

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

Dibawah ini, disajikan teori-teori yang mendukung latar belakang diatas :

2.1.1 Radar Militer

Istilah radar pertama kali dipatenkan oleh Christian Hulsmeyre pada tahun 1904. Sistem radar dikembangkan selama Perang Dunia II berdasarkan prinsip ekolokasi yang digunakan oleh kelelawar untuk bergerak atau menemukan mangsanya (Rahman, 2019; Ruiz-Perez et al., 2022). Radar sendiri merupakan perangkat elektronik yang memancarkan gelombang elektromagnetik (EM) dan dapat mendeteksi arah, kecepatan, dan jarak objek (Setua et al., 2020).

Gelombang EM merambat melalui getaran periodik simultan dari intensitas medan listrik dan medan magnet, yang mencakup gelombang radio, inframerah, cahaya tampak, ultraviolet, sinar-X, dan sinar gamma (Rouhi et al., 2022). Karakteristik umum gelombang EM meliputi massa nol, kecepatan yang sama dengan kecepatan cahaya, serta energi signifikan dengan rentang frekuensi dari 1 hingga 10^{25} Hz (Nithya et al., 2019).

Menurut teori gelombang, radiasi EM terdiri dari medan listrik dan magnet yang merambat melalui medium udara sebagai fenomena gelombang. Medan-medan ini merambat tegak lurus satu sama lain saat gelombang bergerak maju.

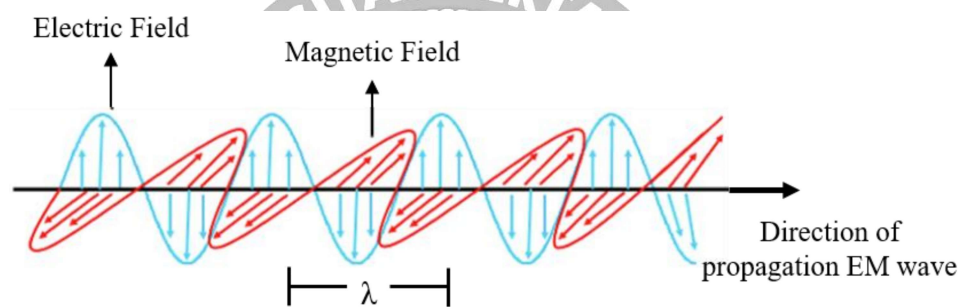
$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2.1)$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (2.2)$$

Dimana ∇ merupakan operator diferensial yang menyatakan gradien atau turunan parsial, E dan H merepresentasikan medan listrik dan medan

magnet, B dan D sebagai rapat fluks magnet dan medan pergeseran listrik serta t adalah waktu.

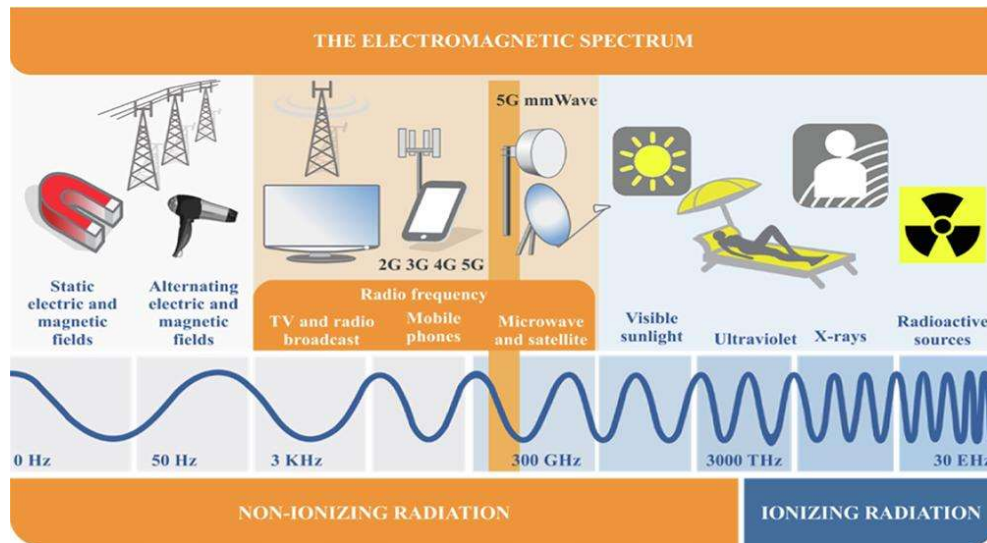
Berdasarkan persamaan Maxwell (persamaan 2.1 dan 2.2), perambatan medan listrik menghasilkan medan magnet, dan perubahan medan magnet menciptakan medan listrik variabel (Gambar 2.1). Perubahan ukuran dan posisi muatan listrik menyebabkan gelombang EM merambat (Rouhi et al., 2022).



Gambar 2.1 Skema Hubungan Medan Magnet dan Medan Listrik

Sumber : (Rouhi et al., 2022)

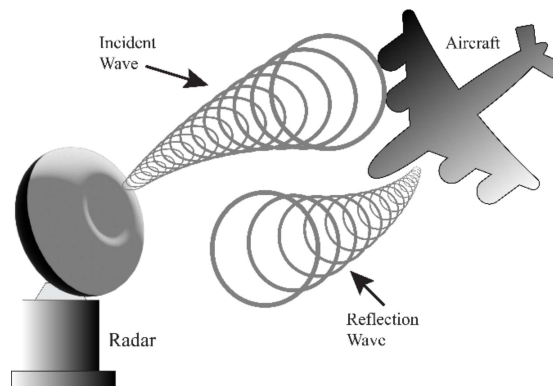
Ketika radiasi EM berinteraksi dengan bahan dielektrik, berbagai fenomena seperti ionisasi, rotasi, getaran, dan transisi elektron dapat terjadi, tergantung pada energi gelombang EM. Interaksi antara materi dan gelombang EM terkait langsung dengan frekuensi gelombang tersebut. Berdasarkan hubungan ini, radiasi diklasifikasikan menjadi dua jenis, yaitu radiasi ionisasi dan non-ionisasi (Kumar et al., 2021).



