

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang Masalah

Sektor pertanian menghadapi tantangan besar dalam pengelolaan sumber daya air, terutama pada praktik irigasi yang belum memperhitungkan kondisi aktual kelembapan tanah. Irigasi yang dilakukan tanpa data kelembapan yang akurat cenderung menyebabkan pemborosan air atau sebaliknya kekurangan air pada tanaman, yang pada akhirnya menurunkan efisiensi penggunaan air dan produktivitas lahan (Aisyah *et al.*, 2025). Pemantauan kelembapan tanah secara berkala menjadi kebutuhan mendasar dalam sistem irigasi presisi karena kelembapan tanah berkaitan langsung dengan keputusan jadwal dan volume penyiraman yang tepat (Agustirandi *et al.*, 2024). Tanpa pemantauan yang akurat, kesalahan penentuan waktu dan jumlah irigasi dapat mengakibatkan pemborosan air dalam jumlah besar.

Sensor kelembapan tanah konvensional yang banyak digunakan terbagi menjadi dua jenis utama, yaitu sensor resistif dan sensor kapasitif. Hasil kalibrasi dan perbandingan kedua jenis sensor tersebut menunjukkan bahwa sensor resistif lebih rentan mengalami korosi pada elektrodanya akibat kontak langsung dengan kelembapan tanah, sementara sensor kapasitif lebih tahan terhadap korosi namun rangkaian antarmukanya menyatu dengan elektroda sehingga rentan mengalami kerusakan apabila terkena air secara langsung (Agustirandi *et al.*, 2024). Nilai koefisien determinasi hasil kalibrasi kedua sensor resistif yang diuji juga tercatat lebih rendah dibandingkan sensor kapasitif, yang mengindikasikan akurasi pembacaan kelembapan tanah yang kurang konsisten pada sensor berbasis kontak elektroda (Agustirandi *et al.*, 2024). Kondisi tersebut menunjukkan perlunya pendekatan pengukuran kelembapan tanah yang tidak bergantung pada kontak elektroda logam langsung dengan medium tanah.

Teknologi sensor berbasis gelombang mikro menjadi salah satu alternatif yang berpotensi mengatasi keterbatasan tersebut. Prinsip kerja sensor *microwave* memanfaatkan perubahan permitivitas relatif suatu material akibat perubahan kelembapan tanah, yang kemudian tercermin pada parameter elektromagnetik seperti pergeseran frekuensi resonansi dan perubahan nilai *return loss* (S11)

(Alduwish *et al.*, 2026). Rancangan sensor diferensial berbasis antena mikrostrip planar dikembangkan untuk menekan kesalahan pengukuran akibat faktor lingkungan yang bersifat common-mode, sehingga sensor tersebut dapat menunjukkan sensitivitas yang tinggi terhadap perubahan kelembapan tanah tanpa memerlukan kontak elektroda logam langsung dengan medium yang diukur (Alduwish *et al.*, 2026). Pendekatan tanpa kontak elektroda tersebut berpotensi mengurangi risiko korosi dan memberikan pengukuran yang lebih konsisten terhadap variasi kondisi tanah dibandingkan sensor resistif maupun kapasitif konvensional.

Sejumlah penelitian terdahulu telah mengeksplorasi pemanfaatan struktur resonator berbasis *metamaterial* pada antena maupun resonator mikrostrip sebagai sensor dielektrik. Penelitian terhadap sensor *microwave* berbasis circular *Split ring resonator* menunjukkan kemampuan struktur tersebut dalam mendeteksi perbedaan konstanta dielektrik material uji melalui pergeseran frekuensi resonansi (Oh *et al.*, 2023). Penelitian lain yang menggabungkan single ring square resonator dengan beberapa double split square ring resonator pada struktur sensor mikrostrip berhasil meningkatkan responsivitas karakterisasi permitivitas material padat dibandingkan struktur resonator tunggal (Masrakin *et al.*, 2023). Pengembangan sensor *microwave* berbasis CSRR dengan konfigurasi triple ring juga terbukti meningkatkan responsivitas pengukuran pada karakterisasi material cair dibandingkan struktur CSRR tunggal sebelumnya (Al-Gburi *et al.*, 2024). Penelitian terbaru yang menggabungkan *Complementary Split ring resonator* pada antena mikrostrip persegi panjang dengan wadah sampel tanah berbahan acrylonitrile-butadiene-styrene menunjukkan peningkatan sensitivitas pengukuran kadar air tanah dibandingkan struktur sensor sejenis yang telah dilaporkan sebelumnya, pada berbagai jenis tanah (Lira *et al.*, 2024). Penelitian terkait lain yang mengembangkan sensor berbasis single *Complementary Split ring resonator* untuk karakterisasi larutan saline turut menunjukkan bahwa variasi orientasi dan jumlah elemen SRR maupun CSRR memengaruhi nilai frekuensi resonansi serta kedalaman *dip* pada parameter *return loss* ( $S_{11}$ ) (Jasim *et al.*, 2025). Struktur CSRR dan SRR pada penelitian-penelitian tersebut dipandang sebagai struktur resonator berbasis *metamaterial*, mengingat karakterisasi permitivitas efektif, permeabilitas

