

## BAB II

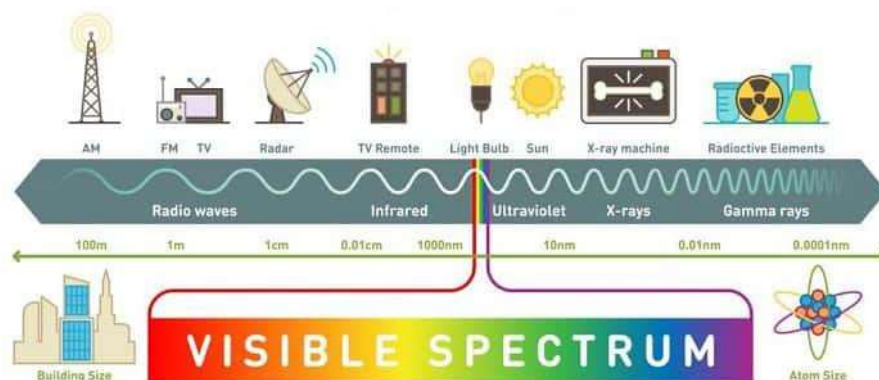
### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Landasan Teori

##### 2.1.1 Gelombang Elektromagnetik

Gelombang adalah gangguan periodik yang memindahkan energi melalui suatu medium atau ruang tanpa menyebabkan perpindahan permanen pada medium itu sendiri. Gelombang dapat bersifat mekanis, seperti gelombang suara yang membutuhkan medium untuk merambat, atau bersifat elektromagnetik seperti gelombang cahaya yang dapat merambat melalui ruang hampa (Sanghera, 2007). Gelombang elektromagnetik yang juga dikenal sebagai radiasi elektromagnetik adalah gelombang medan listrik dan medan magnet yang merambat melalui ruang kosong. Gelombang ini tercipta dari penggabungan medan listrik dan medan magnet yang berosilasi, yang tegak lurus satu sama lain dan terhadap arah perambatan gelombang (Stump, 2004).

Gelombang elektromagnetik dapat dikelompokkan menurut rentang frekuensinya dan panjang gelombangnya. Seluruh rentang frekuensi gelombang elektromagnetik disebut spektrum elektromagnetik, yang diilustrasikan pada Gambar 2.1, bersama dengan nama-nama yang terkait dengan rentang frekuensi yang berbeda di dalam spektrum.



**Gambar 2.1 Spektrum Elektromagnetik**

Sumber: (Ouchi, 2013)

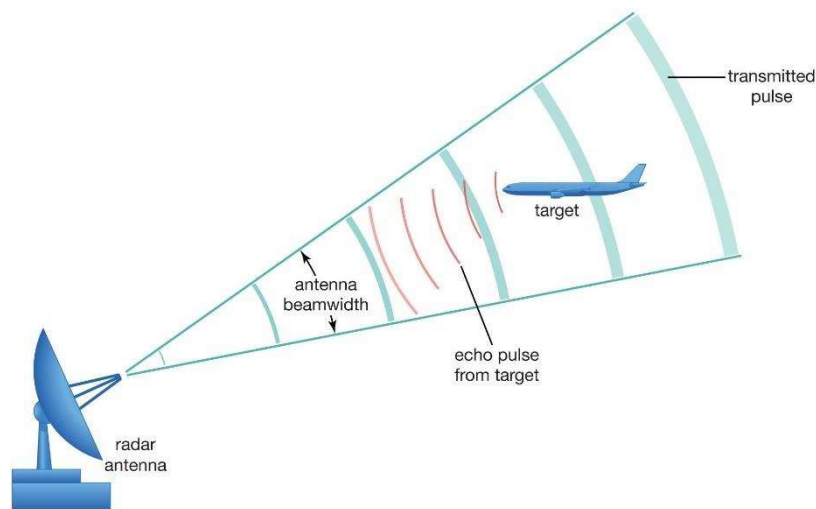
#### 2.1.1.1 Gelombang Mikro

Gelombang mikro adalah suatu bentuk energi elektromagnetik, di mana energi yang diterapkan diubah menjadi panas melalui interaksi timbal balik antara komponen gelombang medan listrik dengan partikel bermuatan di dalam material (Bykov et al., 2001). Secara umum, radiasi gelombang mikro adalah istilah yang terkait dengan radiasi elektromagnetik apa pun dalam rentang frekuensi gelombang mikro dari 300 MHz hingga 300 GHz, ( $\lambda = 1 \text{ mm}$  hingga  $100 \text{ cm}$ ), yang berada di segmen antara inframerah dan gelombang radio dari spektrum elektromagnetik (Banik et al., 2003; Tanaka et al., 2013).

Gelombang mikro dapat digunakan dalam berbagai aplikasi. Dalam telekomunikasi gelombang mikro sangat penting untuk komunikasi satelit, jaringan seluler, dan sistem radar yang digunakan dalam pemantauan cuaca dan kontrol lalu lintas udara. Dalam bidang kedokteran, gelombang mikro digunakan dalam teknologi pencitraan. Dalam penelitian ilmiah, spektroskopi gelombang mikro membantu mempelajari rotasi molekul, sementara akselerator partikel memanfaatkan gelombang mikro untuk menggerakkan berkas partikel. Sedangkan dalam aplikasi militer dan keamanan melibatkan pengawasan berbasis radar, peperangan elektronik untuk gangguan komunikasi, dan penelitian yang sedang berkembang tentang senjata energi terarah (N. R. Khan & Rathod, 2018).

#### 2.1.1.2 Radar

Radar (*Radio Detection and Ranging*) adalah suatu sistem deteksi yang menggunakan gelombang elektromagnetik untuk mendeteksi, melacak, dan menentukan jarak serta kecepatan objek di lingkungan sekitarnya. Radar bekerja dengan memancarkan gelombang elektromagnetik dan menganalisis pantulan gelombang tersebut dari objek yang terkena (Rahman, 2019).



© Encyclopædia Britannica, Inc.

### Gambar 2.2 Prinsip Kerja Radar

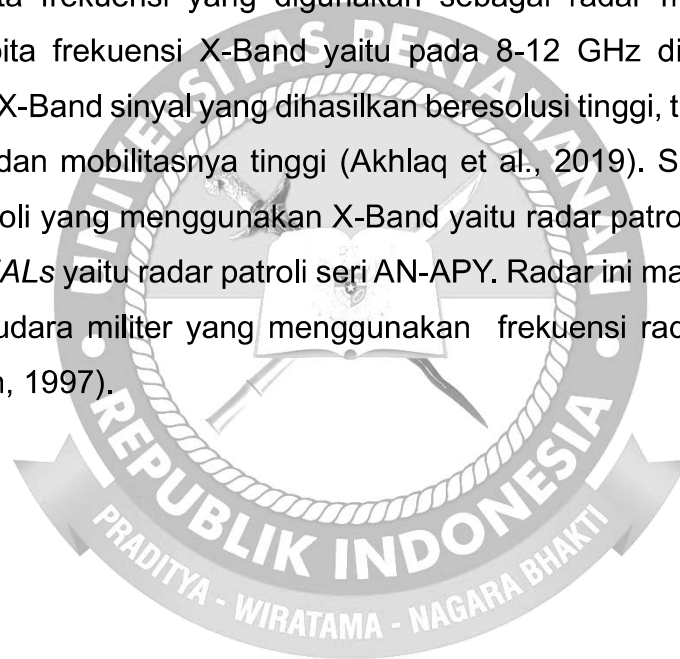
Sumber: Encyclopædia Britannica

Gambar 2.2 menunjukkan prinsip kerja dasar radar, yaitu sistem deteksi yang memanfaatkan gelombang elektromagnetik untuk menentukan posisi dan jarak suatu objek, seperti pesawat. Radar memancarkan pulsa gelombang mikro melalui antena dalam arah tertentu yang disebut *beamwidth*, lalu gelombang merambat dengan kecepatan cahaya ( $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ). Ketika pulsa mengenai target, sebagian energi dipantulkan kembali sebagai *echo pulse* dan diterima oleh antena. Secara fisika, kerja radar melibatkan konsep propagasi gelombang, pemantulan (refleksi), serta hukum pemantulan dan interferensi (DuCarme, 2019). Dengan mengukur selisih waktu antara pulsa yang dikirim dan diterima ( $\Delta t$ ), radar menghitung jarak target ( $R$ ) menggunakan rumus:

$$R = \frac{c \cdot \Delta t}{2} \quad (2.1)$$

Sejak Perang Dunia II, beberapa huruf telah digunakan untuk menunjukkan rentang frekuensi operasi radar. Standar Huruf IEEE STD 521 pertama kali diusulkan oleh *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) pada tahun 1976. Standar ini mengklasifikasikan sistem radar berdasarkan panjang gelombang atau rentang frekuensi tempat radar

beroperasi yang ditunjukkan pada Tabel 1 (Bruder, 2013; Eaves & Reedy, 1987). Setiap pita frekuensi memiliki karakteristiknya sendiri dan huruf-huruf yang digunakan menunjukkan jenis radar sesuai pengaruh frekuensi operasionalnya. *International Telecommunication Union* (ITU) juga memberikan penamaan tambahan untuk rentang frekuensi yang dalam banyak kasus sesuai dengan standar. Berdasarkan tabel tersebut diketahui bahwa pita frekuensi yang digunakan sebagai radar militer yaitu pada rentang pita frekuensi X-Band yaitu pada 8-12 GHz dikarenakan pada frekuensi X-Band sinyal yang dihasilkan beresolusi tinggi, tahan pada cuaca ekstrem, dan mobilitasnya tinggi (Akhlq et al., 2019). Salah satu contoh radar patroli yang menggunakan X-Band yaitu radar patroli militer milik *US Navy SEALs* yaitu radar patroli seri AN-APY. Radar ini mampu mendeteksi pesawat udara militer yang menggunakan frekuensi radar pada X-Band (Friedman, 1997).



Tabel 2.1 Pita Frekuensi Radar

| Pita Radar | Jangkauan Frekuensi | Panjang Gelombang  | Kegunaan                                                                                                        |
|------------|---------------------|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| TLF        | <3 Hz               | $>10^5$ km         | Frekuensi aktivitas neural.                                                                                     |
| ELF        | 3-30 Hz             | $10^5$ - $10^4$ km | Aktivitas neural, komunikasi dengan kapal selam.                                                                |
| SLF        | 30-300 Hz           | $10^4$ - $10^3$ km | Komunikasi dengan kapal selam.                                                                                  |
| ULF        | 300-3000 Hz         | $10^3$ -100 km     | Komunikasi di tambang bawah tanah.                                                                              |
| VLF        | 3-30 kHz            | 100-10 km          | Bantuan radio, sinyal waktu, komunikasi bawah air, alat pengukur tekanan nirkabel, geofisika.                   |
| LF         | 30-300 kHz          | 10-1 km            | Radio AM, sinyal waktu, siaran AM (gelombang panjang), RFID, radio amatir.                                      |
| MF         | 300-3000 kHz        | 1 km-100 m         | Siaran AM (gelombang medium), radio amatir, navigasi radio (mis. suar radio).                                   |
| HF         | 3-30 MHz            | 100-10 m           | Komunikasi luar cakrawala; jangkauan jauh tetapi resolusi rendah.                                               |
| VHF        | 30-300 MHz          | 10-1 m             | Jarak jauh, melawan <i>stealth</i> , penembusan tanah; resolusi rendah/sedang.                                  |
| UHF        | 300-1000 MHz        | 1-0,3 m            | Pengawasan jarak jauh, FOPEN; resolusi rendah/sedang.                                                           |
| L          | 1-2 GHz             | 30-15 cm           | Kontrol lalu lintas udara jarak jauh; resolusi sedang, pengaruh kecil dari cuaca.                               |
| S          | 2-4 GHz             | 15-7,5 cm          | Kontrol lalu lintas udara terminal, pengamatan cuaca jarak jauh, pemantauan efek cuaca sedang saat hujan deras. |
| C          | 4-8 GHz             | 7,5-3,75 cm        | Pelacakan jarak jauh, pengamatan cuaca, lokasi senjata; efek cuaca ringan/sedang.                               |
| X          | 8-12,5 GHz          | 3,75-2,4 cm        | Pelacakan jarak pendek, pemandu rudal, radar laut, pencegahan udara, pengawasan medan perang, lokasi senjata.   |
| $K_u$      | 12,5-18 GHz         | 2,4-1,7 cm         | Pemetaan resolusi tinggi, radar satelit, pengawasan jarak pendek (terbatas oleh uap air).                       |
| K          | 18-26,5 GHz         | 1,7-1,1 cm         | Radar polisi; sangat terbatas karena pengaruh uap air.                                                          |
| $K_a$      | 26,5-40 GHz         | 1,1-0,75 cm        | Pemetaan resolusi tinggi jarak pendek, pengawasan bandara; pengaruh besar uap air.                              |
| V          | 40-75 GHz           | 0,75-0,4 cm        | Pengindraan jauh ilmiah; sangat dipengaruhi uap air.                                                            |
| W          | 75-110 GHz          | 0,4-0,2 cm         | Pengendali mobil (77 GHz), pemandu rudal, radar pencitraan resolusi tinggi (94 GHz).                            |
| Milimeter  | 110-300 GHz         | 0,2-0,2 cm         | Eksperimental; terbatas untuk jarak pendek karena dipengaruhi uap air.                                          |

Sumber: (Eaves &amp; Reedy, 1987)

### 2.1.2 Teknologi Siluman (*Stealth Technology*)

Dalam aplikasi militer, teknologi siluman sangat penting untuk bidang pertahanan, dimana teknologi siluman dapat membuat sebuah sistem kurang atau bahkan tidak terdeteksi oleh radar. Dalam konteks ini, *radar cross section* (RCS) harus diminimalkan untuk meningkatkan performa teknologi siluman (Gohardani et al., 2014). RCS dapat diartikan sebagai kekuatan sinyal radar yang dipantulkan kembali dari suatu objek ketika terkena gelombang elektromagnetik, serta ukuran seberapa banyak gelombang elektromagnetik yang dipantulkan dari gelombang yang datang. RCS dapat diminimalkan dengan berbagai metode yaitu memanfaatkan struktur penyerap radar atau *radar absorbing structure* (RAS), pencacah aktif, dan pencacah pasif.

RAS dianggap menjadi pilihan utama untuk meminimalisir RCS. Tujuan utama dari RAS ini adalah untuk mengorientasikan permukaan struktur dan menciptakan sudut-sudut tertentu agar gelombang yang datang dapat dipantulkan ke arah yang jauh dari sudut deteksi radar. RAS dapat diterapkan pada kendaraan saat tahap desain. Namun, metode ini sulit atau mahal untuk diterapkan pada kendaraan yang sudah diproduksi atau dibangun sebelumnya. Hal ini karena desain atau konfigurasi kendaraan tersebut biasanya telah dioptimalkan untuk tujuan tertentu dan mengubah desain setelah proses produksi dapat mengganggu kemampuan kendaraan dalam memenuhi misi utamanya (Zaker & Sadeghzadeh, 2020).

