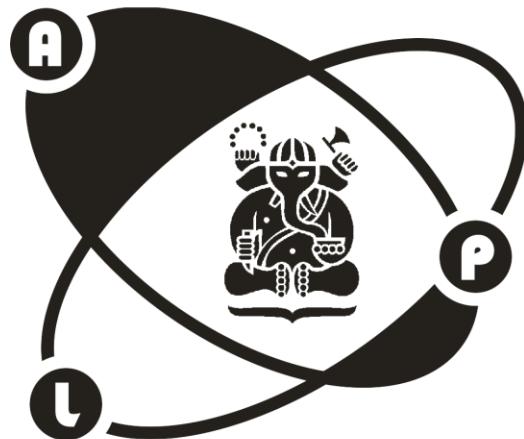


**LAPORAN EKSPERIMENT FISIKA II  
ELECTRON SPIN RESONANCE (ESR)**

**oleh**

**M. Afief Abdurrahman, Auza N. Abraar, Muhammad Daffa Fawwaz  
F. J.**

**10221006, 10221016, 10221040**



**LABORATORIUM FISIKA LANJUT**

**PROGRAM STUDI FISIKA**

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM**

**INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG**

**2023-2024**

## **Abstrak**

Electron Spin Resonance atau ESR merupakan fenomena yang memanfaatkan sifat intrinsik dari elektron yaitu spin. Spin elektron digambarkan sebagai elektron yang berputar pada poros momen magnetnya atau disebut juga dengan *precession*. Spin elektron akan memiliki frekuensi *precession* tertentu sehingga pemberian medan magnet eksternal dengan frekuensi arus yang sama akan menyebabkan resonansi. Terdapat besaran yang menghubungkan antara momen dipol magnet dengan momentum sudut dari spin elektron yaitu faktor g sebagai konstanta kesebandingannya. Tujuan dari eksperimen ini adalah menentukan faktor g yang dimiliki oleh sampel DPPH melalui fenomena ESR. Didapat besar faktor  $g \approx 2,00$  yang menunjukkan bahwa spin sangat memengaruhi magnetisme dari elektron namun tetap ada pengaruh nyata dari struktur molekul DPPH yang menyebabkan faktor g tidak tepat bernilai dua.

Kata kunci: DPPH, *elektron spin resonance*, faktor Lande, rasio giromagnetik

## Daftar Isi

<b>ABSTRAK .....</b>	<b>2</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>3</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN .....</b>	<b>4</b>
<b>BAB II DASAR TEORI.....</b>	<b>5</b>
II.1 ELECTRON SPIN RESONANCE (ESR).....	5
II.2 PARAMAGNETISME .....	5
II.3 EFEK ZEEMAN.....	6
II.4 RADIASI PENGION.....	7
II.5 BOHR MAGNETON .....	8
II.6 SIFAT ELEKTRON PADA MEDAN MAGNET EKSTERNAL.....	9
II.7 BILANGAN KUANTUM DAN <i>TERM SYMBOL</i> .....	11
<b>BAB III METODE DAN HIPOTESIS.....</b>	<b>13</b>
III.1 METODE .....	13
III.2 HIPOTESIS .....	13
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>	<b>15</b>
IV.1 HASIL EKSPERIMENT .....	15
IV.2 PEMBAHASAN .....	18
IV.2.1 Pertanyaan.....	18
IV.2.2 Analisis .....	18
IV.2.3 <i>Open Problem</i> .....	20
<b>BAB V KESIMPULAN .....</b>	<b>22</b>
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>23</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>25</b>

## Bab I Pendahuluan

*Electron spin resonance* (ESR) *spectroscopy* mengukur penyerapan gelombang mikro oleh *paramagnetic center* dengan satu atau lebih elektron berpasangan (Eaton, 2003).

Pada eksperimen ini, akan dilakukan percobaan dengan set alat *Electron Spin Resonance* (ESR). Sebuah sampel DPPH akan diletakkan di dua kumparan Helmholtz dan dicari arus listrik DC yang menghasilkan kurva tertentu di osiloskop. Setelah itu, data arus listrik DC yang didapat dikonversi menjadi data medan magnet yang kemudian akan dipakai dalam menentukan rasio giromagnetik  $\gamma_e$  dan faktor Lande  $g$ .

Terdapat dua tujuan kuantitatif yang akan dicapai dalam eksperimen ini:

1. Menentukan rasio giromagnetik  $\gamma_e$  hasil eksperimen dan membandingkannya dengan nilai referensi.
2. Menentukan faktor Lande  $g$  hasil eksperimen dan membandingkannya dengan nilai referensi.