Gambar 2.2 Rentang Spektrum Gelombang EM

Sumber : (Rouhi et al., 2022)

Pada radar, gelombang mikro digunakan untuk mendeteksi objek, mengukur jarak, dan memantau pergerakan objek karena kemampuannya merambat melalui atmosfer dan panjang gelombangnya yang sesuai untuk refleksi dari objek pada berbagai jarak. Gelombang mikro merupakan bentuk energi EM yang diubah menjadi panas melalui interaksi antara komponen medan listrik, gelombang, dan partikel bermuatan dalam material (Yuen & Hameed, 2009). Radiasi gelombang mikro merujuk pada radiasi elektromagnetik dengan frekuensi antara 300 MHz - 300 GHz ($\lambda = 1 \text{ mm} - 100 \text{ cm}$), yang terletak di antara gelombang inframerah dan gelombang radio dalam spektrum elektromagnetik (TANG et al., 2008). Selain itu, frekuensi gelombang mikro yang dipantulkan memungkinkan penentuan kecepatan objek dengan mengukur efek Doppler pada sinyal radar (Skolnik, 2002).



Gambar 2.3 Skema Perjalanan Pantulan Gelombang Radar

Sumber : (Shenzhen Grande Electronic Co.,Ltd.)

Desain dasar radar meliputi sirkuit pemancar untuk menghasilkan sinyal radio, penerima untuk menerima dan memperkuat sinyal yang dipantulkan, antena untuk memancarkan dan menerima sinyal di area sekitar, serta indikator sebagai antarmuka antara radar dan pengamat (Rahman, 2019). Sistem radar ini telah digunakan dalam berbagai aplikasi militer, seperti pertahanan udara untuk mendeteksi dan mengawasi pesawat terbang dan rudal. Pada tahun 1976, *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) menetapkan dalam IEEE STD 521 beberapa huruf untuk menunjukkan pita frekuensi operasi radar (Bruder, 2013). Data pada Tabel 2.1 menunjukkan beberapa sistem radar yang diklasifikasikan berdasarkan panjang gelombang untuk menggambarkan sifat radar yang dipengaruhi oleh frekuensi operasinya.

Tabel 2.1 Pita Frekuensi Radar (Bruder, 2013)

Pita Radar	Jangkauan Frekuensi (GHz)	Panjang Gelombang (cm)	Kegunaan
L	1 – 2	30 – 15	Kontrol lalu lintas udara jarak jauh; resolusi sedang, efek cuaca kecil.
S	2 – 4	15 – 7,5	Kontrol lalu lintas terminal udara , pengamatan cuaca jarak jauh, efek cuaca sedang dalam curah hujan lebat.
C	4 – 8	7,5 – 3,75	Pelacakan jarak jauh, pengamatan cuaca, lokasi senjata; peningkatan efek cuaca dalam hujan ringan/sedang.
X	8 – 12	3,75 – 2,4	Pelacakan jarak pendek, pemandu rudal, pemetaan radar laut, pencegatan udara, pengawasan medan perang, lokasi senjata.
K _u	12 – 18	2,4 – 1,7	Pemetaan resolusi tinggi, altimetri satelit, jarak pendek karena penyerapan uap air.
K	18 – 26,5	1,7 – 1,1	Radar polisi; penggunaan yang sangat terbatas karena penyerapan uap air yang tinggi.
K _a	26,5 – 40	1,1 – 0,75	Pemetaan resolusi sangat tinggi jarak pendek, pengawasan bandara; jarak pendek karena penyerapan uap air.
V	40 – 75	0,75 – 0,4	Penginderaan jarak jauh ilmiah; penyerapan uap air yang tinggi.
W	75 – 110	0,4 – 0,2	Kontrol jelajah mobil (77 GHz), pencari rudal, pencitraan resolusi sangat tinggi (94 GHz).
Millimeter	110 – 300	0,2 – 0,1	Eksperimental; terbatas pada jarak pendek karena penyerapan uap air yang tinggi.

Radar militer menggunakan *X-band* sebagai frekuensi radar. *Early Warning Radar* (EWR) adalah salah satu radar militer yang digunakan di Indonesia. EWR dapat mendeteksi dan melacak pesawat terbang, baik yang terbang rendah maupun tinggi, dan telah diterima secara universal di kalangan pertahanan (Clarke, 1935). EWR berperan utama dalam mendeteksi pesawat terbang rendah yang berada di bawah jangkauan radar permukaan, diikuti dengan tindakan seperti mengarahkan pesawat penyerang. Selain itu, sistem EWR memiliki peran sekunder, seperti *intercept* sinyal, penghubung komunikasi, deteksi kapal di laut, menentukan arah pemancar untuk triangulasi dengan elemen pertahanan lainnya, serta memberikan pengawasan menengah dan tinggi di wilayah tanpa jangkauan radar permukaan (Clarke & King, 1982).

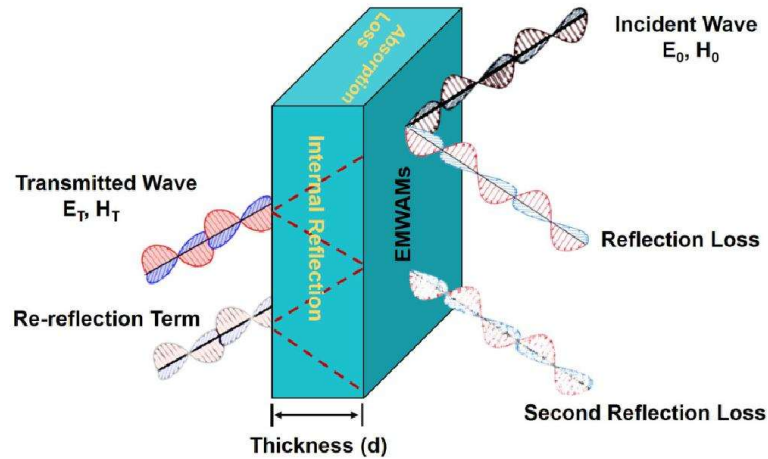
Pada EWR, jangkauan merupakan variabel desain yang terkait dengan jenis platform yang digunakan. Aplikasi umum EWR adalah menyediakan pengawasan untuk pesawat penyerang yang melindungi target. Ketika ancaman terdeteksi, pesawat penyerang segera dikerahkan untuk mengeliminasi ancaman tersebut sebelum mencapai jangkauan peluncuran senjata udara-ke-darat atau udara-ke-udara terhadap AEW (Clarke, 1935).