efektif, atau indeks bias efektif dari struktur tersebut belum diekstraksi secara khusus pada tahap perancangan maupun pengujian.

Berdasarkan uraian penelitian terdahulu tersebut, terlihat kesenjangan antara penelitian struktur resonator berbasis *metamaterial* CSRR maupun SRR yang umumnya diaplikasikan secara terpisah, baik hanya CSRR maupun hanya SRR, untuk karakterisasi material dielektrik atau larutan, dengan kebutuhan pengembangan purwarupa sensor prediktif awal kelembapan tanah yang memanfaatkan kombinasi hibrida CSRR dan SRR secara bersamaan untuk meningkatkan kedalaman *dip* resonansi pada parameter *return loss* (S11). Kombinasi hibrida CSRR-SRR pada penelitian yang dilakukan didasarkan pada asumsi bahwa penggabungan kedua struktur resonator tersebut dapat memperkuat efek kopling elektromagnetik pada *patch* antenna, sehingga kedalaman *dip* resonansi yang dihasilkan berpotensi lebih besar dibandingkan penerapan struktur CSRR atau SRR secara tunggal sebagaimana pada penelitian-penelitian sebelumnya. Posisi penelitian berada pada upaya merancang dan membangun purwarupa sensor prediktif awal kelembapan tanah berbasis antenna mikrostrip dengan struktur hibrida CSRR-SRR yang dioperasikan pada frekuensi 2,5 GHz, dengan fokus pada peningkatan *depth resonance dip* yang diharapkan mampu meningkatkan responsivitas purwarupa dalam mengestimasi nilai GWC (%) pada sampel tanah yang diuji, sehingga perbedaan pergeseran frekuensi resonansi antarsampel menjadi lebih signifikan. Purwarupa antenna hibrida CSRR-SRR yang dirancang tidak membaca nilai GWC (%) secara langsung, melainkan hanya membaca pergeseran frekuensi resonansi yang timbul akibat perubahan permitivitas relatif tanah, sedangkan nilai GWC (%) itu sendiri diperoleh melalui model regresi yang memetakan hubungan antara pergeseran frekuensi resonansi tersebut dan nilai GWC (%) hasil pengukuran gravimetri.

Pemilihan frekuensi kerja 2,5 GHz pada penelitian tidak dimaksudkan sebagai standar utama bagi sensor kelembapan tanah berbasis *microwave*, melainkan merupakan hasil pertimbangan teknis pada tahap perancangan. Frekuensi 2,5 GHz dipilih karena berada pada rentang frekuensi yang berdekatan dengan pita ISM 2,45 GHz, yang umum dijadikan acuan perancangan antenna mikrostrip berbasis substrat FR-4 pada berbagai aplikasi gelombang mikro (Assogba *et al.*, 2025). Penetapan

frekuensi tersebut terutama didasarkan pada rentang kerja *Vector network analyzer* (VNA) yang digunakan pada tahap pengukuran, dimensi antenna mikrostrip yang dapat direalisasikan pada substrat FR-4, serta tingkat sensitivitas struktur terhadap perubahan permitivitas relatif medium tanah pada rentang frekuensi tersebut. Sebagai pertimbangan tambahan yang bersifat sekunder, penetapan frekuensi 2,5 GHz, bukan tepat pada 2,45 GHz, juga memberikan sedikit margin frekuensi terhadap pita ISM 2,45 GHz yang berhimpitan dengan sejumlah aplikasi nirkabel komersial seperti Bluetooth dan WiFi (Assogba *et al.*, 2025), meskipun pertimbangan tersebut bukan menjadi alasan utama penetapan frekuensi kerja pada penelitian yang dilakukan.