Terdapat sebuah batasan yang diterapkan dalam pengambilan data:

1. Frekuensi sinyal ESR hanya dilakukan dari 5-120 MHz bukan sampai 130 MHz karena tidak adanya kumparan yang bisa meraih frekuensi di atas 120 MHz.

Terdapat sebuah asumsi yang digunakan dalam pengambilan dan pengolahan data:

1. Ketika pola sinyal pada osiloskop tepat di tengah, maka data arus listrik DC dapat diambil walaupun sinyal pada kiri dan kanannya beda tinggi.

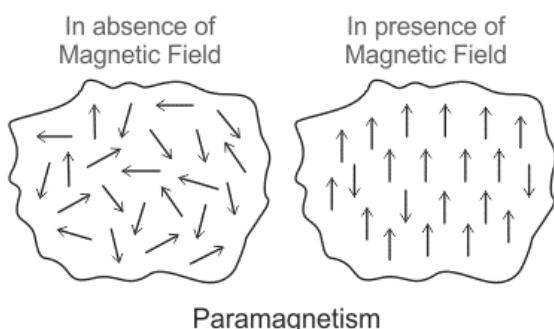
## Bab II Dasar Teori

### II.1 Electron Spin Resonance (ESR)

*Electron spin resonance (ESR) spectroscopy* mengukur absorpsi gelombang mikro oleh *paramagnetic center* dengan satu atau lebih elektron berpasangan (Eaton, 2003). Suatu elektron tidak berpasangan ( $s = \frac{1}{2}$ ) dapat memiliki dua keadaan spin ( $m_s = \pm \frac{1}{2}$ ) yang terdegenerasi dalam tidak adanya medan magnet eksternal. Dalam medan magnet, keadaan terdegenerasi ini hilang dan transisi dapat terjadi dengan memberikan energi pada sampel. Ketika energi foton gelombang mikro sama dengan separasi antara tingkat energi spin, sistem dianggap berada dalam “resonansi” dan adanya penyerapan energi oleh sampel.

### II.2 Paramagnetisme

Paramagnetisme adalah keadaan medan magnet suatu atom yang memiliki satu buah atau lebih elektron yang tidak berpasangan. Elektron tersebut akan dipengaruhi oleh medan magnet akibat momen dipol yang dimiliki elektron tersebut, sehingga saat atom dengan keadaan ini diberikan suatu medan magnet eksternal, maka *spin* dari elektron-elektronnya akan mengarah pada arah yang sama. Hal ini mengakibatkan atom tersebut akan kehilangan sifat magnetnya saat medan magnet luar ini dihilangkan (Clark et al, 2011).



**Gambar II.1.** Ilustrasi orientasi *spin* elektron yang berubah saat diberikan medan magnet eksternal (Clark et al, 2011).

### II.3 Efek Zeeman

Elektron adalah sebuah partikel bermuatan negatif yang memiliki resultan momentum sudut tertentu, terdiri atas momentum sudut orbital dan momentum sudut *spin*. Tanpa adanya medan magnet luar, dua elektron memiliki keadaan *spin* dan energi yang sama, serta kemungkinan kedua elektron berada pada suatu keadaan *spin* tertentu bernilai sama (Chechik et al, 2016).

Apabila diberikan medan magnet luar, medan magnet dari elektron akan berinteraksi langsung dengan medan magnet luar  $\vec{B}$  dan energi interaksinya adalah

$$E = -\vec{\mu}_S \cdot \vec{B}. \quad (\text{II.1})$$

Tinjau komponen sumbu  $z$  dari medan magnet tersebut, maka energi interaksinya diberikan dengan

$$E_z = -\mu_z B, \quad (\text{II.2})$$

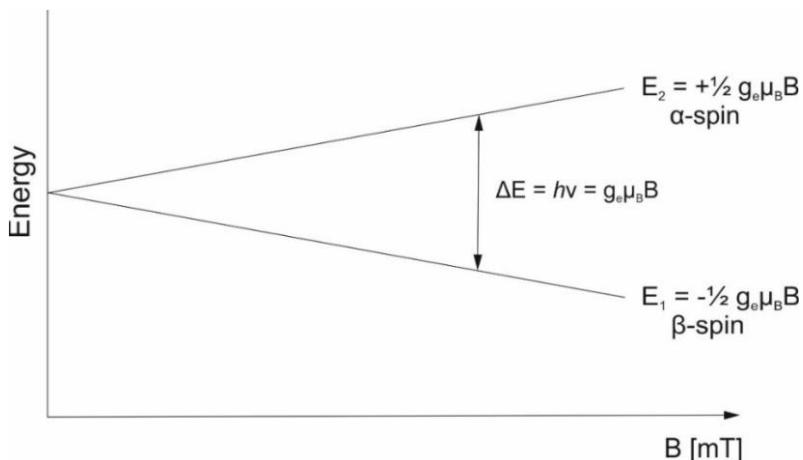
kemudian substitusikan persamaan momen magnet pada sumbu-z,