Pada teknologi siluman, penampang radar (RCS) merupakan aspek penting untuk menghindari deteksi radar. RCS menyatakan kekuatan sinyal radar yang dipantulkan kembali oleh objek dari gelombang elektromagnetik yang datang, serta mengukur jumlah gelombang elektromagnetik yang dipantulkan (Gohardani et al., 2014). Untuk meminimalkan deteksi sinyal radar dan meningkatkan kelangsungan hidup pesawat siluman, terdapat beberapa teknik untuk meminimalkan RCS, diantaranya adalah *target shaping*, *active cancellation*, *passive cancellation*, dan *Radar Absorbing Materials* (RAMs). (Jenn, 2005; Ruiz-Perez et al., 2022).

2.1.2 *Radar Absorbing Materials (RAMs)*

Berdasarkan interaksinya dengan gelombang mikro, material dapat terklasifikasi menjadi tiga kelompok utama, yaitu, isolator, konduktor dan absorber (Yuen & Hameed, 2009). Absorber adalah material dengan kehilangan pantulan tinggi, yang dapat menyerap radiasi gelombang mikro, mentransfer energi langsung, dan memanaskan secara efektif pada suhu kamar (Basak et al., 2008). Sementara itu, sifat material penyerap radiasi gelombang mikro disebut dielektrik, yang umumnya memiliki sedikit pembawa muatan bebas dan menunjukkan gerakan polarisasi dipol.

RAMs merupakan salah satu teknik untuk meminimalkan RCS pada pesawat siluman (Jenn, 2005; Ruiz-Perez et al., 2022). RAMs mampu menyerap dan meredam gelombang EM yang datang, lalu mengubahnya menjadi panas atau bentuk energi lain (X. Wang et al., 2024). Hal ini terjadi karena adanya *dielectric loss* dan *magnetic loss* dimana hal tersebut berkaitan dengan nilai permitivitas dan permeabilitas pada material (Meng et al., 2018). Sehingga dapat mengurangi intensitas gelombang EM yang dipantulkan. Penggunaan RAMs yang dikombinasikan dengan desain mesin tersembunyi dan struktur planar dapat membuat pesawat siluman sulit terdeteksi. Dengan pemilihan RAM yang tepat dan desain bentuk yang optimal, *radar cross-section* (RCS) pesawat tempur dapat dikurangi hingga seukuran burung yang terbang (Setua et al., 2020). Refleksi internal ganda juga terjadi ketika gelombang yang masuk ke RAMs dipantulkan oleh permukaan belakang material dan kemudian dipantulkan kembali ke permukaan depan (Rohini & Bose, 2017). Seperti pada Gambar 2.4 yang mencakup kehilangan akibat refleksi (RL), transmisi, dan absorpsi.



Gambar 2.4 Mekanisme Hamburan pada Interaksi Gelombang EM dengan RAMs

Sumber : (Sahoo et al., 2023)

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 (ϵ_r), permeabilitas relatif (μ_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 :

$$S_{11}^* = S_{11}' - S_{11}'' \quad (2.3)$$

$$S_{21}^* = S_{21}' - S_{21}'' \quad (2.4)$$

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 (Γ) sebagai berikut (Admi, 2019):

$$\Gamma = \frac{S_{11}^2 - S_{21}^2 + 1}{2S_{11}} \pm \sqrt{\frac{S_{11}^2 - S_{21}^2 + 1}{2S_{11}} - 1} \quad (2.5)$$

Setelah mendapatkan nilai (Γ), dapat dicari nilai koefisien transmisi

(T), dengan persamaan:

$$T = \frac{S_{11} + S_{21} - r}{1 - (S_{11} + S_{21})\Gamma} \quad (2.6)$$

Dengan menggunakan rumus:

$$\frac{1}{\Lambda^2} = - \left(\frac{1}{2\pi L} \ln \left[\frac{1}{T} \right]^2 \right) \quad (2.7)$$

Di mana L merupakan tebal material. Kemudian permitivitas relatif (ϵ_r) dan permeabilitas relatif (μ_r) dapat dihitung dengan:

$$\mu_r = \frac{1 + \Gamma_1}{\Lambda(1 - \Gamma) \sqrt{\frac{1}{\lambda_0^2} - \lambda_c^2}}} \quad (2.8)$$

$$\epsilon_r = \mu_r \frac{(1 - \Gamma)^2}{(1 + \Gamma)^2} \left(1 - \frac{\lambda_0^2}{\lambda_c^2} \right) + \frac{\lambda_0^2}{\lambda_c^2} \frac{1}{\mu_r} \quad (2.9)$$

, λ_0 adalah panjang gelombang elektromagnetik di udara dan λ_c merupakan panjang gelombang *cutoff*. Selanjutnya nilai impedansi didapatkan dengan menggunakan rumus:

$$Z = Z_0 \sqrt{\left(\frac{\mu_r}{\epsilon_r} \right)} \tan h \left(i \left(\frac{2\pi L}{c} \right) \sqrt{\mu_r \cdot \epsilon_r} \right) \quad (2.10)$$

Sehingga *reflection loss* (RL) dituliskan sebagai:

$$RL(dB) = 20 \log \left| \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} \right| \quad (2.11)$$

Di mana, Z = impedansi input, $Z_0 = 376,73031346177$, dan Ω impedansi udara ruang bebas. 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 $\mu_r = \epsilon_r$ yang menunjukkan penyerapan penuh gelombang mikro.