Parameter *depth resonance dip* yang menjadi fokus peningkatan pada penelitian merupakan nilai minimum dari kurva *return loss* (S11) pada titik frekuensi resonansi, sehingga parameter tersebut tidak berdiri sendiri terpisah dari S11, melainkan merupakan representasi kedalaman *dip* pada kurva S11 itu sendiri. Nilai *depth resonance dip* menggambarkan seberapa besar energi gelombang elektromagnetik diserap oleh struktur antenna pada titik resonansi tersebut. Semakin dalam nilai *dip* pada kurva *return loss* (S11), perbedaan pembacaan terhadap sampel tanah dengan variasi kelembapan tanah diharapkan menjadi semakin signifikan. Nilai GWC (%) pada penelitian yang dilakukan diukur menggunakan metode *Gravimetric water content* (GWC), yaitu metode pengukuran kelembapan tanah yang dilakukan dengan membandingkan selisih massa sampel tanah basah dan massa sampel tanah kering terhadap massa sampel tanah kering tersebut (Al-rawi, 2024). Metode GWC dipilih sebagai acuan pengukuran karena tingkat akurasi yang tinggi dalam merepresentasikan kelembapan tanah aktual pada sampel tanah, sehingga metode tersebut umum digunakan sebagai metode kalibrasi bagi berbagai jenis sensor kelembapan tanah, termasuk sensor berbasis gelombang mikro (Abdelmoneim *et al.*, 2025). Nilai GWC (%) yang diperoleh melalui metode gravimetri tersebut kemudian dijadikan acuan bagi nilai keluaran purwarupa antenna mikrostrip hibrida CSRR-SRR, sehingga hubungan antara pergeseran frekuensi resonansi dan nilai GWC (%) aktual dapat dipetakan melalui persamaan regresi linear pada tahap pengujian.

Penelitian yang dilakukan memiliki keterbatasan tertentu yang perlu disampaikan. Pengujian dilakukan pada skala purwarupa laboratorium terhadap variasi kelembapan tanah pada satu jenis sampel tanah, yaitu tanah liat, dalam volume terbatas dan menggunakan *Vector network analyzer* (VNA), sehingga pengaruh suhu dan salinitas tanah belum diuji pada penelitian yang dilakukan. Pengukuran pergeseran frekuensi resonansi pada setiap variasi nilai GWC (%) yang dilakukan sebanyak satu kali belum dapat menggambarkan konsistensi keluaran purwarupa terhadap pengukuran berulang pada kondisi kadar air yang sama. Keterulangan pembacaan sensor (*repeatability*) merupakan salah satu aspek penting dalam proses validasi sensor secara umum, karena aspek tersebut menunjukkan konsistensi keluaran sensor terhadap pengukuran berulang pada kondisi pengujian yang sama, sebagaimana ditekankan pada proses kalibrasi sensor kelembapan tanah kapasitif yang melibatkan replikasi sampel pada setiap kondisi kadar air (Abdelmoneim *et al.*, 2025). Nilai koefisien determinasi ( $R^2$ ) yang diperoleh dari model regresi pada penelitian yang dilakukan hanya menunjukkan kesesuaian model terhadap titik data yang diuji (*goodness of fit*), bukan merupakan bukti keterulangan pembacaan purwarupa, sehingga nilai  $R^2$  yang tinggi tidak dapat dijadikan pengganti pengujian *repeatability*. Karena penelitian yang dilakukan menggunakan istilah sensor, pengukuran satu kali pada setiap kondisi GWC belum cukup untuk membuktikan keterulangan pembacaan. Pengujian *repeatability* minimal tiga kali pada setiap variasi GWC tetap diperlukan apabila purwarupa hendak dinyatakan memenuhi syarat dasar sebagai sensor. Performa purwarupa pada kondisi lapangan dengan variasi suhu, jenis tanah, dan kadar garam yang lebih luas, masih memerlukan pengujian lanjutan sebelum purwarupa dapat dipertimbangkan untuk diterapkan pada kondisi aplikasi pertanian presisi.