$$\mu_z = -g_e \mu_B m_S B \quad (\text{II.3})$$

didapat bahwa energi interaksinya adalah

$$E = g_e \mu_B m_S B. \quad (\text{II.4})$$

Nilai dari  $m_S$  hanya terdapat dua kemungkinan, yaitu  $m_S = \pm 1/2$ , sehingga hanya terdapat dua kemungkinan energi interaksi, disebut sebagai tingkat elektron Zeeman.



**Gambar II.2.** Dengan menambahkan medan magnet luar, dua elektron akan mengalami efek Zeeman, dimana tingkat energi kedua elektron berbeda sebesar  $\Delta E$ . Transisi *spin* dari tingkat energi yang lebih tinggi ke tingkat energi yang lebih rendah akan terjadi saat radiasi elektromagnet yang berinteraksi memiliki frekuensi yang sama dengan kondisi resonansi (Chechik et al, 2016).

Terpisahnya tingkat energi *spin* elektron dalam suatu medan magnet disebut sebagai efek Zeeman. Tingkat energi yang lebih tinggi, diberi label  $E_2$ , terjadi ketika momen magnet elektron berarah tegak lurus terhadap medan magnet luar ( $\alpha$  spin state), sedangkan tingkat energi yang lebih rendah  $E_1$  terjadi ketika momen magnet elektron paralel dengan medan magnet ( $\beta$  spin state) (Chechik et al, 2016).

#### II.4 Radiasi Pengion

Radiasi pengion (*ionising radiation*) dapat dianggap sebagai bentuk apa saja dari paparan radiasi yang dapat menyebabkan ionisasi dalam skala subatomik (Jones & Karouia, 2010). Radiasi pengion ini dapat berupa gelombang elektromagnetik atau partikel yang harus memiliki energi yang cukup untuk menyebabkan ionisasi di molekul target. Untuk radiasi elektromagnetik, panjang gelombangnya sangat kecil sehingga menyebabkan energinya sangat besar jika dibandingkan radiasi yang bukan pengion. Contoh dari radiasi pengion adalah sinar X dan sinar Gamma. Reaksi-reaksi yang dapat memancarkan radiasi pengion dapat dibagi menjadi dua (Faw & Shultz, 2003):

1. Peluruhan radioaktif

Pada peluruhan radioaktif, nukleus dari atom mengubah susunan internal neutron dan protonnya secara internal untuk mencapai suatu konfigurasi yang lebih stabil. Dalam proses tersebut, radiasi pengion hampir selalu terpancar.

2. Reaksi biner

Reaksi biner melibatkan dua partikel atomik atau subatomik yang saling menimpa dan bereaksi untuk membuat satu atau lebih produk reaksi. Contohnya yaitu neutron berinteraksi dengan nukleus dari atom atau foton berinteraksi dengan nukleus atau elektron atomik.

## II.5 Bohr Magneton

Bohr magneton adalah suatu unit dari momen magnetik yang digunakan dalam penelitian partikel subatomik. Bohr magneton dapat didefinisikan sebagai berikut:

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{4\pi m_e} \quad (\text{II.5})$$

### Keterangan:

$e$  : Muatan elektron

$h$  : Konstanta Planck

$m_e$  : Massa elektron

Karena elektron berputar dan memiliki muatan listrik, elektron tersebut berlaku seperti magnet kecil yang kekuatannya diekspresikan dengan  $\mu_e$ . Menurut teori relativistik Paul Dirac, elektron memiliki momen magnetik  $\mu_e$  yang kekuatannya sama dengan satu Bohr magneton, namun elektrodinamika kuantum memprediksi bahwa  $\mu_B = (1 + \alpha)\mu_B$  dengan  $\alpha$  bilangan yang sangat kecil, sekitar 1/860.

## II.6 Sifat Elektron pada Medan Magnet Eksternal

Selain inti atom yang memiliki sifat resonansi magnetik pada spinnya, elektron yang tidak terikat juga memiliki properti intrinsik spin. Fenomena ini dijadikan eksperimen pada tahun 1944 oleh Zavoiskii yang awalnya dinamakan Electron Paramagnetic Resonance (EPR) hingga saat ini umumnya dinamakan Electron Spin Resonance (ESR). Percobaan ini merupakan tambahan dari eksperimen Stern-Gerlach pada tahun 1921 yang meneliti tentang sifat intrinsik partikel.