Persen koefisien penyerapan (*through power*) pada material dapat dinyatakan pada (Marki microwave, 2016) :

$$|\Gamma| = 10^{(RL/20)} \quad (2.12)$$

$$\% \text{ Through Power} = (1 - \Gamma^2) \times 100\% \quad (2.13)$$

2.1.3 Karbon Aktif Turunan Biomassa

Carbon Nanotubes (CNT) dan *graphene* menjadi material aktif berbasis karbon yang sedang hangat dikembangkan. Namun, proses pembuatannya membutuhkan energi tinggi, menggunakan prekursor dari bahan bakar fosil, tidak ramah lingkungan, dan berisiko bagi kesehatan (Deng et al., 2016). Sebagai alternatif, material karbon aktif dari biomassa menawarkan keunggulan lainnya seperti ketersediaan melimpah di alam, struktur berpori, luas permukaan tinggi, konduktivitas listrik baik, kekuatan mekanik tinggi, stabilitas yang baik, dan biaya produksi rendah (Al Rai & Yanilmaz, 2021; Destyorini et al., 2022; Dubey et al., 2020). Salah satu faktor RAMs yang baik adalah luas permukaan materialnya yang tinggi.

Untuk memaksimalkan potensi limbah biomassa, diperlukan perlakuan khusus, yang secara spesifik bertujuan untuk merusak struktur dan meningkatkan luas permukaannya (Jiang et al., 2018; S. Li et al., 2017). Hal ini dapat meningkatkan efek polarisasi pada material, sehingga performa material saat terkena gelombang radar menjadi lebih baik. Perlakuan tersebut adalah *two-step KOH activation*, yang mencakup proses fisik dan kimiawi (Mistar et al., 2020). Aktivasi fisik (karbonisasi) dilakukan melalui proses *pyrolysis*. Proses ini melibatkan pembakaran dengan aliran gas nitrogen selama beberapa jam, bertujuan untuk menghilangkan pengotor, meningkatkan luas permukaan spesifik, dan memperbesar ukuran pori (Mistar et al., 2020; J. Wang et al., 2017). Selanjutnya, aktivasi kimiawi dilakukan dengan mencampurkan karbon dengan agen aktivasi dalam pelarut air. Agen aktivasi tersebut diantaranya adalah KOH, H₃PO₄, ZnCl₂, NaOH, KHCO₃ dan H₂SO₄ (Ganjoo et al., 2023). Proses ini memicu reaksi kimia pada material karbon. Setelah aktivasi kimiawi, karbon akan melalui proses *pyrolysis* kembali pada keadaan seperti sebelumnya. Reaksi kimia yang terjadi pada karbon saat diaktivasi dengan KOH dan dikarbonisasi kembali dapat dinyatakan pada persamaan berikut (Yulianti et al., 2023):



Ion K^+ dan gas berperan penting sebagai aktivator yang meresap ke dalam karbon. Terjadi reaksi redoks yang mengikis struktur dan menciptakan pori pada karbon (J. Wang & Kaskel, 2012). Selama *pyrolysis*, ion K^+ mengalami reduksi oleh karbon dan menyublim menjadi logam K. Kemudian uap air yang terbentuk memicu proses gasifikasi, sehingga meningkatkan porositas karbon (Mistar et al., 2020). Senyawa K hasil reaksi redoks berinterkalasi ke dalam struktur karbon, menyebabkan ekspansi yang signifikan pada kerangka karbon, sehingga volume pori menjadi lebih besar (J. Wang et al., 2017).

Proses tersebut menghasilkan karbon aktif berbasis biomassa. Karbon aktif sendiri merujuk pada karbon berpori yang diperoleh melalui perlakuan arang dengan gas pengoksidasi atau karbonisasi bahan karbon yang telah diresapi dengan bahan kimia penghilang air (Rodriguez-Reinoso & Silvestre-Albero, 2016). Karbon aktif berbasis biomassa memiliki banyak pori berukuran mikro, luas permukaan yang besar, dan daya adsorpsi tinggi, sehingga cocok digunakan sebagai RAM (Yohandri et al., 2017).

2.1.4 Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS)

Kelapa sawit merupakan tumbuhan industri yang minyak dan buahnya dapat dimanfaatkan sebagai minyak masak, minyak industri, maupun bahan bakar (Novia Yanti & Hutasuhut, 2020). Tanaman ini tergolong tumbuhan berpembuluh, berbiji, berbunga, berkeping satu (monokotil), dan termasuk dalam suku pinang-pinangan.



Gambar 2.5 Limbah TKKS

Sumber : (sanjayatrade.com/Tandan-Kosong-Kelapa-Sawit)

Pada 2018, Kementerian Koordinator Bidang Perekonomian Republik Indonesia melaporkan dalam siaran pers HM.4.6/82/SET.M.EKON.3/04/2021 bahwa produksi minyak sawit dan inti sawit mencapai 48,67 juta ton. Proses pengolahan kelapa sawit menghasilkan produk utama berupa minyak sawit, biji kernel, serta limbah TKKS. Limbah TKKS menyumbang sekitar 23% dari total berat kelapa sawit dan mengandung serat yang lebih kuat dan keras dibandingkan serat dari sisa proses buah sawit. Namun, serat dari limbah buah sawit juga tetap dapat dimanfaatkan.

Limbah TKKS mengandung serat yang kuat dan keras, dengan mikrofibril yang terdiri dari selulosa, hemiselulosa, dan lignin sebagai komponen utama. Komposisi TKKS meliputi selulosa sebesar 24–65 wt%, hemiselulosa 21–34 wt%, dan lignin 14–31 wt% (Chang, 2014). Kandungan lignin-selulosa yang tinggi dan luas permukaan yang besar membuat biomassa TKKS sangat cocok untuk diaplikasikan sebagai RAM. Oleh sebab itu limbah TKKS sangat berpotensi sebagai sumber karbon.

