

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang Masalah

Sebagai negara agraris tropis, Indonesia memiliki lahan pertanian yang luas serta sumber daya alam yang melimpah sehingga sektor pertanian menjadi salah satu kekuatan utama dalam pembangunan nasional. Berdasarkan data Badan Pusat Statistik, luas lahan pertanian di Indonesia mencapai 7.384.341 hektare dan menjadi sumber penghidupan bagi sebagian besar masyarakat. Keberhasilan sektor pertanian sangat dipengaruhi oleh kondisi tanah, khususnya tingkat kesuburan tanah yang berkaitan erat dengan nilai pH. pH tanah berperan penting dalam menentukan ketersediaan unsur hara serta kemampuan tanaman dalam menyerap nutrisi yang dibutuhkan untuk pertumbuhan dan perkembangannya. Sebagian besar tanaman budidaya memiliki pertumbuhan optimum pada kisaran pH 5,5–7,0, sedangkan tanah yang terlalu asam ($\text{pH} < 5,5$) atau terlalu basa ($\text{pH} > 7,5$) dapat menyebabkan penurunan ketersediaan unsur hara penting seperti nitrogen, fosfor, dan kalium. Oleh karena itu, pemantauan nilai pH tanah menjadi aspek yang penting dalam pengelolaan lahan pertanian guna menjaga kesehatan tanah serta mendukung produktivitas tanaman yang optimal (Zen, dan Rahman, 2025). Pengukuran pH tanah masih didominasi oleh penggunaan pH meter konvensional dengan sensor elektroda gelas. Namun, alat tersebut memiliki beberapa kelemahan, seperti memerlukan proses kalibrasi manual secara berkala, waktu respons yang relatif lama untuk memperoleh hasil pengukuran yang stabil, serta sensitivitas terhadap perubahan suhu yang dapat memengaruhi akurasi pengukuran. Di samping itu, elektroda berbahan kaca memiliki tingkat kerapuhan yang tinggi sehingga kurang sesuai untuk penggunaan di lapangan yang membutuhkan mobilitas dan ketahanan alat yang lebih baik.

Perkembangan teknologi mendorong pengembangan transduser yang lebih kompak serta mampu mendeteksi berbagai target fisik, kimia, dan biologis. Teknologi gelombang mikro telah banyak dimanfaatkan dalam berbagai aplikasi penginderaan, seperti pengukuran larutan cair, kelembapan, dan pemantauan glukosa. Prinsip kerja transduser berbasis gelombang mikro didasarkan pada perubahan respons elektromagnetik ketika terpapar oleh besaran yang diukur.

Interaksi tersebut dapat memengaruhi sifat material antenna, seperti material substrat atau material yang dilapiskan pada permukaan antenna, serta dimensi antenna. Perubahan tersebut kemudian akan memengaruhi karakteristik radiasi antenna (Islam, dkk. 2024).

Perkembangan teknologi antenna menunjukkan bahwa antenna mikrostrip tidak hanya digunakan sebagai perangkat komunikasi, tetapi juga berkembang sebagai transduser gelombang mikro untuk mendeteksi perubahan parameter lingkungan. Transduser berbasis antenna mikrostrip bekerja dengan memanfaatkan perubahan karakteristik elektromagnetik, seperti pergeseran frekuensi resonansi atau perubahan *return loss* (S11), akibat interaksi dengan material di sekitarnya. Dengan keunggulan berupa struktur sederhana, ukuran kompak, dan biaya rendah, teknologi penginderaan dengan antenna mikrostrip banyak dikembangkan untuk aplikasi pertanian, lingkungan, dan IoT sebagai solusi pemantauan yang efisien (Priyanka, dkk. 2024). Antenna mikrostrip merupakan antenna tipis dan berbentuk planar yang terdiri dari *patch* yang ditempatkan pada satu sisi substrat dielektrik, serta *ground plane* pada sisi lainnya. *Patch* dan *ground* biasanya terbuat dari bahan konduktor seperti tembaga, sedangkan substrat menggunakan material dielektrik dengan rugi-rugi rendah. Sebagai transduser gelombang mikro, antenna mikrostrip tidak membaca nilai pH secara langsung, melainkan merespons perubahan karakteristik elektromagnetik medium yang timbul akibat variasi sifat dielektrik. Perubahan tersebut ditunjukkan melalui perubahan parameter antenna, terutama *return loss* (S11), yang selanjutnya dapat dikorelasikan dengan karakteristik sampel yang diukur (Fadilah & Budayawan, 2022).