Fenomena penyerapan resonansi oleh sistem spin pada komponen magnetik akibat radiasi elektromagnetik dari luar. Secara klasik, elektron dengan spin  $S$  dan momen magnetik  $\mu_e$  akan memiliki torsi sebesar  $\mu \times H_0$  pada medan magnet eksternal. Hal ini menyebabkan perubahan sudut yang konstan sehingga dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\frac{d}{dt}(S\hbar) = \tau = \mu \times H_0 \quad (\text{II.6})$$

### Keterangan:

$d(S\hbar)/dt$  : Perubahan Momentum Sudut

$\mu$  : Momen Magnetik

$H_0$  : Medan Magnetik

Dari persamaan tersebut juga dapat diketahui besar frekuensi spin elektron pada sudut tertentu yang dinamakan frekuensi Larmor yang dirumuskan sebagai berikut:

$$\omega_0 = \gamma_e H_0 \quad (\text{II.7})$$

Sehingga

$$f_L = \frac{\gamma_e H_0}{2\pi} \quad (\text{II.8})$$

Dengan  $f_L$  merupakan frekuensi Larmor yang berdasarkan  $\gamma_e =$  rasio gyromagnetik dari elektron yang dirumuskan oleh:

$$\gamma_e = -\frac{ge}{2mc} \quad (\text{II.9})$$

Ketika diberikan medan magnet tambahan  $H_1$  dengan frekuensi arus DC yang diberikan adalah sebesar  $\omega_1 = \gamma_e H_1$ . Untuk  $\omega_0 \gg \omega_1$  maka  $\mu$  dari elektron akan bergerak secara lambat sehingga berbalik arah dengan orientasi awalnya saat diberikan  $H_0$ . Dengan  $\mu$  dirumuskan sebagai momen dipol elektron yang berlawanan dengan momentum sudutnya sehingga:

$$\mu = -\gamma \hbar S \quad (\text{II.10})$$

Faktor  $g$  Landé merupakan konstanta kesebandingan antara momen dipol magnetik dan momentum sudutnya sehingga semua partikel yang memiliki spin akan didefinisikan sifatnya oleh responnya terhadap medan magnetik yaitu momen magnetik dan faktor  $g$ . Faktor  $g$  akan cenderung bernilai 1 apabila magnetismenya hanya dipengaruhi oleh momentum sudut orbitalnya dan bernilai 2 apabila hanya spin yang memengaruhi magnetisme. Pada kenyataannya, besar faktor  $g$  tidak akan tepat 1 maupun 2 karena pengaruh kondisi seperti *spin-orbit coupling*, *anisotropy*, dan *exchange interaction*. Hubungan antara momen magnetik dengan momentum sudut total  $\vec{J}$  dapat didefinisikan dalam bentuk:

$$\overrightarrow{\mu_J} = -g_J \cdot \frac{\mu_B}{\hbar} \cdot \vec{J} \quad (\text{II.11})$$

### **Keterangan:**

$\overrightarrow{\mu_J}$  : Momen Magnetik

$h$  : Konstanta Planck

$g_J$  : Faktor *splitting* Landé

$\vec{J}$  : Momentum Sudut

$\mu_B$  : Bohr magneton

Sehingga energi potensial  $E$  akibat medan magnet  $\vec{B}_0$  adalah:

$$E = -\vec{\mu}_J \cdot \vec{B}_0 \quad (\text{II.12})$$

Pada eksperimen ini, frekuensinya disesuaikan dengan arus DC yang diberikan pada dua kumparan Helmholtz yang menghasilkan medan magnet  $B_0$  sehingga terjadi resonansi antara frekuensi yang dihasilkan arus DC pada kumparan  $B_0$  dengan elektron yang mengalami *precession* akibat medan magnet Helmholtz  $B_0$ .

## II.7 Bilangan Kuantum dan *Term Symbol*

Bilangan kuantum merupakan suatu himpunan bilangan yang dapat menjelaskan elektron-elektron dalam atom (Darji, n. d.). Bilangan kuantum terdiri dari empat jenis yaitu bilangan kuantum utama  $N$ , momentum sudut  $L$ , magnetik  $m_l$ , dan spin  $m_s$ . Berdasarkan Asas Larangan Pauli maka tidak mungkin ada dua keadaan kuantum yang memiliki semua bilangan kuantum yang sama.