Pencacahan aktif didasarkan pada menghasilkan sinyal koheren untuk mencacah gelombang radar yang datang dan mengurangi pantulan gelombang pada target. Tujuan utamanya adalah agar target menghasilkan radiasi dengan amplitudo dan fase yang dapat membatalkan gelombang yang dipantulkan. Oleh karena itu, sistem harus mampu menentukan sudut datang, intensitas, frekuensi, dan bentuk gelombang yang datang. Selain itu, sistem juga harus mengetahui karakteristik pantulannya untuk setiap panjang gelombang (Semenikhin & Chernokolpakov, 2017). Teknik ini memerlukan penerapan rangkaian antena, sistem pemrosesan sinyal, basis

data, serta sistem pengendalian dan pembangkitan sinyal. Tingkat kesulitan penerapan teknik ini meningkat pada frekuensi yang lebih tinggi karena pola hamburan menjadi lebih kompleks. Oleh karena itu, pencacah aktif lebih disarankan untuk digunakan pada frekuensi rendah (Shaeffer et al., 2004).

Prinsip dasar pencacah pasif adalah menambahkan sumber gema tambahan yang amplitudo dan fasenya bisa diatur sedemikian rupa sehingga dapat membatalkan gema utama (J. Khan et al., 2012). Menambahkan beban pada teknik pencacah pasif dilakukan dengan memasang material atau komponen tertentu yang memiliki impedansi (hambatan listrik) pada bagian-bagian tertentu dari target. Beban ini dirancang untuk menyerap atau mengalihkan energi gelombang radar, sehingga pantulan (gema) yang dihasilkan oleh target dapat dikurangi. Cara umum yang dilakukan untuk menambahkan beban impedansi pada pencacah pasif yaitu dengan menambahkan RAM (Schindler et al., 1965).

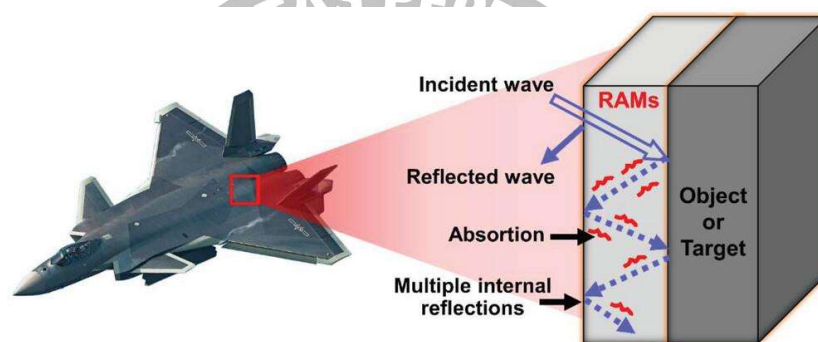
#### **2.1.2.1 Radar Absorbing Material (RAM)**

*Radar absorbing material* (RAM) atau biasa dikenal dengan material penyerap radar berfungsi untuk mengurangi radiasi elektromagnetik yang dipantulkan dengan menyerap sebagian besar energi dari gelombang elektromagnetik yang datang. Proses ini menurunkan intensitas sinyal setelah diterima, sehingga mengurangi pantulannya. RAM dirancang untuk bekerja pada spektrum frekuensi radar yang luas dengan memanfaatkan pantulan internal di dalam material, yang mengganggu dan melemahkan sinyal pantulan dari permukaan luar. Mekanisme ini sangat efektif terutama pada frekuensi tertentu (Kim et al., 2023). RAM menggunakan dua mekanisme utama untuk mengurangi atau menghilangkan gelombang pantul seperti berikut:

- 1) **Penyerapan:** Material menyerap dan mengurangi intensitas gelombang elektromagnetik dengan mengubahnya menjadi bentuk energi lain, khususnya dalam bentuk panas. Pengurangan ini terjadi karena adanya *dielectric loss* dan *magnetic loss* dimana hal tersebut

berkaitan dengan nilai permitivitas dan permeabilitas pada material (Balakrishnan et al., 2016; Meng et al., 2018).

- 2) Refleksi ganda: Mekanisme ini memungkinkan gelombang insiden yang memasuki RAM dipantulkan dari bagian belakang material, lalu dipantulkan kembali dari permukaan depan. Proses ini menciptakan refleksi internal berganda di dalam material, sehingga meningkatkan *reflection loss* (Rohini & Bose, 2017).



**Gambar 2.3 Mekanisme Kerja RAM**

Sumber: (Kim et al., 2023)

Gelombang radar dapat diserap oleh material karena interaksi antara gelombang dan material tersebut seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.3, yang menyebabkan sebagian energi gelombang berubah menjadi panas hal ini disebut dengan *reflection loss* (RL). Saat gelombang radar mengenai material, spin magnetik dalam gelombang berinteraksi dengan spin magnetik pada elektron material. Selain itu, gelombang elektromagnetik bisa mempengaruhi momen dipol listrik material, dan gelombang mikro dapat menyebabkan rotasi dipol listrik tersebut, interaksi ini menyebabkan terjadinya panas (Ari Adi et al., 2018). Berdasarkan jenis interaksi tersebut, material penyerap gelombang elektromagnetik dibagi menjadi dua, yaitu material dielektrik dan material magnetik.

Kemampuan suatu material dalam menyerap gelombang elektromagnetik dapat ditentukan melalui nilai *reflection loss* (RL). Secara teoritis, koefisien refleksi gelombang mikro (RL) dalam satuan dB dihitung

berdasarkan permitivitas relatif ( $\epsilon_r$ ), permeabilitas relatif ( $\mu_r$ ), frekuensi, serta ketebalan material penyerap yang digunakan.

Parameter nilai yang digunakan untuk pengukuran sifat dielektrik material pada proses konversi Nicholson-Ros-Weir (Belaabed et al., 2012), yaitu sebagai berikut :

$$S_{11}^* = S_{11}' - S_{11}'' \quad (2.2)$$

$$S_{21}^* = S_{21}' - S_{21}'' \quad (2.3)$$

Di mana  $S_{11}^*$  adalah parameter reflektansi dan  $S_{21}^*$  merupakan parameter transmitansi, dengan  $S_{11}'$  dan  $S_{21}'$  sebagai bilangan riil, serta  $S_{11}''$  dan  $S_{21}''$  sebagai bilangan imajiner. Dari parameter tersebut, bisa kita dapatkan koefisien refleksi ( $\Gamma$ ) sebagai berikut:

$$\Gamma = \frac{S_{11}^2 - S_{21}^2 + 1}{2S_{11}} \pm \sqrt{\frac{S_{11}^2 - S_{21}^2 + 1}{2S_{11}} - 1} \quad (2.4)$$

Setelah mendapatkan nilai ( $\Gamma$ ), dapat dicari nilai koefisien transmisi ( $T$ ), dengan persamaan:

$$T = \frac{S_{11} + S_{21} - \Gamma}{1 - (S_{11} + S_{21})\Gamma} \quad (2.5)$$

Dengan menggunakan rumus:

$$\frac{1}{\Lambda^2} = -\left(\frac{1}{2\pi L} \ln \left[\frac{1}{T}\right]^2\right) \quad (2.6)$$

Di mana,

$\Lambda$  = propagasi kompleks ( $m^{-1}$ )

$L$  = tebal material (m)