Sebagai solusi atas permasalahan keterbatasan sensor konvensional, penelitian yang dilakukan menghasilkan rancangan purwarupa prediktif awal sensor kelembapan tanah berbasis antenna mikrostrip dengan struktur hibrida CSRR-SRR yang memanfaatkan hubungan antara pergeseran frekuensi resonansi pada frekuensi 2,5 GHz dan nilai GWC (%) hasil kalibrasi untuk mengestimasi nilai GWC (%) berdasarkan pergeseran frekuensi resonansi pada sampel tanah, dengan kontribusi berupa data karakterisasi pergeseran frekuensi resonansi yang dapat

menjadi rujukan pengembangan sensor *microwave* untuk aplikasi smart agriculture selanjutnya. Purwarupa yang dikembangkan tidak dimaksudkan untuk menggantikan metode gravimetri sebagai acuan pengukuran kelembapan tanah, dan tidak dimaksudkan untuk mengukur kelembapan tanah secara langsung, melainkan berfungsi sebagai purwarupa sensor prediktif awal kelembapan tanah yang mengestimasi nilai GWC (%) berdasarkan hubungan regresi antara pergeseran frekuensi resonansi dan nilai GWC (%) hasil kalibrasi.

## 1.2. Identifikasi Masalah

Berdasarkan latar belakang yang ada, beberapa masalah yang dapat diidentifikasi adalah sebagai berikut:

1. Pengaruh penambahan struktur CSRR dan SRR terhadap nilai *return loss* (S11) minimum pada titik resonansi belum dipetakan secara sistematis pada antenna mikrostrip hibrida yang dirancang.
2. Pengaruh penambahan struktur CSRR dan SRR terhadap besarnya pergeseran frekuensi resonansi akibat variasi kelembapan tanah pada sampel tanah belum dipetakan secara sistematis pada antenna mikrostrip hibrida yang dirancang.
3. Kontribusi masing-masing struktur, baik CSRR maupun SRR, terhadap peningkatan nilai *depth resonance dip* belum dapat dibedakan, sebab pengujian belum dilakukan secara terpisah pada konfigurasi antenna berstruktur CSRR saja, SRR saja, dan hibrida CSRR-SRR.
4. Pembuktian bahwa struktur CSRR dan SRR bekerja sebagai resonator elektromagnetik, bukan hanya sebagai *slot* geometri pada *patch* dan *ground plane*, belum diperkuat melalui analisis distribusi arus permukaan, medan listrik, dan medan magnet pada struktur antenna yang dirancang.
5. Hubungan antara pergeseran frekuensi resonansi dan nilai GWC (%) pada sampel tanah liat perlu dimodelkan melalui persamaan regresi linear sebagai dasar estimasi nilai GWC (%) oleh purwarupa antenna mikrostrip hibrida CSRR-SRR, sehingga diperlukan acuan pengukuran gravimetri sebagai variabel kalibrasi bagi model prediksi tersebut.
6. Pembuktian bahwa struktur CSRR dan SRR pada antenna mikrostrip hibrida yang dirancang bekerja sebagai resonator elektromagnetik, bukan hanya

sebagai *slot* geometri pada *patch* dan *ground plane*, belum diperkuat melalui analisis simulasi distribusi arus permukaan (*surface current*), medan listrik (*E-field*), dan medan magnet (*H-field*) pada struktur antenna yang dirancang. Pembuktian tersebut dibatasi pada ketiga analisis simulasi tersebut dan tidak mencakup ekstraksi parameter *metamaterial* secara penuh, seperti permitivitas efektif, permeabilitas efektif, maupun indeks bias efektif, dari struktur CSRR dan SRR yang digunakan.

7. Nilai GWC (%) yang digunakan sebagai acuan pada tahap pengujian purwarupa antenna mikrostrip hibrida CSRR-SRR belum dibedakan secara eksplisit antara nilai GWC (%) hasil pengukuran gravimetri langsung dan nilai GWC (%) acuan yang diperoleh melalui hasil konversi pembacaan alat ukur kelembapan tanah (*soil moisture*) yang telah dikalibrasi terhadap metode gravimetri, sehingga sumber data GWC (%) pada model regresi perlu dipetakan secara jelas antara kedua jenis acuan tersebut.

### 1.3. Pembatasan Masalah

Agar penelitian yang dilakukan terarah, terfokus, maka dilakukan pembatasan masalah sebagai berikut:

1. Perancangan antenna mikrostrip hibrida CSRR-SRR difokuskan pada frekuensi kerja 2,5 GHz, dengan parameter antenna yang diamati meliputi *return loss* (S11), *Voltage Standing Wave Ratio* (VSWR), *bandwidth*, frekuensi resonansi, *depth resonance dip*, dan dimensi antenna, baik pada tahap simulasi maupun pengukuran.
2. Kriteria  $S_{11} \leq -10$  dB dan  $VSWR \leq 2$  ditetapkan sebagai kriteria kelayakan antenna sebagai elemen peradiasi, bukan sebagai kriteria tunggal kelayakan sensor, sebab kelayakan sensor dinilai secara terpisah pada tahap pengujian terhadap sampel tanah.
3. Kelayakan awal antenna sebagai purwarupa prediktif awal dinilai berdasarkan hubungan antara pergeseran frekuensi resonansi dengan nilai GWC (%) hasil pengukuran metode *Gravimetric water content* (GWC) pada sampel tanah liat, menggunakan persamaan regresi linear dengan pergeseran frekuensi resonansi sebagai variabel prediktor.