**Tabel II.1.** Nilai yang mungkin dari bilangan kuantum

Bilangan kuantum	Simbol	Nilai yang mungkin
Utama	$N$	1, 2, 3, 4, ...
Momentum sudut	$L$	0, 1, 2, 3, ..., $(n - 1)$
Magnetik	$m_l$	$-l, \dots, -1, 0, +1, \dots, +l$
Spin	$m_s$	$+1/2, -1/2$

*Term symbol* merupakan simbol yang menandai konfigurasi elektron dan keadaan energi berbeda dalam atom (Darji, n. d.). Simbol ini ditentukan dengan *Russell-Saunders coupling scheme* atau kopling L-S, dan digunakan untuk atom kecil dengan  $Z < 30$ . Bentuk dari *term symbol* adalah  $^{2S+1}L_J$ , dengan  $L$  adalah momentum sudut orbital,  $J$  adalah momentum sudut total, dan  $2S+1$  adalah *spin multiplicity* atau multiplisitas spin yaitu banyaknya kombinasi nilai  $J$  yang mungkin dari nilai  $L$  dan  $J$

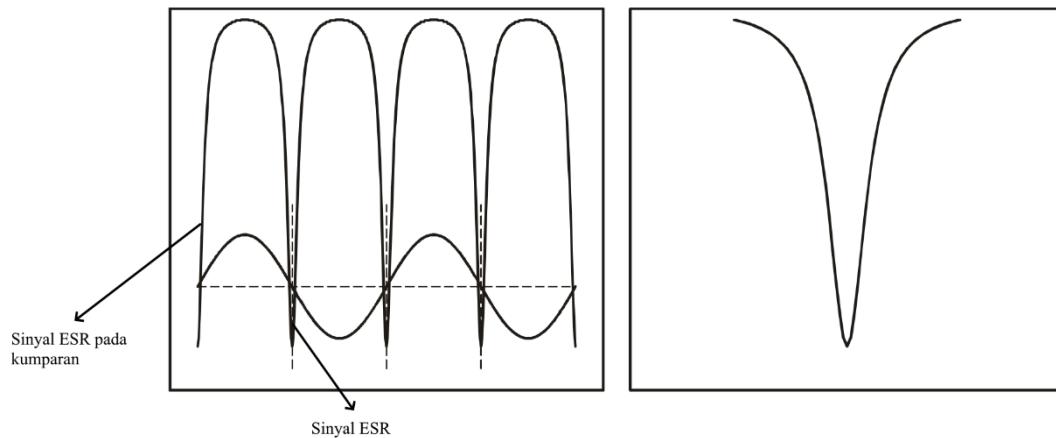
yang diketahui. Nilai S dapat diketahui dengan kopling s-s, nilai L dapat diketahui dengan kopling l-l, dan nilai J dapat diketahui dengan kopling L-S.

## Bab III Metode dan Hipotesis

### III.1 Metode

Pertama-tama, hal yang dilakukan adalah mempersiapkan set alat sesuai panduan. Kemudian, catu daya dinyalakan dan osiloskop dikalibrasi. Arus AC diatur dengan memutar knop  $I_{\sim}$  ke tengah, dan fasa diatur dengan memutar knop *phase* ke arah kanan sampai maksimum.

Untuk variasi pertama, frekuensi sinyal ESR diatur sebesar 15 MHz. Arus DC diatur dengan memutar knop  $I_{=}$  pada catu daya hingga terlihat kurva sinyal seperti pada gambar berikut.



**Gambar III.1.** Gambar kurva sinyal ESR.

Setelah diperoleh pola tersebut, Arus DC dan jenis kumparan dicatat. Langkah-langkah ini diulangi untuk semua kumparan dengan variasi kenaikan frekuensi sebesar 5 MHz sampai nilai frekuensinya sebesar 130 MHz.

### III.2 Hipotesis

Hipotesis yang digunakan pada eksperimen ini adalah bahwa arus DC ( $I_{=}$ ) yang menghasilkan frekuensi resonansi paling baik pada bahan tidak akan sesuai dengan

yang tertera pada modul *Leybold ESR*. Hal ini dihipotesiskan akan mengakibatkan besar faktor  $g$  yang tidak berada tepat di  $g_{ref} = 2,0036$ . Hal ini disebabkan pada bahan 1,1-diphenyl-2-picryl-hydrazyl (DPPH) memiliki gerak orbital elektron yang mempengaruhi eksperimen.