Perubahan nilai pH tanah tidak hanya memengaruhi kondisi kimia tanah, tetapi juga berdampak pada karakteristik elektromagnetiknya. Nilai pH berkaitan dengan konsentrasi ion hidrogen (H^+) dan hidroksida (OH^-), yang turut memengaruhi kandungan ion terlarut serta konduktivitas listrik tanah. Perubahan konsentrasi ion tersebut menyebabkan perubahan sifat dielektrik tanah, terutama nilai konstanta dielektrik (ϵ_r). Konstanta dielektrik merupakan parameter utama yang menentukan interaksi gelombang elektromagnetik dengan suatu material. Oleh karena itu, ketika nilai pH tanah berubah, karakteristik rambatan gelombang elektromagnetik pada tanah juga mengalami perubahan sehingga dapat

memengaruhi respons elektromagnetik yang diterima oleh suatu transduser berbasis gelombang mikro (Salam & Raza, 2020:41).

Perubahan sifat dielektrik akibat variasi pH tanah dapat diamati melalui larutan hasil ekstraksi tanah, yaitu campuran tanah dan air yang digunakan sebagai media pengukuran pH. Nilai pH larutan hasil ekstraksi mencerminkan konsentrasi ion hidrogen (H^+), ion hidroksida (OH^-), serta ion-ion terlarut lainnya yang berasal dari tanah. Perubahan konsentrasi ion dalam larutan hasil ekstraksi tanah dapat memengaruhi karakteristik elektromagnetik medium, termasuk konstanta dielektrik (ϵ_r), sehingga mengubah interaksi gelombang elektromagnetik dengan medium tersebut. Perubahan karakteristik medium tersebut memengaruhi distribusi medan elektromagnetik dan impedansi masukan antenna, yang kemudian tercermin sebagai perubahan nilai parameter antenna. Namun, respons antenna tersebut tidak hanya dipengaruhi oleh nilai pH, melainkan juga dapat dipengaruhi oleh faktor lain, seperti konduktivitas listrik, konsentrasi ion terlarut, salinitas, suhu, dan volume larutan yang diaplikasikan pada permukaan antenna. Perubahan karakteristik elektromagnetik medium dapat memengaruhi parameter antenna, seperti *return loss* (S11), VSWR, frekuensi, dan *bandwidth*.

Selain mampu menghasilkan respons terhadap perubahan sifat dielektrik media, pengembangan antenna sebagai transduser juga memerlukan proses validasi untuk memastikan bahwa perubahan nilai *return loss* (S11) benar-benar disebabkan oleh variasi nilai pH larutan hasil ekstraksi tanah, bukan oleh pengaruh variabel lain seperti suhu, konduktivitas, salinitas, maupun heterogenitas ion terlarut. Oleh karena itu, validasi menjadi tahapan penting untuk mengevaluasi apakah respons antenna memiliki hubungan yang konsisten dengan perubahan nilai pH.

Penelitian yang dilakukan oleh Amilia dkk. (2025) mengembangkan antenna mikrostrip untuk aplikasi sensor pH tanpa kontak (*non-contact*) dan tanpa pelabelan (*label-free*). Antenna dirancang bekerja pada frekuensi 2,45 GHz dengan karakteristik resonansi yang baik, kemudian dilakukan fabrikasi dan pengujian untuk mengevaluasi respons antenna terhadap perubahan nilai pH. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan nilai pH menghasilkan perubahan frekuensi resonansi yang bersifat hampir linear dengan sensitivitas rata-rata sekitar 1,14 MHz/pH pada rentang pH 3–10. Selain itu, antenna menunjukkan performa yang

stabil dan memiliki kemampuan yang baik dalam mendeteksi perubahan pH, sehingga berpotensi diterapkan sebagai sensor berbasis gelombang mikro.

Shoaib, dkk. (2025) mengusulkan penggunaan antenna mikrostrip *patch* dengan teknik *inset-fed* pada frekuensi sekitar 2,4 GHz untuk mendeteksi variasi pH air. Antena dirancang menggunakan substrat FR-4 dengan *patch* dan *ground* berbahan tembaga, serta dievaluasi melalui parameter kinerja seperti *return loss* (S11) dan VSWR. Prinsip kerja sensor didasarkan pada perubahan sifat dielektrik medium akibat variasi konsentrasi ion H^+ dan OH^- yang memengaruhi polarisasi molekul air. Perubahan konstanta dielektrik (ϵ_r) tersebut menyebabkan perubahan parameter *return loss* (S11) pada antena. Dengan menganalisis perubahan respons elektromagnetik tersebut, variasi nilai pH air dapat dideteksi.

