupa penentuan positif atau negatif. Penilaian warna juga dapat dipengaruhi oleh warna awal, tingkat keasaman, dan komponen lain yang terdapat dalam sampel pangan.

Penelitian mengenai sensor GMR menunjukkan bahwa perubahan medan magnet dari suatu material magnetik dapat diubah menjadi sinyal listrik dan direkam menggunakan sistem akuisisi data. Sensor ini telah digunakan pada beberapa jenis pengukuran dan dapat dipadukan dengan partikel magnetik, pengondisi sinyal, ADC, serta mikrokontroler. Penelitian Siswanto menjadi rujukan yang paling dekat dari sisi perangkat karena menggunakan platform instrumentasi GMR dan nanofiber $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PVA}$, meskipun analit dan komponen pengenalnya berbeda.

Perbedaan penelitian ini terletak pada penggunaan nanofiber $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PVA}$ -

GA/kurkumin sebagai material aktif untuk pengujian boraks. Respons tidak ditentukan dari perubahan warna secara visual, tetapi dari perubahan medan magnet yang dibaca oleh sensor GMR. Pengujian dilakukan pada beberapa konsentrasi boraks, dibandingkan dengan formalin, NaCl, dan MSG, serta diterapkan pada ekstrak bakso yang dikondisikan dengan boraks. Hubungan antara konsentrasi dan respons sensor selanjutnya dibandingkan menggunakan regresi linear dan regresi polinomial orde dua.