Permitivitas relatif ( $\epsilon_r$ ) dan permeabilitas relatif ( $\mu_r$ ) dapat dihitung dengan:

$$\mu_r = \frac{1 + \Gamma_1}{\Lambda(1 - \Gamma) \sqrt{\frac{1}{\lambda_0^2 - \lambda_c^2}}} \quad (2.7)$$

$$\epsilon_r = \mu_r \frac{(1 - \Gamma)^2}{(1 + \Gamma)^2} \left(1 - \frac{\lambda_0^2}{\lambda_c^2}\right) + \frac{\lambda_0^2}{\lambda_c^2} \frac{1}{\mu_r} \quad (2.8)$$

Di mana,

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = \frac{\mu \text{ (H/m)}}{1.26 \times 10^{-6} \text{ (H/m)}}, \text{ sehingga } \mu_r \text{ tidak memiliki dimensi}$$

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{\varepsilon \text{ (F/m)}}{8.854 \times 10^{-12} \text{ (F/m)}}, \text{ sehingga } \varepsilon_r \text{ tidak memiliki dimensi}$$

$\lambda_0$  = panjang gelombang elektromagnetik di udara (m)

$\lambda_c$  = merupakan panjang gelombang *cutoff* (m)

Selanjutnya nilai impedansi didapatkan dengan menggunakan rumus:

$$Z = Z_0 \sqrt{\left(\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}\right) \tan h \left(i \left(\frac{2\pi L}{c}\right) \sqrt{\mu_r \cdot \varepsilon_r}\right)} \quad (2.9)$$

Kemudian menghitung nilai *reflection loss* (RL) menggunakan rumus:

$$RL(dB) = 20 \log \left| \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} \right| \quad (2.10)$$

Di mana,

$Z$  = impedansi input ( $\Omega$ )

$Z_0 = 376,74 \Omega$  impedansi udara ruang bebas ( $\Omega$ )

$c$  = kecepatan cahaya (m/s)

Penyerapan sempurna  $Z_0 = Z$  dapat dijelaskan dengan nilai relatifitas dan permeabilitas relatif harus dekat satu sama lain. Kondisi ideal tanpa gelombang reflektif di permukaan adalah  $\mu_r = \varepsilon_r$  yang menunjukkan penyerapan penuh gelombang mikro.

Kemudian kekuatan serapan (*through power*) dari material dapat ditentukan dengan rumus:

$$|\tau| = 10^{-\text{reflection loss}/20} \quad (2.11)$$

$$\text{Through power (\%)} = (1 - \tau^2) \times 100\% \quad (2.12)$$

### 2.1.3 Material Magnetik

Salah satu metode yang digunakan untuk meningkatkan penyerapan gelombang adalah dengan menambahkan logam atau semikonduktor ke dalam material. Namun, material dengan konduktivitas

listrik tinggi dapat menyebabkan ketidaksesuaian impedansi pada antarmuka, yang meningkatkan daya pantul dan mengurangi penyerapan. Di sisi lain, mengurangi kandungan logam untuk menurunkan konduktivitas dapat menurunkan respons penyerapan karena berkurangnya pengisi konduktif. Salah satu upaya yang dilakukan untuk mengoptimalkan penyerapan gelombang dengan menambahkan material magnetik (Adebayo et al., 2020).

Material magnetik adalah material yang dapat mempengaruhi atau dipengaruhi oleh medan magnet melalui interaksi langsung atau perumaterial parameter fisik lainnya seperti dimensi, bentuk, suhu, dan sifat listrik. Salah satu sifat utama material magnetik adalah kerentanan magnetik, yang mengukur sejauh mana material tersebut dapat termagnetisasi ketika berada dalam medan magnet eksternal (dan nilainya hampir tidak pernah nol untuk material alami) (Lomova & Sukhorukov, 2022). Material magnetik diklasifikasikan menurut perilaku magnetiknya, material diklasifikasikan menjadi (Clemons et al., 2019; Gore & Jadhav, 2020):

1) Diamagnetik

Material diamagnetik tidak memiliki momen magnetik intrinsik saat tidak ada medan magnet eksternal. Namun, ketika medan magnet diterapkan, gerakan spin elektron dalam material menghasilkan magnetisasi ( $M$ ) dengan arah yang berlawanan terhadap medan yang diterapkan. Material dengan sifat diamagnetik tergolong langka dan memiliki kerentanan magnetik bernilai kecil serta negatif. Kerentanan ini bersifat independen terhadap perumaterial suhu, sehingga tidak dipengaruhi oleh variasi temperatur lingkungan.

2) Super-paramagnetik

Super-paramagnetik adalah konsekuensi unik dari material nano magnetik. Super-paramagnetik hanya dapat diamati jika ukuran dan jumlah domain, dalam material magnetik cukup kecil, umumnya terjadi

pada partikel berdiameter antara 10 nm dan 150 nm, tergantung pada materialnya.

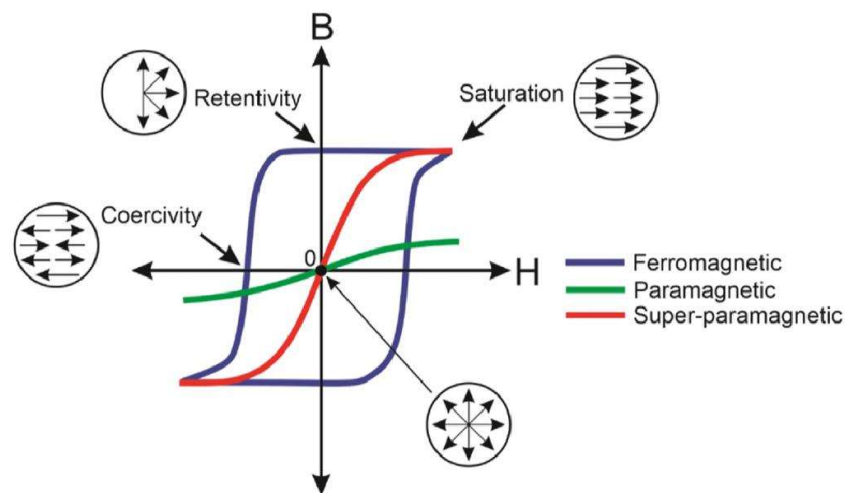
3) Paramagnetik

Momen magnetik atom pada material paramagnetik secara acak terorientasi akibat adanya gangguan termal. Namun, ketika medan magnet diterapkan, sebagian kecil momen magnetik tersebut akan sejajar dengan arah medan, menghasilkan magnetisasi yang lemah searah dengan medan tersebut. Kerentanan magnetik pada material paramagnetik bernilai kecil dan positif.

4) Ferromagnetik

Material ferromagnetik memiliki momen magnetik atom yang tersusun sejajar. Teori ferromagnetisme oleh Weiss menjelaskan bahwa sifat magnetik ini bergantung pada domain magnetik, yaitu area di mana momen-momen magnetik terarah sama. Magnetisasi material bergantung pada susunan domain dan pengaruh medan magnet eksternal. Saat suhu meningkat, keteraturan momen magnetik menurun akibat gangguan termal. Pada temperatur Curie ( $T_c$ ), material kehilangan sifat ferromagnetiknya dan berubah menjadi paramagnetik.

Konduktivitas magnetik sangat penting dalam RAM. Material magnetik memiliki beberapa mekanisme kehilangan energi, yaitu *hysteresis loss*, resonansi magnetik, dan *eddy current loss*. *Hysteresis loss* terjadi ketika medan magnet dihilangkan, dan domain magnetik (area di mana momen magnetik searah) kembali ke orientasi acak. Saat medan magnet diterapkan, domain-domain ini mulai sejajar dengan arah medan hingga mencapai titik saturasi. Proses penyesuaian ini mengurangi kekuatan medan magnet dan, pada saat yang sama, melemahkan radiasi elektromagnetik.