Parameter *return loss* (S11) dapat digunakan sebagai keluaran dalam deteksi variasi pH larutan hasil ekstraksi tanah karena mampu menggambarkan perubahan karakteristik antena akibat interaksi langsung antara *patch* antena mikrostrip dan larutan hasil ekstraksi tanah. Larutan hasil ekstraksi yang ditempatkan pada permukaan *patch* akan menyebabkan perubahan konstanta dielektrik (ϵ_r). Perubahan sifat dielektrik tersebut mengubah distribusi medan elektromagnetik yang terkonsentrasi di sekitar *patch* antena, sehingga memengaruhi impedansi masukan (*input impedance*) antena. Perubahan impedansi mengakibatkan perubahan koefisien refleksi yang direpresentasikan oleh parameter *return loss* (S11). Oleh karena itu, variasi nilai *return loss* (S11) dapat digunakan sebagai indikator untuk mengidentifikasi perubahan sifat dielektrik larutan hasil ekstraksi tanah yang berkorelasi dengan perubahan nilai pH.

Untuk meningkatkan performa antena sebagai transduser, diperlukan optimasi pada struktur pencatu yang digunakan. Salah satu teknik yang banyak diterapkan adalah *Coplanar Waveguide* (CPW). Albaihani dkk. (2025) menjelaskan bahwa optimasi antena mikrostrip dengan teknik pencatutan CPW mampu meningkatkan performa antena, terutama dalam hal *bandwidth*, efisiensi radiasi, dan pencocokan impedansi. Berbeda dengan pencatutan *microstrip line* konvensional yang menempatkan jalur pencatu dan bidang ground pada sisi substrat yang berbeda, struktur CPW menempatkan jalur pencatu dan ground pada satu bidang yang sama. Konfigurasi CPW mampu mengurangi rugi-rugi pencatutan (*feeding loss*),

memperbaiki pencocokan impedansi, serta menghasilkan respons frekuensi yang lebih stabil. Karakteristik tersebut menjadikan CPW mampu meningkatkan interaksi medan elektromagnetik dengan material uji, sehingga perubahan sifat dielektrik akibat variasi pH larutan ekstrak tanah dapat dideteksi melalui perubahan parameter antenna secara lebih jelas.

Selain optimasi pada struktur pencatutan, peningkatan performa antenna juga dapat dilakukan melalui modifikasi geometri *patch* menggunakan kombinasi *U-Slot* dan *Annular Ring Slot (ARS)*. Penambahan *U-Slot* diterapkan sebagai skema optimasi untuk menghasilkan karakteristik *multiband*, yaitu memungkinkan antenna bekerja pada lebih dari satu frekuensi resonansi. Thakur, dkk. (2024) menjelaskan modifikasi geometri *patch* dengan menambahkan *U-Slot* merupakan salah satu metode yang umum digunakan untuk menghasilkan frekuensi resonansi tambahan pada antenna mikrostrip. Sementara itu, penerapan *Annular Ring Slot (ARS)* bertujuan untuk meningkatkan *gain* antenna melalui pengaturan distribusi arus permukaan pada *patch*, sehingga efisiensi radiasi antenna menjadi lebih baik.

Pemilihan frekuensi kerja merupakan salah satu aspek penting dalam perancangan antenna sebagai transduser berbasis gelombang mikro. Frekuensi 2,4 GHz dan 5,8 GHz yang termasuk dalam pita *Industrial, Scientific, and Medical (ISM)* banyak dimanfaatkan pada berbagai aplikasi sensor berbasis gelombang mikro. Pada rentang frekuensi tersebut, gelombang elektromagnetik memiliki sensitivitas yang baik terhadap perubahan sifat dielektrik suatu material, sehingga banyak digunakan dalam aplikasi *microwave sensing* untuk karakterisasi material, pengukuran kadar air, maupun deteksi perubahan komposisi bahan (Zambak, dkk., 2023). Di antara frekuensi 2,4 GHz dan 5,8 GHz, frekuensi 2,4 GHz dinilai lebih sesuai untuk aplikasi *microwave sensing*, karena frekuensi 2,4 GHz memiliki keseimbangan yang baik antara ukuran antenna, kemampuan penetrasi gelombang elektromagnetik, dan tingkat redaman propagasi pada media dielektrik. Dibandingkan dengan frekuensi 5,8 GHz, gelombang pada frekuensi 2,4 GHz mengalami atenuasi yang lebih rendah sehingga interaksi elektromagnetik dengan media berlangsung lebih stabil. (Zhou, dan Huang, 2025). Jadi frekuensi 2,4 GHz menjadi frekuensi utama pengujian transduser sementara itu, frekuensi 5,8 GHz dipertahankan sebagai bagian dari capaian desain antenna *multiband* untuk