## Bab IV Hasil dan Pembahasan

### IV.1 Hasil Eksperimen

Percobaan dilakukan dengan menggunakan ukuran kumparan besar, sedang, dan kecil dengan arus yang diatur pada frekuensi yang sesuai dengan modul *Leybold Electron Spin Resonance (ESR)*. Besar arus DC kemudian disesuaikan kembali hingga menghasilkan resonansi paling tinggi yang ditandai dengan grafik XY dari tegangan yang simetris. Data hasil pengamatan dapat dilihat pada lampiran. Arus yang telah diperoleh dicatat dan dikonversi dengan menggunakan persamaan berikut:

$$B = \mu_0 \left(\frac{4}{5}\right)^{\frac{3}{2}} \frac{n}{r} I_{DC} \quad (\text{IV.1})$$

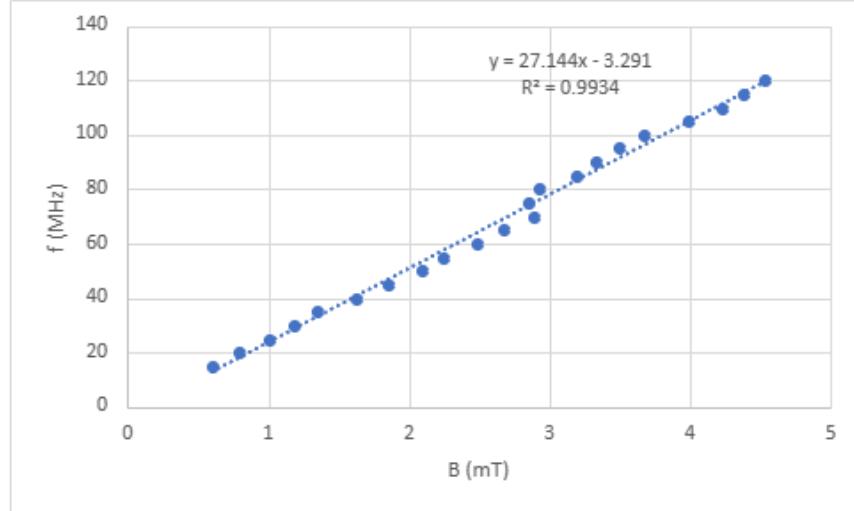
Sehingga didapat data pada tabel berikut:

**Tabel IV.1.** Data Frekuensi terhadap Medan Magnet

f (MHz)	B (mT)
15	0.608356984
20	0.793330391
25	1.00296692
30	1.183829807
35	1.344140093
40	1.619544944
45	1.853844593
50	2.088144243
55	2.244344009
60	2.486864698
65	2.667727586
70	2.885585154

<b>f (MHz)</b>	<b>B (mT)</b>
75	2.844479953
80	2.930800876
85	3.193874166
90	3.333631852
95	3.498052658
100	3.674805025
105	3.983094038
110	4.225614727
115	4.377703973
120	4.533903739

Dengan membuat plot kurva dengan frekuensi sebagai sumbu Y dan medan magnet sebagai sumbu X, didapat *fitting* kurva sebagai berikut:



**Gambar IV.1.** Kurva Frekuensi terhadap Medan Magnet

Sehingga dari data tersebut didapat besar  $\gamma_e$  dari persamaan:

$$f = \gamma_e B \quad (\text{IV.2})$$

Maka:

$$\gamma_e = f/B = 27,144 \text{ MHz}/mT \quad (\text{IV.3})$$

Didapat *g-factor* dari persamaan berikut:

$$g = \frac{h}{\mu_B} \gamma_e$$
$$= \frac{6,63 \times 10^{-34} \text{ Js}^2}{9,27 \times 10^{-24} \text{ Am}^2} \cdot 27,144 \frac{\text{MHz}}{\text{mT}} = 1,94$$

Dihasilkan galat dengan menggunakan  $g_{referensi}$  sebesar 2,00 yaitu:

$$\% \text{galat} = \frac{|g - g_{ref}|}{g_{ref}} = \frac{|1,94 - 2,00|}{2,00} = 3,21\%$$

## **IV.2 Pembahasan**

### **IV.2.1 Pertanyaan**

#### **Pertanyaan 1**

*Jelaskan makna fisis dari faktor Landé g-factor!*

Secara fisis, faktor  $g$  Landé merupakan karakteristik yang dimiliki partikel berhubungan dengan gabungan dari momen magnetik dan momentum sudut dari spin partikel. Faktor Landé berhubungan dengan faktor-g namun tidak sama yaitu faktor Landé merupakan faktor- $g$  yang memiliki kedua sistem momentum sudut spin dan orbitalnya.

#### **Pertanyaan 2**

*Jelaskan mengapa sampel yang digunakan adalah DPPH!*

Pemilihan DPPH bergantung kepada struktur molekul dan sifat elektron pada atom dalam molekulnya. Pada 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl dipilih karena memiliki 1 buah elektron yang tidak berpasangan yang terdelokalisasi di antara dua atom nitrogen sehingga kedua atom tersebut setara. Hal ini mengakibatkan pengaruh lingkungan pada elektron semakin kecil sehingga dampak dari *spin-orbit coupling* dan struktur yang anisotropiknya tidak begitu berpengaruh dan menghasilkan faktor-g sebesar 2.