**Gambar 2.4 Loop Histerisis Material Magnetik**

Sumber: (Ruiz-Perez et al., 2022)

Berdasarkan Gambar 2.4. material super-paramagnetik adalah pilihan terbaik untuk RAM karena memiliki saturasi magnetik tinggi dan medan koersif hampir nol. Artinya, domain magnetik dapat kembali ke orientasi acak semula dengan mudah setelah medan magnet dihilangkan. Hal ini berbeda dengan material ferromagnetik yang membutuhkan medan koersif besar untuk kembali ke kondisi awal, dan paramagnetik yang tidak memiliki respons magnetik signifikan. Partikel besi oksida menarik minat untuk RAM karena memiliki nilai titik saturasi yang tinggi, biaya produksi rendah, tidak beracun, dan perilaku super-paramagnetik (Ruiz-Perez et al., 2022).

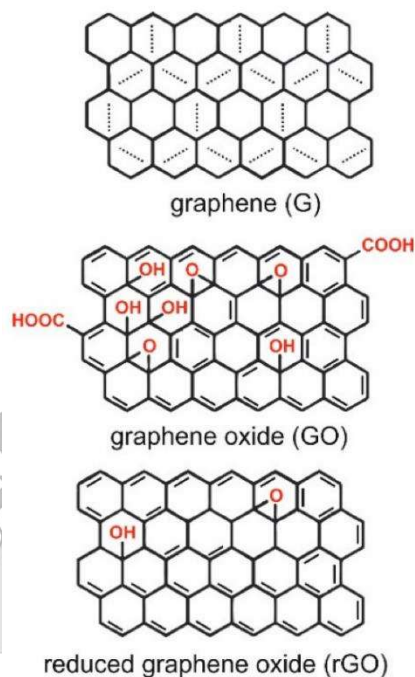
Besi oksida adalah campuran logam dengan beberapa jenis susunan kristal, yang mempengaruhi struktur dan sifat magnetiknya. Contoh paling umum dari besi oksida adalah magnetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), hematit ( $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ), dan maghemit ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ). Kristal dari ketiga oksida ini terbentuk terutama dari ion oksigen yang tersusun rapat, dengan ion besi mengisi ruang kosong di antara mereka, baik di tempat oktahedral maupun tetrahedral (T. K. Mohapatra et al., 2023).

Magnetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) adalah oksida besi magnetik yang terkenal dengan sifat listrik dan magnetiknya sehingga cocok digunakan sebagai RAM. Sifat-sifat ini disebabkan oleh keberadaan dua tingkat oksidasi, yaitu  $\text{Fe}^{2+}$  dan  $\text{Fe}^{3+}$ , serta transfer elektron cepat di antara kedua tingkat oksidasi tersebut yang menempati situs oktahedral (Preserve & Blaney, n.d.; Yew et al., 2020). Partikel nano ini menunjukkan sifat super-paramagnetik dan superkonduktif. Ukuran partikel nano  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  yang disintesis tercatat sekitar 30-50 nm. Selain itu, magnetit juga sangat dikenal sebagai mineral magnetik terkuat di bumi.  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  memiliki sifat feromagnetik pada suhu ruang dan suhu Curie 850 K (Teja & Koh, 2009).

#### 2.1.4 Material Berbasis Karbon

Material karbon seperti *graphite*, *carbon black* (CB), *carbon nanofibers* (CNF), *carbon nanotubes* (CNT), dan *graphene* menjadi material potensial sebagai RAM karena konduktivitas listriknya yang tinggi (Chung, 2001; H. Liu et al., 2021). Keuntungan dari material karbon yaitu ketersediaan yang melimpah di alam, biaya rendah, kepadatan rendah, dan stabilitas tinggi, sehingga cocok untuk diproduksi secara massal. Selain itu, karena sifat fisiknya dan morfologinya yang unik, material karbon dapat dicampur dengan material lainnya untuk peningkatan kinerja RAM (Abbasi et al., 2019).

Meskipun menunjukkan keunggulan ini, bahan karbon memiliki tantangan dalam proses produksi. Sebagai contoh, mendispersikan bahan karbon (misalnya CNT dan CNF) ke dalam media cair untuk pemrosesan larutan sulit dilakukan karena permukaannya yang lembam. Dengan demikian, modifikasi kimiawi, perlakuan sonikasi yang kuat, dan pengenalan aditif biasanya diperlukan, yang dapat meningkatkan biaya produksi dan memengaruhi sifat konduktif bahan karbon untuk aplikasi RAM (J. Liu et al., 2023). Material karbon yang cocok digunakan sebagai RAM yaitu *graphene* dan material turunannya (*graphene oksida* dan *graphene oksida tereduksi*).



**Gambar 2.5 Struktur Grafit, Graphene, Graphene Oksida, dan Graphene Oksida Tereduksi**

Sumber: (Tadyszak et al., 2018)

Graphene adalah salah satu material karbon 2D yang sangat menarik untuk RAM karena sifat fisik dan kimia yang luar biasa (Du et al., 2008). Dengan konduktivitas yang sangat tinggi (secara teoretis mencapai  $10^6$  S/cm), graphene mampu memantulkan dan mengurangi gelombang elektromagnetik secara efektif melalui konduksi dan atenuasi (Lee et al., 2008). Berdasarkan eksperimen, lapisan tunggal graphene memiliki nilai modulus Young maksimum sebesar ( $\sim 1$  Terapaskal) dan nilai konduktivitas termal graphene mencapai 5000 W/mK (Balandin et al., 2008).

Graphene oksida atau biasa disebut *reduced graphene oxide* (GO) adalah bentuk graphene yang teroksidasi, dengan gugus oksigen di ujung domain grafitiknya (M. Zhang et al., 2015). Struktur kimia ini membuat GO mudah larut dalam air dan menyediakan banyak situs ikatan oksigen untuk ikatan silang, memungkinkan pembentukan interaksi kuat antar lembaran GO maupun dengan material lainnya. Dengan demikian, GO dapat

digunakan sebagai struktur makroskopik untuk aplikasi RAM (Wan et al., 2018). Dalam GO nilai konduktivitas berkurang karena adanya oksigen dalam kisi-kisinya.

GO dapat direduksi menjadi graphene oksida tereduksi atau *reduced graphene oxide* (rGO) melalui penerapan metode kimia, termal, atau elektrokimia (Tkachev et al., 2012). Graphene oksida tereduksi menunjukkan peningkatan konduktivitas listrik relatif terhadap graphene oksida (GO) karena restorasi parsial jaringan karbon  $sp^2$  selama proses reduksi (Lesiak et al., 2021). Proses reduksi menghasilkan peningkatan proporsi cacat pada rGO. Kehadiran cacat ini dapat menyebabkan *interfacial polarization*, *multiple scattering*, dan peningkatan pencocokan impedansi di bagian yang cacat. Hal ini berkontribusi pada *dielectric loss* secara keseluruhan dan meningkatkan penyerapan gelombang mikro (Mombeshora & Muchuweni, 2023).

#### **2.1.5 Doping Nikel atau Kobalt pada Komposit Nano**

Komposit nano adalah material padat yang terdiri dari beberapa fase, di mana setiap fasenya memiliki ukuran dalam skala nanometer, berkisar antara 1 nm hingga 100 nm. Interaksi optimal antara fase-fase tersebut dicapai melalui proses berbasis skala nano. Penerapan material nano seperti partikel nano dan serat nano ke dalam struktur komposit menghasilkan material komposit nano. Ketika ukuran suatu komponen material berada di bawah ukuran kritis, sifat-sifat material tersebut dapat berubah secara signifikan (Shahbaz et al., 2024). Komposit nano yang dibuat dari material non-logam, logam, dan polimer melalui metode tertentu memiliki sifat khusus seperti mempertahankan sifat dasar untuk menutupi kekurangan dan menghadirkan karakteristik baru (Nan et al., 2023).