menunjukkan bahwa antenna mampu beroperasi pada dua pita frekuensi ISM, namun tidak digunakan sebagai frekuensi utama dalam pengujian transduser. Pita frekuensi ISM 2,4 GHz memiliki rentang frekuensi 2,400–2,4835 GHz, sehingga setiap frekuensi yang berada pada rentang tersebut termasuk 2,445 GHz, masih dikategorikan sebagai bagian dari pita kerja 2,4 GHz. Oleh karena itu, frekuensi resonansi 2,445 GHz dipilih sebagai frekuensi kerja utama dalam pengujian transduser pH larutan hasil ekstraksi tanah.

Pada penelitian sebelumnya oleh Amilia dkk. (2025) serta Shoaib dkk. (2025), pemanfaatan antenna mikrostrip sebagai sensor masih terbatas pada pengukuran pH larutan standar. Kondisi tersebut berbeda dengan larutan hasil ekstraksi tanah, yang memiliki komposisi lebih kompleks karena mengandung berbagai ion dan senyawa terlarut yang dapat memengaruhi sifat dielektrik media serta respons elektromagnetik antenna. Dengan keadaan tersebut menjadikan kemampuan antenna mikrostrip sebagai transduser pada media hasil ekstraksi tanah masih belum banyak dikaji. Selain itu, pengembangan antenna mikrostrip dengan teknik pencatutan *Coplanar Waveguide* (CPW) untuk aplikasi transduser pH larutan ekstraksi tanah juga masih sangat terbatas. Penelitian-penelitian terdahulu menunjukkan bahwa antenna mikrostrip dapat dimanfaatkan sebagai transduser untuk mendeteksi perubahan sifat dielektrik suatu media melalui perubahan parameter karakteristik antenna, seperti *return loss* (S11). Perubahan nilai pH pada larutan hasil ekstraksi tanah memengaruhi sifat dielektrik media sehingga berpotensi menghasilkan perubahan respons elektromagnetik yang dapat dideteksi oleh antenna mikrostrip. Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini mengusulkan pengembangan antenna mikrostrip dengan pencatutan *Coplanar Waveguide* (CPW) yang dioptimasi menggunakan *U-Slot* dan *Annular Ring Slot* (ARS) sebagai transduser untuk pengukuran pH larutan ekstrak tanah. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan antenna mikrostrip dengan pencatutan CPW sebagai transduser berbasis gelombang mikro yang mampu memberikan respons terhadap perubahan sifat dielektrik larutan hasil ekstraksi tanah akibat variasi nilai pH, serta mengevaluasi potensi awal penggunaan antenna mikrostrip sebagai transduser untuk memprediksi pH larutan ekstrak tanah melalui perubahan nilai *return loss* (S11).

1.2. Identifikasi Masalah

Berdasarkan latar belakang yang disajikan, identifikasi masalah yang didapat dari penelitian ini diantaranya:

1. Belum diketahui secara jelas hubungan antara perubahan nilai *return loss* (S11) antena mikrostrip berpencatuan *Coplanar Waveguide* (CPW) dengan variasi nilai pH larutan hasil ekstraksi tanah sebagai medium pengujian.
2. Validitas antena mikrostrip berpencatuan *Coplanar Waveguide* (CPW) sebagai transduser pH larutan hasil ekstraksi tanah masih perlu dibuktikan melalui analisis kuantitatif terhadap hubungan antara perubahan nilai *return loss* (S11) dan variasi nilai pH.
3. Respons nilai *return loss* (S11) antena terhadap variasi nilai pH larutan hasil ekstraksi tanah berpotensi dipengaruhi oleh variabel lain, seperti volume larutan yang diaplikasikan, posisi larutan pada area *sensing* antena, konduktivitas listrik, konsentrasi ion terlarut, suhu, serta kondisi lingkungan selama pengukuran, sehingga pengaruh faktor-faktor tersebut perlu dipertimbangkan dalam interpretasi hasil.
4. Diperlukan pengembangan struktur antena mikrostrip berpencatuan *Coplanar Waveguide* (CPW) yang mampu memenuhi parameter kinerja antena, seperti frekuensi resonansi, *return loss* (S11), VSWR, *bandwidth*, dan *gain*, sebagai dasar sebelum antena dievaluasi fungsinya sebagai transduser.
5. Masih terdapat perbedaan antara hasil simulasi dan hasil pengukuran antena setelah proses fabrikasi yang dapat memengaruhi karakteristik elektromagnetik antena, sehingga diperlukan evaluasi terhadap tingkat kesesuaian antara hasil desain dan hasil realisasi.