2.1.5 Keramik Oksida

Keramik oksida merupakan komponen penting dalam elektroda untuk menyerap gelombang energi, yang sifatnya ditentukan oleh celah pita (H. Zhang & Long, 2021). Secara luas, bahan keramik oksida digunakan pada barang elektronik dengan celah pita yang lebar. Keramik oksida

berbasis partikel nano mengandung logam dan metaloid, serta memiliki ukuran yang telah direduksi secara signifikan (Malakar & Snow, 2020).

Penyetelan celah pita pada semikonduktor partikel nano melalui berbagai metode doping menjadikan bahan ini sangat penting di era modern, terutama dalam sektor energi, fotovoltaik, pembangkit fotoelektron, fotokatalisis, dan produksi hidrogen (Khan et al., 2019). Partikel nano keramik oksida memiliki morfologi beragam, mulai dari nol hingga tiga dimensi (Suresh, 2013). Beberapa partikel nano keramik oksida yang mudah ditemui adalah *titanium dioxide* dan *zinc oxide*.

a. *Titanium Dioxide* (TiO_2)

TiO_2 atau disebut juga titanium putih, banyak ditemukan pada produk seperti makanan, obat-obatan, dan pasta gigi, plastik, kertas, dan tinta, serta sebagai bahan tambahan pada cat akrilik dan cat lainnya. TiO_2 berfungsi untuk menambah warna putih, meningkatkan sifat reflektif, dan membantu menstabilkan cat secara kimiawi (Petrović, 2017). Dengan indeks bias yang tinggi (2,7), TiO_2 memiliki kemampuan pewarnaan dan daya pengaburan yang sangat baik (Miguel Martín-Martínez, 2002).

TiO_2 memiliki struktur kristal dan amorf secara bersamaan. TiO_2 memiliki sifat khas, diantaranya densitas 3,3 - 4,25 g/cm³; ukuran partikel sebesar 8 – 300 nm; luas permukaan spesifik sebesar 7 – 160 m²/g; bentuk struktur kristal *rutile*, *anatase*, dan *brookite*. Selain itu, titanium dioksida memiliki energi celah pita antara 3 – 3,2 eV dan konstanta dielektrik relatif sebesar 170 (Uthirakumar, 2011). TiO_2 juga mampu mengontrol polaritas, mudah terdispersi, dan tahan terhadap cuaca (Miguel Martín-Martínez, 2002). Maka dari itu, TiO_2 menjadi substansi material komposit nano yang cocok untuk RAMs.

b. *Zinc Oxide (ZnO)*

ZnO merupakan material yang terdiri dari atom seng dan oksigen dengan wujud bubuk padatan putih sebagai bentuk alaminya (Ali et al., 2023). ZnO menjadi material keramik oksida yang banyak digunakan dalam berbagai aplikasi, seperti elektronik, optoelektronik, keramik, dan kosmetik (Musa et al., 2023). Memiliki transparansi yang tinggi dalam spektrum cahaya tampak, konduktivitas listrik, dan fotokonduktivitas yang sangat baik, dengan beragam aplikasi dan biayanya yang relatif rendah menjadi keunggulan dari ZnO (Jalal et al., 2010; Zyoude et al., 2022).

Seperti TiO₂, juga berfungsi sebagai pigmen putih karena memiliki indeks bias yang tinggi (2,0). ZnO memiliki densitas sebesar 5,6 g/cm³, luas permukaan spesifik 10–45 m²/g, ukuran partikel sebesar 0,036–3 µm; bentuk struktur kristal *rocksalt*, *zinc blende*, dan *wurtzite*. Nilai energi celah pita ZnO berkisar antara 3,2–3,3 eV, dengan konstanta dielektrik relatif 8,5 (Uthirakumar, 2011). Dengan rasio luas permukaan terhadap volume yang tinggi, ZnO memiliki reaktivitas yang lebih tinggi dengan zat lain, sehingga berpotensi digunakan dalam aplikasi seperti sensor dan absorben.

2.1.6 Komposit Nano

Komposit nano didefinisikan sebagai sistem material padat multi fase yang terbentuk dari kombinasi dua atau lebih komponen, termasuk polimer sebagai matriks (fase kontinu) dan material struktur nano (fase diskontinu) dengan setidaknya satu dimensi berukuran nano (<100 nm) (Omanović-Miklićanin et al., 2020). Definisi material komposit nano telah berkembang secara signifikan untuk mencakup beragam sistem, seperti material satu dimensi, dua dimensi, tiga dimensi (3D), dan amorf, yang terdiri dari komponen-komponen berbeda dan dicampur pada skala

nanometer (Singh & Agarwal, 2015). Pada tahun 1998, jurnal *Chemistry in Britain* menerbitkan artikel berjudul "Nano Sandwiches", dimana gagasan komposit nano diterapkan untuk menghasilkan material yang lebih efisien untuk tujuan fungsional (Oriakhi, 1998).

Komposit nano dapat dibuat dengan berbagai sifat fisik, termal, dan karakteristik unik yang ditingkatkan. Material ini memiliki keunggulan dibandingkan komposit skala mikro konvensional. Komposit nano dapat disintesis menggunakan teknik sederhana dan murah. Dengan rasio luas permukaan terhadap volume yang tinggi, komposit nano memungkinkan penggunaan ukuran pengisi yang kecil dan jarak antar pengisi yang rapat (Omanović-Miklićanin et al., 2020). Sehingga dapat memenuhi beragam aplikasi hemat energi dengan bobot ringan, kekuatan mekanis tinggi dengan tingkat daktilitas tinggi tanpa kehilangan kekuatan serta ketahanan terhadap goresan, sifat listrik khusus, serta keandalan tinggi dalam lingkungan ekstrem (Singh & Agarwal, 2015).