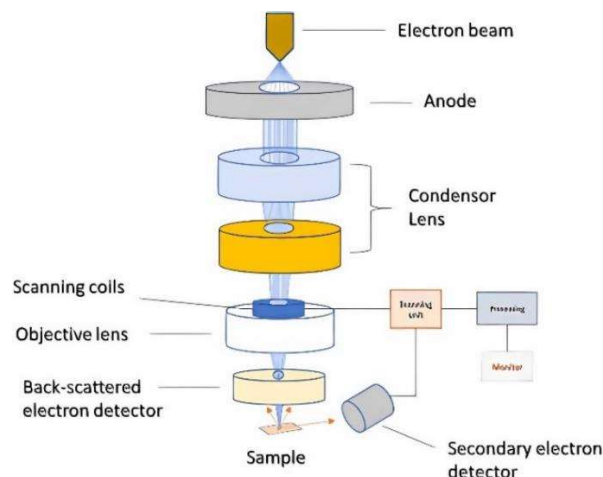
Doping logam ke dalam komposit nano melibatkan penggabungan ion atau atom logam ke dalam struktur komposit nano untuk meningkatkan sifat magnetik dan dielektrik sehingga meningkatkan potensi untuk aplikasi RAM. Proses ini dapat secara signifikan mengubah karakteristik fisik, kimia,

dan elektronik komposit nano, sehingga cocok untuk berbagai aplikasi (Hu et al., 2024). Logam transisi seperti nikel dan kobalt menjadi pilihan yang cukup menjanjikan sebagai material doping untuk meningkatkan *reflection loss* dan *through power* pada material penyerap radar.

Doping nikel kobalt adalah metode yang ampuh untuk meningkatkan sifat penyerapan gelombang mikro dari komposit nano (S. Wang et al., 2020). Doping nikel atau kobalt menyebabkan distorsi kisi, yang mengarah ke penghancuran urutan feromagnetik dan dengan demikian meningkatkan sifat magnetik pada komposit nano sehingga dapat meningkatkan *magnetic loss* (Erdem, 2024), *dielectric loss* juga meningkat karena penambahan nikel meningkatkan polarisasi di dalam material yang membuat penyerapan gelombang mikro yang lebih baik (Bao et al., 2021; Kaur et al., 2022). Doping nikel atau kobalt juga mengubah ukuran kristalit, regangan, dan volume sel satuan suatu bahan, yang dapat memengaruhi karakteristik optik dan elektriknya (Ahad et al., 2023).

## 2.1.6 Karakterisasi Komposit Nano

### 2.1.6.1 *Field Emission Scanning Electron Microscopy with Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (FE-SEM EDX)*

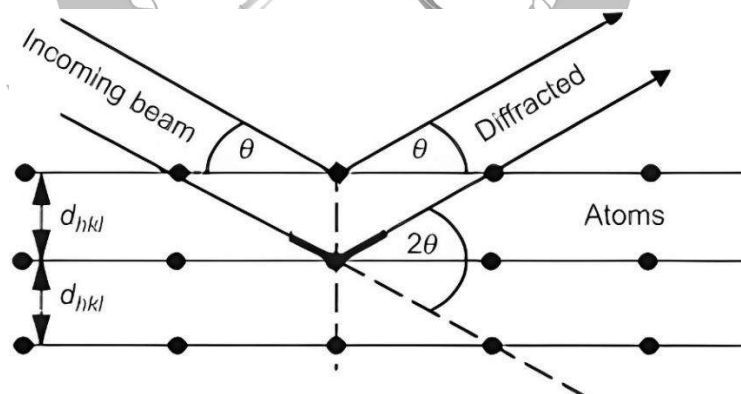


**Gambar 2.6 Skema Interaksi Elektron dengan Material pada Teknik FE-SEM**

Sumber: (Kumar et al., 2023)

*Field Emission Scanning Electron Microscopy* (FE-SEM) adalah teknologi canggih yang digunakan untuk menangkap gambar mikrostruktur material. FE-SEM dilakukan dalam kondisi vakum tinggi karena keberadaan molekul gas dapat mengganggu aliran berkas elektron serta mengurangi akurasi deteksi elektron sekunder dan elektron hamburan balik yang digunakan untuk menghasilkan gambar (Ahmad et al., 2021). Selain FE-SEM, analisis lanjutan dilakukan menggunakan *Energy-Dispersive X-Ray* (EDX). EDX adalah teknik berbasis sinar-X yang bertujuan mengidentifikasi komposisi unsur dalam material. Sistem EDX terintegrasi dengan mikroskop elektron, di mana kemampuan pencitraan mikroskop membantu menemukan dan menganalisis bagian spesimen yang diinginkan (Jaya, 2020).

#### 2.1.6.2 X-Ray Diffraction (XRD)



**Gambar 2.7 Skema Interaksi Sinar-X dengan Kristal Atom pada Teknik XRD**

Sumber: (Ghasempour-Mouziraji et al., 2024)

*X-ray diffraction* (XRD) adalah adalah teknik analisis serbaguna yang digunakan untuk mempelajari sifat fisik seperti komposisi fase, struktur kristal, dan orientasi pada sampel berbentuk serbuk, padatan, maupun cairan. Metode ini bekerja berdasarkan Hukum Bragg:

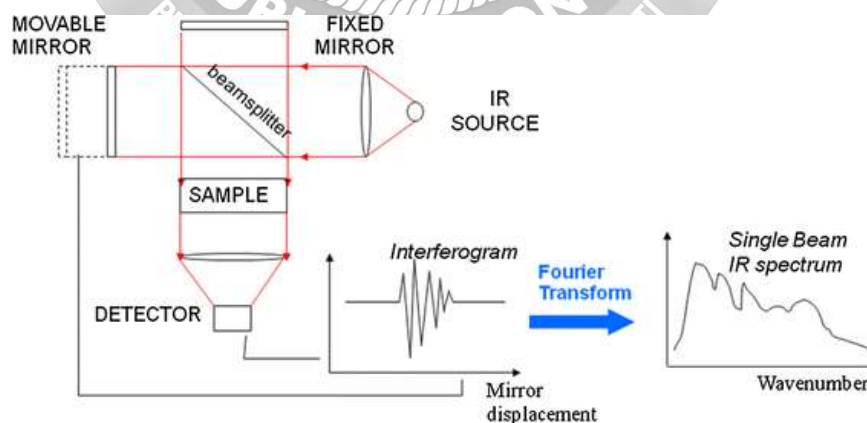
$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (2.13)$$

dengan  $n$  adalah orde,  $\lambda$  panjang gelombang (m),  $d$  jarak antar kisi kristal (m), dan  $\theta$  sudut pantul (rad).

Rumus ini menjelaskan bahwa difraksi maksimum terjadi saat selisih lintasan antara gelombang sinar-X yang dipantulkan dari bidang kristal bernilai kelipatan panjang gelombangnya. Kondisi ini menyebabkan gelombang-gelombang tersebut saling menguat (interferensi konstruktif), sehingga pola difraksi dapat digunakan untuk menentukan jarak antar bidang kristal dan struktur kristalnya.