1.3. Pembatasan Masalah

Berdasarkan latar belakang, dan identifikasi masalah yang disajikan, agar penelitian tetap terarah, dan tidak meluas, maka perlu dibatasi pada:

1. Objek penelitian dibatasi pada tanah lahan pertanian yang umum digunakan sebagai media tanam, tanpa membahas jenis tanah lain seperti tanah industri, tanah tambang, tanah gambut, maupun tanah non-pertanian.

2. Media pengujian yang digunakan berupa larutan hasil ekstraksi tanah dengan air suling (akuades). Oleh karena itu, penelitian ini hanya menguji respons antenna terhadap variasi pH larutan hasil ekstraksi tanah pada kondisi laboratorium (*laboratory test*) dan tidak membahas pengukuran secara langsung pada tanah padat (*in-situ*).
3. Pengujian dilakukan pada lima sampel larutan hasil ekstraksi tanah dengan rentang pH asam hingga agak basa, yaitu sekitar pH 4,7–7,7.
4. Teknik pencatutan yang digunakan pada antenna mikrostrip dibatasi pada *Coplanar Waveguide* (CPW) tanpa melakukan perbandingan dengan teknik pencatutan lainnya.
5. Antenna dirancang sebagai antenna *multiband* yang bekerja pada frekuensi 2,4 GHz dan 5,8 GHz. Namun, pengujian antenna sebagai transduser untuk mendeteksi perubahan pH larutan hasil ekstraksi tanah hanya difokuskan pada frekuensi resonansi 2,445 GHz, sedangkan frekuensi 5,8 GHz dipertahankan sebagai karakteristik antenna *multiband* dan tidak digunakan dalam pengujian transduser.
6. Analisis kinerja transduser dibatasi pada perubahan respons *return loss* (S11) terhadap variasi pH larutan hasil ekstraksi tanah.
7. Penelitian ini tidak membahas secara mendalam pengaruh parameter lain yang dapat memengaruhi karakteristik elektromagnetik larutan hasil ekstraksi tanah, seperti konduktivitas listrik, salinitas, tekstur tanah, kadar air alami tanah, suhu, maupun jenis tanah.
8. Pengujian karakteristik antenna dan respons transduser dilakukan menggunakan *Vector Network Analyzer* (VNA), sehingga parameter yang dianalisis terbatas pada parameter yang dapat diukur menggunakan instrumen tersebut.
9. Proses perancangan dan simulasi antenna dilakukan menggunakan perangkat lunak *CST Studio Suite 2023*, tanpa memodelkan secara khusus karakteristik dielektrik larutan hasil ekstraksi tanah karena keterbatasan data sifat dielektrik yang tersedia.

1.4. Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang dan identifikasi masalah yang telah diuraikan, rumusan masalah pada penelitian ini adalah bagaimana mengembangkan transduser berbasis antenna mikrostrip dengan pencatutan *Coplanar Waveguide* (CPW) untuk memprediksi pH larutan hasil ekstraksi tanah melalui perubahan *return loss* (S11) yang dibaca menggunakan VNA?

1.5. Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian yang hendak dicapai dari penelitian ini adalah untuk mengembangkan transduser berbasis antenna mikrostrip dengan pencatutan *Coplanar Waveguide* (CPW) untuk memprediksi pH larutan hasil ekstraksi tanah melalui perubahan *return loss* (S11) yang dibaca menggunakan VNA.

1.6. Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini diantaranya:

1. Penelitian ini diharapkan dapat menambah wawasan dan referensi ilmiah mengenai pemanfaatan antenna mikrostrip sebagai transduser untuk pengukuran pH larutan ekstrak tanah, khususnya terkait hubungan antara perubahan pH larutan ekstrak tanah dan respons parameter antenna seperti perubahan *return loss* (S11).
2. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar dalam pengembangan transduser berbasis gelombang mikro menggunakan antenna mikrostrip untuk mendeteksi perubahan karakteristik suatu medium. Selain itu, hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi bagi penelitian lanjutan dalam pengembangan dan penyempurnaan transduser berbasis antenna mikrostrip untuk berbagai aplikasi penginderaan (*microwave sensing*).

Intelligentia - Dignitas