2.1.7 Metode High Energi Ball Milling (HEBM)

Homogenisasi material karbon dan keramik oksida dilakukan secara mekanik dan dilakukan tanpa cairan. Terdapat dua metode yang umum dilakukan pada sintesis material. Metode *top-down* menjadi pendekatan yang akan dilakukan pada penelitian ini. Secara singkat, metode *top-down* dapat diartikan mengubah ukuran struktur menjadi skala nano (Baig et al., 2021). *Vibration milling* atau disebut juga HEBM merupakan metode sintesis material dengan pendekatan *top-down* (Abid et al., 2022).

HEBM menggunakan homogenisasi mekanik material *bulk* menjadi material serbuk berbasis nano dalam proporsi tertentu. Material akan mengalami deformasi terus-menerus, fraktur, dan re-struktur akibat tumbukan konstan dari bola penggiling di dalam *via*. HEBM memiliki beberapa keuntungan seperti mengurangi energi aktivasi reaksi,

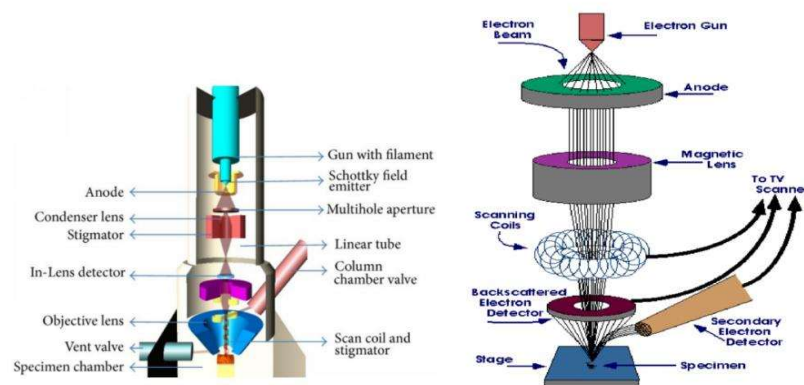
memperhalus ukuran partikel, ramah lingkungan dan meningkatkan risiko keamanan karena dilakukan tanpa cairan (Y. Li et al., 2024).

2.1.8 Karakterisasi Struktur dan Morfologi serta Uji Performa RL Komposit Nano Turunan Karbon Biomassa dan Keramik Oksida

Karakterisasi morfologi struktur dan permukaan, identifikasi kristal, struktur kerusakan karbon, dan identifikasi gugus fungsi, serta uji performa komposit nano turunan biomassa dan keramik oksida dilakukan melalui instrumen sebagai berikut

a. *Field Emmision Scanning Electron Microscopy with Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (FE-SEM EDX)*

Alat yang mampu melakukan teknik perbesaran antara 10 hingga 300.000 , yang dapat memberikan informasi mengenai morfologi dan komposisi permukaan material dengan kedalaman tertentu (Ramesh et al., 2023). FE-SEM menggunakan berkas elektron terfokus untuk menghasilkan gambar atau untuk menganalisis spesimen seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.6



Gambar 2.6 Skema Interaksi Elektron dengan Sampel pada Teknik FE-SEM

Sumber : (Senthil Prabhu et al., 2021)

Selain itu, analisis lebih lanjut dilakukan menggunakan EDX, dimana sistem ini terintegrasi dengan mikroskop elektron, memanfaatkan kemampuan pencitraan mikroskop untuk mengidentifikasi komposisi unsur dalam material yang diteliti (Jaya, 2020).

b. *X-Ray Diffraction*

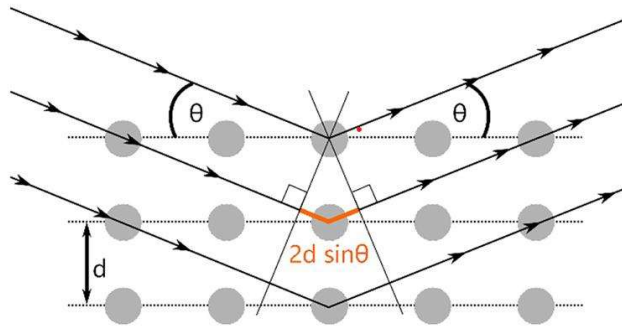
XRD (X-ray Diffraction) adalah metode ilmiah untuk menentukan posisi atau susunan atom secara tepat dalam material kristal atau amorf (Bhattacharya & Acharya, 2020). XRD bekerja berdasarkan Hukum Bragg, yaitu (Patel & Parsania, 2017) :

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (2.15)$$

, dimana

n	= Orde
λ	= Panjang gelombang
d	= Kisi kristal
θ	= Sudut pantul

Pada XRD, berkas sinar-X akan mengenai kristal dan menyebabkan berkas cahaya tersebut terdifraksi ke arah tertentu. Pola yang terbentuk merupakan karakteristik dari material yang sedang diuji. Umumnya, karakterisasi XRD dilakukan menggunakan sinar Cu K α ($\lambda = 0,15406$ nm) pada rentang 2θ dari 10° - 100° (Patel & Parsania, 2018).

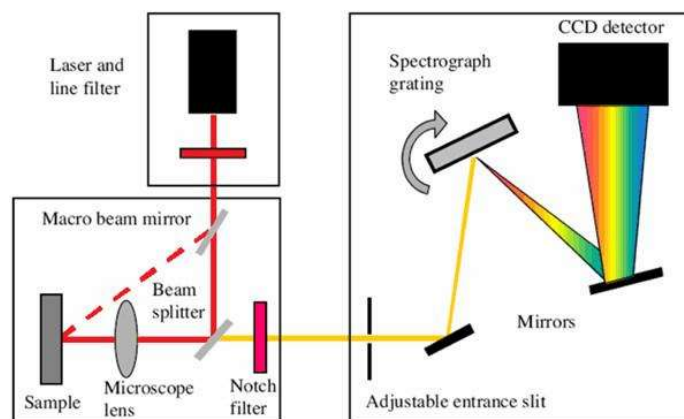


Gambar 2.7 Skema Interaksi Sinar-X dengan Kristal Atom pada Teknik XRD

Sumber : (Harrington & Santiso, 2021)

c. Spektroskopi Raman

Spektroskopi Raman didasarkan pada hamburan tidak elastis cahaya (hamburan *stokes*), di mana radiasi eksitasi yang datang berinteraksi dengan sebagian besar molekul yang menyebabkan perpindahan energi foton yang datang sebesar energi getaran internal pada molekul (Tranter, 2017). Spektroskopi raman memberikan informasi mengenai tingkat energi pantulan sinar laser pada molekul struktur kimia, ikatan, dan interaksi antarmolekul (Kalita et al., 2023).