Dalam teknik ini, sinar-X monokromatik diarahkan ke sampel, dan sinar-X yang dipantulkan dideteksi untuk menghasilkan pola difraksi. Pengukuran dilakukan dengan difraktometer sinar-X, menggunakan sinar  $\text{Cu K}\alpha$  ( $\lambda = 0,15406 \text{ nm}$ ). Dalam difraktometer sinar-X, setiap fase kristalin menghasilkan pola difraksi yang berbeda. Identifikasi fase dilakukan dengan membandingkan pola difraksi sinar-X dari sampel yang tidak diketahui dengan pola yang ada dalam basis data referensi (Patel & Parsania, 2018).

#### 2.1.6.3 *Fourier-Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR)



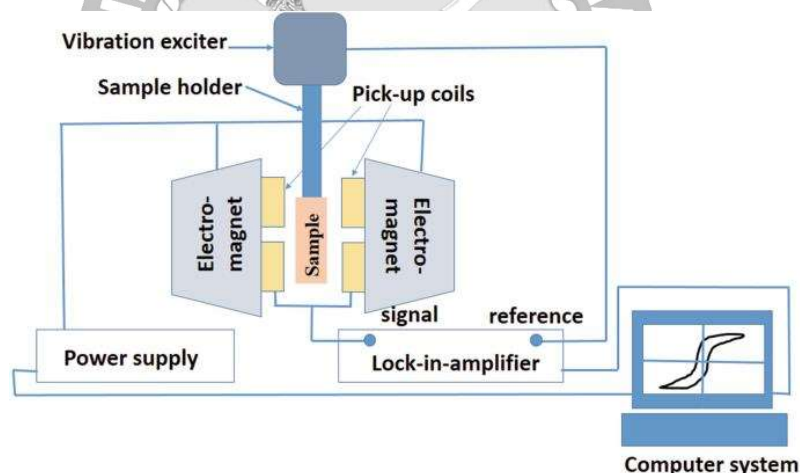
**Gambar 2.8 Skema Interaksi Sinar IR dengan Material pada Spektroskopi FTIR**

Sumber: (Mezzetti & Leibl, 2017)

*Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) adalah metode analisis dan identifikasi yang menggabungkan teknologi komputer dengan spektroskopi inframerah. Pada teknik ini, sampel ditempatkan di jalur optik interferometer, dan kurva intensitas interferogram akan berubah sesuai

dengan penyerapan energi pada frekuensi tertentu. Spektrum inframerah diperoleh melalui transformasi Fourier-proses matematis yang mengubah frekuensi dalam interferogram menjadi intensitas cahaya yang sesuai. Dengan mempelajari karakteristik spektrum yang dihasilkan, FTIR memungkinkan deteksi gugus fungsi dalam senyawa yang tidak diketahui, penentuan struktur kimia, pemantauan proses reaksi kimia, dan analisis kemurnian suatu zat. Metode ini sangat efektif untuk memverifikasi komposisi material dan mengidentifikasi perubahan kimia secara cepat dan akurat (Q. Zhang et al., 2021).

#### 2.1.6.4 *Vibrating Sample Magnetometer (VSM)*



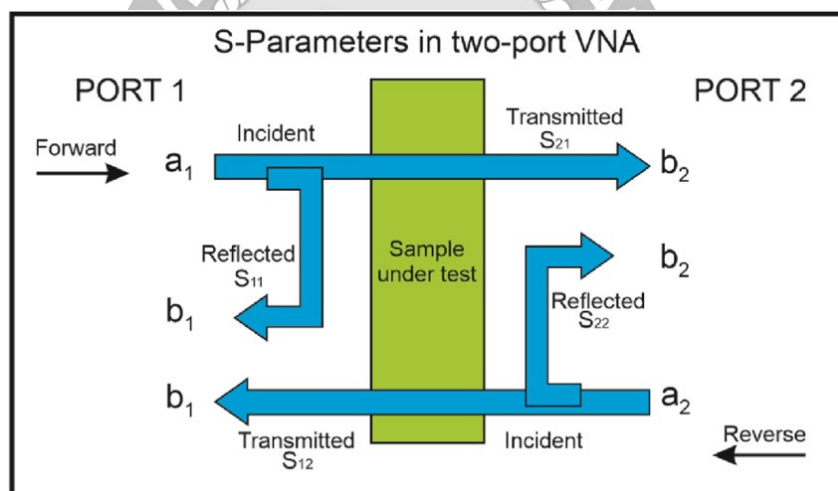
**Gambar 2.9 Skema Interaksi Magnetik Terhadap Material pada Uji VSM**

Sumber: (Shukla, 2022)

*Vibrating Sample Magnetometer (VSM)* adalah alat sensitif dan serbaguna untuk mempelajari momen magnetik dalam berbagai material magnetik berdasarkan pengaruh medan magnet. VSM digunakan untuk mengukur perilaku magnetik suatu material. Dalam pengujian, sampel ditempatkan di dalam medan magnet konstan. Jika material tersebut bersifat magnetik, medan magnet ini akan memagnetisasi sampel dengan menyelaraskan domain magnetik atau spin magnetik individu di dalam material. Semakin kuat medan magnet yang diterapkan, semakin besar magnetisasi yang dihasilkan (Kirupakar et al., 2016).

### 2.1.6.5 Vector Network Analyzer (VNA)

*Vector Network Analyzer* (VNA) digunakan untuk mengukur respons frekuensi suatu komponen atau jaringan, baik pasif maupun aktif. VNA bekerja dengan mengukur daya sinyal berkecepatan tinggi yang masuk dan keluar dari komponen, karena daya dapat diukur lebih akurat pada frekuensi tinggi dibandingkan tegangan atau arus. Setiap pengukuran menangkap amplitudo dan fase sinyal pada tiap titik frekuensi. Pengujian dilakukan dengan mengirim gelombang kontinu pada tiap frekuensi, dan amplitudonya dapat disesuaikan (H. Zhang et al., 2015).



**Gambar 2.10 S-parameter pada VNA Dua Port**

Sumber: (Kim et al., 2023)

**Tabel 2.2 Detail S-Parameter**

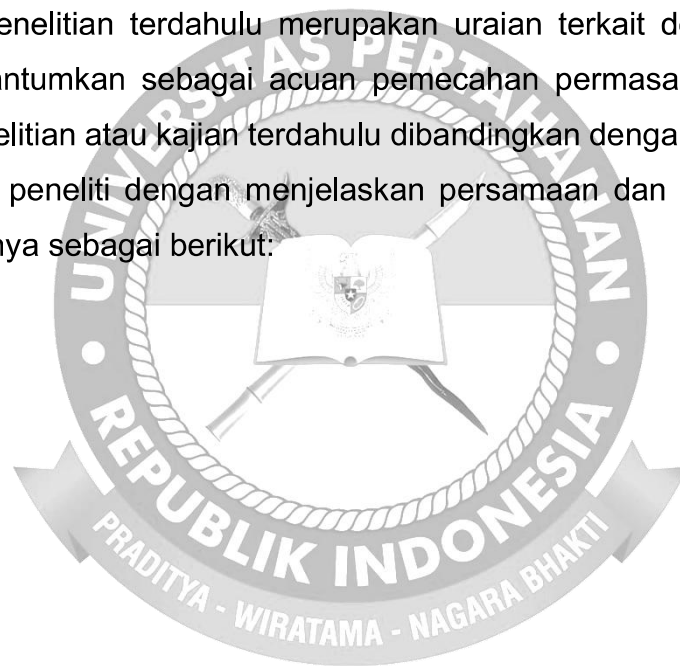
| S-Parameter | Rumus     | Deskripsi                    |
|-------------|-----------|------------------------------|
| $S_{11}$    | $b_1/a_1$ | Koefisien refleksi           |
| $S_{12}$    | $b_2/a_2$ | Koefisien transmisi terbalik |
| $S_{21}$    | $b_2/a_1$ | Koefisien transmisi maju     |
| $S_{22}$    | $b_1/a_2$ | Koefisien refleksi terbalik  |

Sumber: (Kim et al., 2023)

S-Parameter (*Scattering Parameter*) digunakan dalam VNA untuk menggambarkan perilaku sinyal saat melewati suatu komponen atau jaringan. Parameter ini membantu mengukur berapa banyak sinyal yang dipantulkan dan diteruskan di setiap port. Detail mengenai S-Parameter ditunjukkan pada Tabel 2.2 (Wilde et al., 2008).