4. Sampel tanah yang digunakan pada tahap pengukuran dibatasi pada satu jenis tanah, yaitu tanah liat. Pengaruh suhu, salinitas, dan jenis tanah lain tidak diuji pada penelitian, sehingga hasil pengukuran tidak dapat digeneralisasi untuk seluruh kondisi tanah.
5. Proses fabrikasi hanya dilakukan terhadap desain antenna hibrida CSRR-SRR, tanpa fabrikasi terhadap desain antenna konvensional, desain berstruktur CSRR saja, maupun desain berstruktur SRR saja.
6. Uji peningkatan nilai *depth resonance dip* dan miniaturisasi dimensi antenna akibat penambahan struktur CSRR-SRR terhadap antenna konvensional dilakukan hanya melalui simulasi.
7. Peningkatan sensitivitas antenna terhadap perubahan permitivitas relatif akibat penambahan struktur CSRR-SRR hanya dibuktikan pada tahap simulasi, sedangkan sensitivitas empiris hanya berlaku pada antenna hibrida CSRR-SRR yang difabrikasi, tanpa pembandingan empiris terhadap antenna konvensional.
8. Model regresi yang diperoleh hanya digunakan untuk memprediksi nilai GWC (%) pada rentang 0,35% hingga 14,39%, jenis tanah liat, dan kondisi purwarupa laboratorium yang diuji, bukan untuk menggantikan metode gravimetri atau alat ukur standar kelembapan tanah pada seluruh kondisi tanah. Model prediksi tersebut hanya berlaku apabila pengukuran dilakukan pada kondisi dan prosedur pengujian yang sama dengan yang digunakan pada penelitian yang dilakukan, meliputi jenis sampel tanah, rentang nilai GWC (%) 0,35% hingga 14,39% tersebut, konfigurasi antenna, serta metode pengukuran menggunakan *Vector network analyzer* (VNA).
9. Penelitian yang dilakukan tidak melakukan ekstraksi parameter efektif, seperti permitivitas efektif, permeabilitas efektif, maupun indeks bias efektif, dari struktur CSRR dan SRR yang dirancang, sehingga istilah yang digunakan pada penelitian dibatasi sebagai struktur resonator berbasis *metamaterial*, bukan sebagai *metamaterial* yang telah dibuktikan secara penuh melalui karakterisasi parameter efektif tersebut.

#### 1.4. Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang dan identifikasi masalah yang telah diuraikan, rumusan masalah pada penelitian ini adalah: Bagaimana mengembangkan purwarupa sensor prediktif kelembapan tanah berbasis antenna mikrostrip hibrida CSRR-SRR pada frekuensi 2,5 GHz untuk memprediksi nilai GWC (%) pada sampel tanah liat melalui pergeseran frekuensi resonansi yang dibaca menggunakan VNA?

#### 1.5. Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian yang hendak dicapai dari penelitian ini adalah untuk mengembangkan purwarupa sensor prediktif kelembapan tanah berbasis antenna mikrostrip hibrida CSRR-SRR pada frekuensi 2,5 GHz untuk memprediksi nilai GWC (%) pada sampel tanah liat melalui pergeseran frekuensi resonansi yang dibaca menggunakan VNA.

#### 1.6. Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini meliputi:

1. Penelitian ini diharapkan dapat menambah wawasan dan referensi ilmiah mengenai pemanfaatan antenna mikrostrip sebagai sensor prediktif kelembapan tanah untuk pengukuran nilai GWC (%) pada sampel tanah liat, khususnya terkait hubungan antara perubahan nilai GWC (%) dan pergeseran frekuensi resonansi.
2. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar dalam pengembangan sensor prediktif berbasis gelombang mikro menggunakan antenna mikrostrip untuk mendeteksi perubahan karakteristik suatu medium, serta menjadi acuan bagi penelitian lanjutan dalam pengembangan teknologi penginderaan berbasis gelombang mikro (*microwave sensing*)

*Intelligentia - Dignitas*