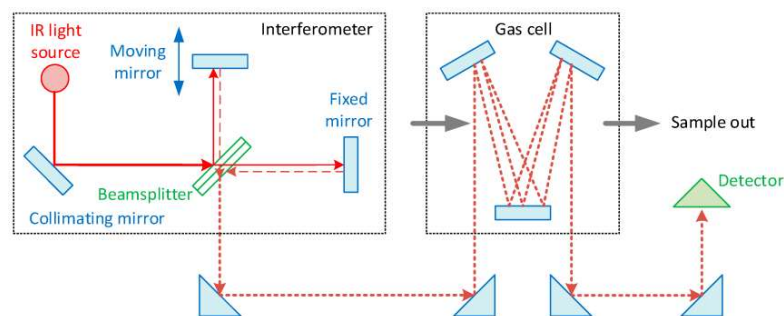
Gambar 2.8 Skema Deteksi dan Interaksi Laser dengan Material pada Spektroskopi Raman

Sumber : (Broadbent et al., 2016)

Gambar 2.9 menunjukkan teknik *dispersive* pada spektroskopi raman. *Dispersive raman spectroscopy* adalah teknik yang paling umum dan dasar, menggunakan radiasi monokromatik intens dengan laser gas gelombang kontinu, seperti ion argon (488,0 dan 514,5 nm), kripton (647,1 nm), atau dioda (780 atau 830 nm), yang dikombinasikan dengan detektor *array charge-coupled device* (CCD) pada spektrograf dengan kisi tunggal (Pandey et al., 2021).

d. Spektroskopi *Fourier-Transform Infrared* (FTIR)

FTIR *spectroscopy* merupakan teknik yang memanfaatkan absorpsi dan transmisi radiasi inframerah oleh sampel untuk mengidentifikasi gugus kimia, menyelesaikan masalah terkait struktur molekul, dan mendeteksi jejak pengotor (Nirmala et al., 2022). FTIR menerapkan konsep matematika lanjutan untuk menghasilkan transformasi Fourier dari pemindaian inframerah pada sampel. Umumnya, sampel diradiasi dengan inframerah di wilayah tengah spektrum elektromagnetik ($400 - 4000 \text{ cm}^{-1}$) dengan panjang gelombang yang lebih panjang dan frekuensi yang lebih rendah dibandingkan dengan cahaya tampak (Herrero et al., 2023).



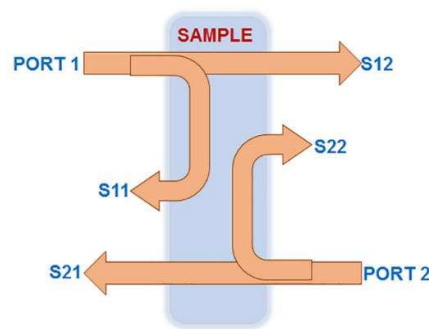
Gambar 2.9 Skema Deteksi dan Interaksi Sinar IR dengan Material pada Spektroskopi FTIR

Sumber : (Giechaskiel & Clairotte, 2021)

Spektrometer FTIR terdiri dari sumber radiasi, interferometer, dan detektor. Cahaya di dalam interferometer dibagi menjadi dua berkas dengan jalur yang berbeda. Satu berkas melewati cermin tetap internal, sementara berkas lainnya melewati cermin yang bergerak. Selanjutnya, interferometer menyatukan kedua berkas tersebut untuk menghasilkan pola interferensi dan mengirimkannya ke detektor. Transformasi Fourier diterapkan pada data untuk menginterpretasikan hasilnya. Spektrum IR berisi plot % transmitansi atau absorbansi radiasi yang melewati molekul terhadap angka gelombang radiasi (Jaleh & Fakhri, 2016).

e. *Vector Network Analyzer (VNA)*

VNA adalah instrumen yang kompleks dan serbaguna yang digunakan dalam bidang teknik frekuensi radio untuk pengukuran yang akurat dan presisi, dengan kemampuan menangkap amplitudo dan fase sinyal frekuensi tinggi pada setiap titik frekuensi (Shoaib, 2017). Prinsip dasar pengukuran ini adalah menyapu frekuensi pada saluran dalam rentang pita frekuensi tertentu untuk mengambil sampel secara sistematis. Pendekatan ini memastikan sinkronisasi penuh antara sinyal yang diterima dan yang dikirim, sehingga memungkinkan pengukuran waktu tunda absolut dan perataan koheren jangka panjang untuk menekan *noise* (gangguan) (Zaidi et al., 2018; H. Zhang et al., 2015).



Gambar 2.10 Skema Parameter Hamburan pada VNA Dua Port

Sumber : (C. Wang et al., 2018)

Dalam jaringan dua-port, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.11, terdapat transmisi maju dan mundur selain refleksi. Gelombang yang datang dan diteruskan tersebut dapat dinyatakan dalam bentuk parameter hamburan kompleks (parameter-S). Parameter-S didefinisikan sebagai rasio antara gelombang yang terpantul dan gelombang yang datang. Diperoleh empat parameter-S, yaitu S_{11} , S_{12} , S_{21} , dan S_{22} pada karakterisasi jaringan dua-port. Parameter S_{11} dan S_{22} masing-masing mewakili koefisien refleksi pada port 1 (*input*) dan 2 (*output*). Sementara itu, parameter S_{12} dan S_{21} masing-masing menggambarkan koefisien transmisi maju dan mundur. Parameter-S dapat dituliskan dalam bentuk matriks sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} V_1^- \\ V_2^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^+ \\ V_2^+ \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

,dimana V_1^- dan V_2^- adalah gelombang yang terpantul, sedangkan V_1^+ dan V_2^+ adalah gelombang yang datang pada port 1 dan 2 (Shoaib, 2017).