## **2.2 Penelitian Terdahulu**

Penelitian terdahulu merupakan uraian terkait dengan penelitian yang dicantumkan sebagai acuan pemecahan permasalahan penelitian. Hasil penelitian atau kajian terdahulu dibandingkan dengan penelitian yang dilakukan peneliti dengan menjelaskan persamaan dan perbedaan serta relevansinya sebagai berikut:



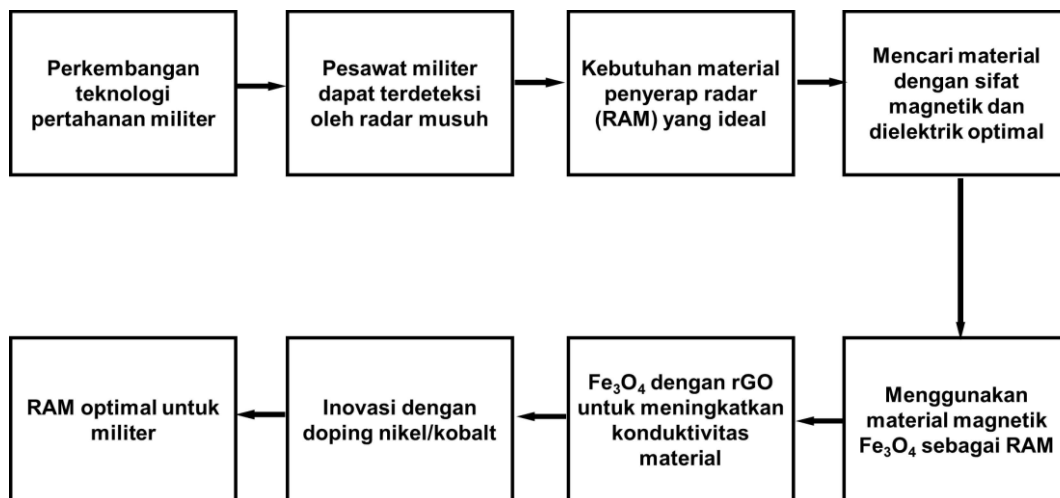
Tabel 2.3 Penelitian Terdahulu

| Judul                                                                                                                            | Metode                                                                                                                    | Hasil                                                                                                                                                                                                  | Persamaan dengan Penelitian ini                                                                                                                   | Perbedaan dengan Penelitian ini                                                                                                                                                                         | Sumber                |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| <i>Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/MWCNT/TiO<sub>2</sub> nanocomposites as excellent microwave absorber material</i>                 | Sintesis komposit nano Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /MWCNT/TiO <sub>2</sub> menggunakan metode kopresipitasi.           | <ul style="list-style-type: none"> <li>RL -44,3 dB pada frekuensi 9,7 GHz dengan ketebalan 20 mm</li> <li>Penambahan rasio TiO<sub>2</sub> membuat saturasi magnetik pada material menurun.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Metode kopresipitasi</li> <li>Material Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> dan material berbasis karbon</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Menggunakan material karbon MWCNT</li> <li>Menggunakan variasi dari TiO<sub>2</sub> dan variasi ketebalan</li> <li>Tidak ada doping dari nikel/kobalt</li> </ul> | (Qoidah et al., 2024) |
| <i>Lightweight Chain-Typed Magnetic Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@rGO Composites with Enhanced Microwave-Absorption Properties</i> | Sintesis komposit Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /rGO menggunakan metode hydrothermal.                                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>RL -49,4 dB pada frekuensi 16,2 GHz dengan ketebalan 1,75 mm</li> <li>Penambahan rGO mengubah nilai konstanta dielektrik yang memengaruhi nilai RL</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Material Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> dan rGO</li> </ul>                                                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>Menggunakan metode hydrothermal</li> <li>Tidak ada doping dari nikel/kobalt</li> <li>Menggunakan variasi dari rasio rGO</li> </ul>                               | (Qian et al., 2022)   |
| <i>Preparation of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> particles with unique structures from nickel slag for enhancing microwave</i>      | Sintesis komposit Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> dengan limbah nikel menggunakan proses oksidasi cair, penggilingan bola, | <ul style="list-style-type: none"> <li>RL -29,0 dB pada frekuensi 7,28 GHz dengan ketebalan 3,5 mm</li> </ul>                                                                                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>Material Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> dan nikel</li> </ul>                                                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Menggunakan proses oksidasi cair, penggilingan</li> </ul>                                                                                                        | (B. Li et al., 2021)  |

| <i>absorption properties</i>                                                                                                             | pemisahan magnetik, dan pemanasan.                                                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>Perubahan suhu memengaruhi struktur dan morfologi kristal <math>\text{Fe}_3\text{O}_4</math></li> </ul>                                                                                                  |                                                                                                                            | bola, pemisahan magnetik <ul style="list-style-type: none"> <li>Tidak ada material berbasis karbon dan kobalt</li> </ul>                 |                         |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
| <i>A Novel Method to Synthesize Co/<math>\text{Fe}_3\text{O}_4</math> Nanocomposites with Optimal Magnetic and Microwave Performance</i> | Sintesis komposit nano Co/ $\text{Fe}_3\text{O}_4$ menggunakan metode solvothermal.       | <ul style="list-style-type: none"> <li>RL -25,73 dB pada frekuensi 4,485 GHz dengan ketebalan 2,2 mm</li> <li>Ukuran partikel memengaruhi nilai permitivitas dan permeabilitas pada material</li> </ul>                                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>Material <math>\text{Fe}_3\text{O}_4</math> dan kobalt</li> </ul>                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Menggunakan metode solvothermal</li> <li>Tidak ada material berbasis karbon dan nikel</li> </ul>  | (C. Zhang et al., 2022) |
| <i>Facile One-Pot Solvothermal Synthesis of the RGO/MWCNT/<math>\text{Fe}_3\text{O}_4</math> Hybrids for Microwave Absorption</i>        | Sintesis komposit nano rGO/MWCNT/ $\text{Fe}_3\text{O}_4$ menggunakan metode solvothermal | <ul style="list-style-type: none"> <li>RL -61,29 dB pada frekuensi 10,48 GHz dengan ketebalan 2,6 mm</li> <li>MWCNT bertindak sebagai jembatan penghubung rGO dan <math>\text{Fe}_3\text{O}_4</math> dan membantu transfer elektron.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Material <math>\text{Fe}_3\text{O}_4</math> dan material berbasis karbon</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Menggunakan tambahan material karbon MWCNT</li> <li>Tidak ada doping dari nikel/kobalt</li> </ul> | (Y. Zhou et al., 2020)  |

Sumber: diolah oleh peneliti

### 2.3 Kerangka Berpikir



**Gambar 2.11 Kerangka Berpikir Penelitian**

Sumber: diolah oleh peneliti

### 2.4 Hipotesis

- Penambahan variasi doping Ni/Co pada Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/rGO memengaruhi struktur, morfologi, dan sifat magnetik dari material penyerap radar.
- Penambahan variasi doping Ni/Co pada Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/rGO memengaruhi terhadap *reflection loss* dan *through power* dari material penyerap radar.