### **IV.2.2 Analisis**

#### **Analisis 1**

*Jelaskan mengapa arus AC yang diatur pada unit ESR harus berada di tengah!*

Arus AC pada unit ESR merupakan arus yang digunakan untuk modulasi. Modulasi merupakan metode yang digunakan untuk memodifikasi sinyal keluaran yang dihasilkan. Ketika modulasi medan magnet yang diberikan terlalu kecil maka resolusi sinyal yang dihasilkan baik namun sensitivitasnya berkurang dan ketika modulasi

medan magnetnya terlalu besar maka gelombang akan mengalami distorsi. Hal ini menjadikan kebutuhan pengamatan untuk memiliki SNR dan resolusi yang ideal dengan mengoptimalkan arus modulasinya.

### **Analisis 2**

*Jelaskan besar g-factor yang dihasilkan dan jelaskan apa yang menyebabkan terjadinya galat dari g-factor!*

*G-factor* yang dihasilkan dari eksperimen bernilai 1,94 dan didapat galat sebesar 3,21%. Berdasarkan galat yang dihasilkan, dapat disimpulkan bahwa galatnya cukup kecil dikarenakan faktor *g* dari hasil eksperimen dan perhitungan mendekati 2. Faktor yang menyebabkan galat faktor *g* adalah tidak sejajarnya kumparan Helmholtz dan kurang telitinya nilai yang didapat.

### **Analisis 3**

*Jelaskan mengapa sinyal yang dihasilkan berbentuk sedemikian rupa! dan mengapa bentuk sinyal yang dihasilkan idealnya simetris! Tinjau secara fisis pada fenomena ESR.*

Sinyal yang dihasilkan dari osiloskop merupakan pembacaan dari tegangan osilasi pada kumparan. Bentuk curam lembah sedemikian rupa merupakan hasil dari elektron pada sampel DPPH yang menyerap energi akibat fenomena resonansi yang terjadi. Hal ini menjadikan bentuk lembah yang semakin curam apabila dipilih frekuensi resonansi yang sesuai dengan *precession* dari elektron bebas pada DPPH.

Sinyal keluaran yang ideal pada osiloskop adalah simetris pada mode XY. Hal ini mengartikan bahwa arus listrik yang diatur untuk menghasilkan medan magnet  $B_0$  menjadikan momentum sudut dan precession-nya sudah beresonansi dengan frekuensi yang diberikan oleh *basic unit* ESR.

### **Analisis 4**

*Dari ketiga kumparan, manakah yang menghasilkan frekuensi paling tinggi? Urutkan ketiga kumparan tersebut berdasarkan nilai frekuensi yang dihasilkan!*

Berdasarkan hasil pengukuran yang dapat dilihat pada bagian lampiran. Digunakan kumparan ukuran kecil untuk frekuensi yang tinggi ( $7.5 \times 10^7 - 12 \times 10^7$  Hz), dan kumparan ukuran besar untuk frekuensi rendah ( $1.5 \times 10^7 - 3 \times 10^7$  Hz). Hal ini juga selaras dengan fakta bahwa frekuensi berbanding lurus dengan medan magnet yang mengandung variabel jari-jari ( $1/r$ ), sehingga semakin besar jari-jari, maka frekuensi yang dihasilkan semakin kecil.

### **Analisis 5**

*Berapakah nilai g-factor yang dimiliki oleh elektron bebas? Mengapa nilai g-factor tersebut tidak sama dengan nilai g-factor klasik ( $g_e = 1$ )?*

Faktor  $g$  yang dimiliki oleh elektron bebas adalah  $g_e = 2.0$ , berbeda dengan faktor  $g$  klasik yaitu  $g = 1.0$ . Tinjau persamaan giromagnetik berikut

$$\mu/L = g_e(q/2m_e) \quad (\text{IV.4})$$

karena pada kasus elektron bebas hanya setengah dari massa elektromagnet yang berkontribusi ke momentum sudut yang dimiliki, maka substitusikan  $L \rightarrow L/2$  sehingga didapat bahwa  $g_e$  bernilai dua kali nilai rasio giromagnetik klasik, atau nilai  $g_e = 2.00$  untuk elektron bebas.