2.2 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu menjadi referensi yang relevan bagi penulis untuk memecahkan masalah dalam penelitian. Hasil penelitian terdahulu dijadikan acuan sebagai referensi dan pembanding sebagai berikut:

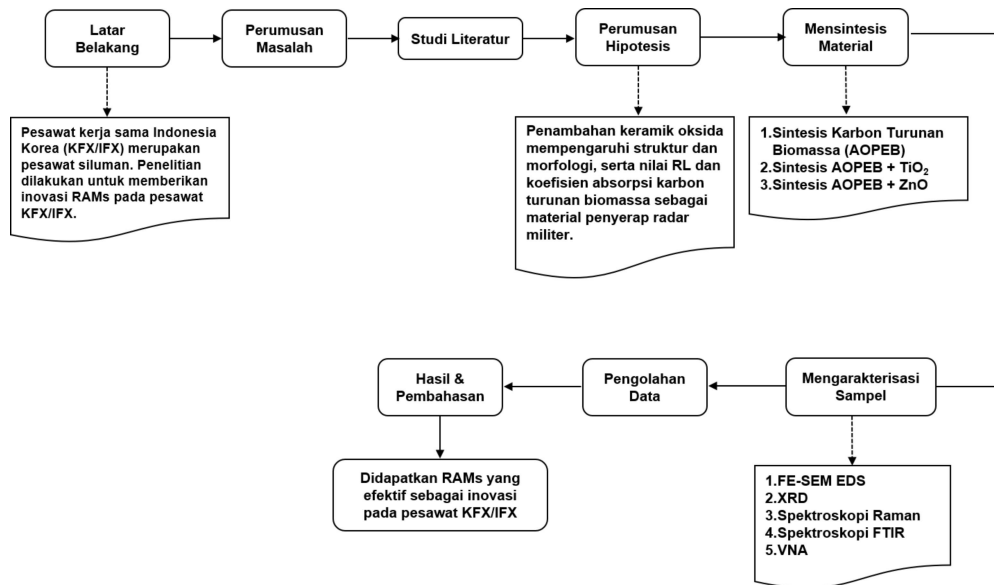


Tabel 2.2 Penelitian Terdahulu

Judul	Metode	Hasil	Persamaan dengan Penelitian	Perbedaan dengan Penelitian	Sumber
<i>Microwave Absorption properties of porous carbon-activated carbon-oil based palm oil empty fruit bunch</i>	Aktivasi fisikal (<i>hydrothermal</i>) dan kimiawi (KOH)	- Hasil teraktivasi memiliki struktur berpori - Luas permukaan tertinggi sebesar 693,06 m²/g - RL sebesar -32,21 dB (frekuensi 10,64 GHz)	- Karbon turunan TKKS - Metode aktivasi - Uji XRD dan VNA	Uji SEM-EDX dan <i>nitrogen adsorption-desorption</i>	(Chitraningrum et al., 2022)
<i>Study of Single Layer Radar Absorber Material (RAM) Based on Coconut Shell Activated Carbon</i>	Aktivasi fisikal (<i>pyrolysis</i>) dan kimiawi (KOH & HCL)	- Struktur berpori pada karbon aktif - RL sebesar -19,5 dB (frekuensi 6 GHz dan ketebalan 6 mm)	- Metode aktivasi - Uji VNA	Uji SEM	(Yohandri et al., 2017)
<i>Biomass-Derivide Activated Carbon/Epoxy Composite as Microwave Absorbing Material</i>	Aktivasi kimiawi (KOH) dan fisikal (<i>pyrolysis</i>)	- Puncak D-band dan G-band pada Spektroskopi Raman - Luas Permukaan material sebesar 683 m²/g	- Metode aktivasi - Uji XRD, Spektroskopi Raman, dan VNA	Uji TEM dan <i>nitrogen adsorption-desorption</i>	(Negi & Kumar, 2022)

		• RL sebesar -39,57 dB (frekuensi 2,14 GHz dan ketebalan 3 mm)			
<i>A Facile Synthesis of Novel Amorphous TiO₂ Nanorods Decorated rGO Hybrid Composites with Wide Band Microwave Absorption</i>	Metode <i>one-pot solvothermal</i> material.	• RL sebesar -42,8 dB (frekuensi 8,72 GHz dan ketebalan 3,25 mm) • rGO meningkatkan kondisi <i>amorph</i> pada material	• Material TiO₂ sebagai substansi komposit • Uji FE-SEM EDX, XRD, Spektroskopi Raman, FTIR, dan VNA	• Metode <i>one-pot solvothermal</i>. • rGO sebagai karbon • Uji <i>nitrogen-adsorption-desorption</i>	(H. Zhang et al., 2020)
<i>Multiwalled carbon nanotubes and zinc oxide using a high energy milling method for radar-absorbent.</i>	Metode <i>high energy milling</i> (HEM).	• RL sebesar -26,4 dB (frekuensi 11,2 GHz dan ketebalan 2 mm) • Terdapat kristal akibat penambahan ZnO	• Material ZnO sebagai substansi komposit • Sintesis dengan HEM • Uji FESEM dan VNA.	• MWCNT sebagai karbon • Uji spektroskopi Raman, FTIR, dan XRD	(Kholil et al., 2022)

2.3 Kerangka Berpikir



Gambar 2.11 Kerangka Berpikir Penelitian

Sumber : diolah oleh peneliti

2.4 Hipotesis

- Penambahan keramik oksida mempengaruhi struktur dan morfologi karbon turunan biomassa sebagai material penyerap radar militer.
- Penambahan keramik oksida mempengaruhi nilai RL dan koefisien absorpsi karbon turunan biomassa sebagai material penyerap radar militer.