#### **IV.2.3 Open Problem**

*Jelaskan apa yang akan terjadi bila variasi kenaikan frekuensi sebesar 2 MHz dan pengaruhnya kepada g-factor yang didapat!*

Bila variasi kenaikan frekuensi sebesar 2 MHz, maka akan ada lebih banyak nilai arus DC yang didapat dari eksperimen yang menyebabkan lebih banyak juga data medan magnet yang didapat. Oleh karena itu, data kenaikan frekuensi terhadap kenaikan

medan magnet akan lebih detail karena lebih banyak titik data, dan hasil *fitting* dapat menjadi lebih baik atau lebih buruk tergantung data yang didapat. Pengaruhnya terhadap *g-factor* yang didapat disebabkan rasio giromagnetik (gradien garis dari plot data) yang didapat berbeda.

## **Bab V Kesimpulan**

1. Menurut hasil eksperimen, didapat nilai  $\gamma_e$  hasil eksperimen adalah 27.14, dengan galat 2.63% dari referensi  $\gamma_{e_{ref}} = 27.88$ .
2. Menurut hasil eksperimen, didapat nilai  $g_e$  hasil eksperimen adalah 1.94, dengan galat 3.21% dari referensi  $g_{e_{ref}} = 2.00$ .

## Daftar Pustaka

Chechik V., Carter E., dan Murphy D. (2016). *Electron Paramagnetic Resonance*. Oxford University Press. ISBN: 9780198727606.

Clark J., Spinney R. (2013). *Magnetic Properties*. LibreTexts.

Eaton, G. R., & Eaton, S. S. (2003). 2.2—Electron Paramagnetic Resonance Spectroscopy. Dalam J. A. McCleverty & T. J. Meyer (Ed.), *Comprehensive Coordination Chemistry II* (hlm. 37–48). Pergamon. <https://doi.org/10.1016/B0-08-043748-6/01105-1>

Faw, R. E., & Shultz, J. K. (2003): Radiation Sources. Dalam R. A. Meyers (Ed.), *Encyclopedia of Physical Science and Technology (Third Edition)* (hlm. 613–631). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B0-12-227410-5/00636-0>

Jones, J. A., Casey, R. C., & Karouia, F. (2010): 14.10—Ionizing Radiation as a Carcinogen\*. Dalam C. A. McQueen (Ed.), *Comprehensive Toxicology (Second Edition)* (hlm. 181–228). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-046884-6.01411-1>

Leybold. (1989). *Instruction Sheet: ESR Basic Unit*. Leybold Didactic GMBH. <https://www.ld-didactic.de/documents/en-US/GA/GA/5/514/51455e.pdf>

Sunandana, C. S. (1998). *Techniques and applications of electron spin resonance*. 21(1), 1–70. doi:10.1007/bf02745018

### **Pustaka dari sumber internet:**

Britannica, T. Editors of Encyclopaedia (2023). *Bohr magneton*. Encyclopedia Britannica. <https://www.britannica.com/technology/Bohr-magnetons>, diakses pada 1 Desember 2023.

Darji. (n. d.): US06CCHE22 INORGANIC CHEMISTRY Unit-3(A) Term Symbol (B)  
Electronic spectra of metal complexes,  
<http://www.vpscience.org/materials/US06CCHE22%20Term%20Symbol.pdf>,  
diakses pada 1 Desember 2023.

*Experiment #2B: Electron Spin Resonance Spectroscopy.*  
[http://web.mit.edu/5.33/www/ESR\\_05.pdf](http://web.mit.edu/5.33/www/ESR_05.pdf) (diakses pada 30 November 2023)

## Lampiran

**Tabel V.1.** Data hasil pengamatan arus dan medan magnet pada kumparan

<b><math>f(MHz)</math></b>	<b><math>I_{DC} (A)</math></b>	<b><math>B(mT)</math></b>	<b>Kumparan</b>
15.0	0.148	0.608	Besar
20.0	0.193	0.793	Besar
25.0	0.244	0.100	Besar
30.0	0.288	0.118	Besar
30.0	0.278	0.114	Sedang
35.0	0.327	0.134	Sedang
40.0	0.394	0.162	Sedang
45.0	0.451	0.185	Sedang
50.0	0.508	0.209	Sedang
55.0	0.546	0.224	Sedang
60.0	0.605	0.249	Sedang
65.0	0.649	0.267	Sedang
70.0	0.702	0.289	Sedang
75.0	0.692	0.284	Kecil
80.0	0.713	0.293	Kecil
85.0	0.777	0.319	Kecil
90.0	0.811	0.333	Kecil
95.0	0.851	0.350	Kecil
100.0	0.894	0.367	Kecil
105.0	0.969	0.398	Kecil
110.0	1.028	0.423	Kecil
115.0	1.065	0.430	Kecil
120.0	1.103	0.453	Kecil