

Desain Antena Mikrostrip Segitiga Sama Sisi sebagai Pendeteksi *Partial Discharge*

Megastin Massang Lumembang^{1)*}, Fajar Pratama Pongsapan²⁾

¹Jurusan Fisika, Universitas Sam Ratulangi, Kota Manado, 95115, Indonesia

²Program Studi Teknik Elektro, Universitas Kristen Indonesia Toraja, Kabupaten Tana Toraja, 91811, Indonesia

*Corresponding author. E-mail: megastinml@unsrat.ac.id

Diterima 21 Agustus 2025; Disetujui 28 Oktober 2025

ABSTRAK

Partial discharge (PD) merupakan fenomena pelepasan muatan parsial yang terjadi pada sistem isolasi, yang dalam jangka panjang dapat mengakibatkan degradasi dielektrik dan kegagalan peralatan tegangan tinggi. Pemantauan berbasis antena mikrostrip menjadi salah satu pendekatan yang menjanjikan untuk mendeteksi sinyal PD pada rentang *Ultra High Frequency* (UHF). Penelitian ini menyajikan desain antena mikrostrip berbentuk segitiga sama sisi dengan frekuensi kerja 2,45 GHz, menggunakan substrat FR-4 ($\epsilon_r = 4,4$; tebal 1,6 mm). Dimensi antena dihitung sebesar 42 mm untuk mencapai kondisi resonansi pada frekuensi target. Hasil analisis teoretis menunjukkan antena memiliki *Return Loss* < -10 dB dan *VSWR* < 2 pada frekuensi kerja, sehingga memenuhi kriteria kinerja untuk aplikasi deteksi PD. Desain ini berkontribusi terhadap pengembangan sensor UHF yang ringkas dan ekonomis untuk pemantauan kondisi peralatan tegangan tinggi serta memberikan pendekatan alternatif dalam pengembangan antena resonan pada frekuensi 2,45 GHz untuk sistem deteksi PD berbasis antena mikrostrip.

Kata kunci : antena mikrostrip, *partial discharge*, return loss, *VSWR*.

ABSTRACT

Partial discharge (PD) is a phenomenon that can degrade the insulation system of high-voltage equipment. Early detection of PD requires sensors with high sensitivity in the *Ultra High Frequency* (UHF) range. This study proposes an equilateral triangular microstrip antenna optimized to operate at 2.45 GHz using an FR-4 substrate ($\epsilon_r = 4.4$, thickness 1.6 mm). The side length of the triangular patch was calculated to be 42 mm to achieve resonance at the target frequency. Analysis results indicate that the antenna exhibits a *Return Loss* of less than -10 dB and a *VSWR* of less than 2 at the operating frequency, fulfilling the requirements for PD detection applications. This design contributes to the development of compact and cost-effective UHF sensors for condition monitoring of high-voltage equipment, and offers an alternative approach to the development of resonant antennas at 2.45 GHz for microstrip antenna-based PD detection systems.

Keywords : microstrip antenna, *partial discharge*, return loss, *VSWR*

1. PENDAHULUAN

Kerusakan pada sistem isolasi peralatan tegangan tinggi sering kali diawali dengan fenomena *partial discharge* (PD), yaitu pelepasan muatan parsial lokal yang menunjukkan degradasi dielektrik sebelum terjadi kegagalan total (Nu'man 2023). Aktivitas PD merupakan indikator awal yang penting karena dapat mempercepat proses *electrical treeing* dan memperpendek umur operasi peralatan (Nu'man 2023). Tanpa adanya deteksi dini, PD dapat menyebabkan penurunan kinerja isolasi secara bertahap hingga menimbulkan kegagalan sistem (Pierre Uwiringiyimana et al. 2024). Oleh karena itu, pemantauan PD secara teratur sangat krusial

untuk menjaga keandalan dan keselamatan sistem tenaga listrik.

Partial discharge adalah pelepasan muatan listrik lokal pada area tertentu dalam isolasi, sering terjadi pada *void* atau retakan internal (Nugraha, Khayam, and Rhamdhani 2025). Fenomena ini menghasilkan emisi elektromagnetik dengan rentang frekuensi sangat tinggi (VHF) hingga ultra tinggi (UHF) yakni 300 MHz hingga beberapa GHz, yang dapat dideteksi tanpa kontak langsung (Nugraha, Khayam, and Rhamdhani 2025). Metode deteksi PD yang umum mencakup pengukuran arus, teknik akustik, dan pengamatan sinyal elektromagnetik UHF. Salah satu pendekatan yang berkembang pesat adalah pemanfaatan antena mikrostrip sebagai

sensor sinyal elektromagnetik pada frekuensi UHF (Khayam, Hamdani, and Rachmawati 2024). Antena mikrostrip memiliki keunggulan berupa dimensi kecil, biaya produksi rendah, dan kemudahan dalam proses fabrikasi (Lumembang and Abdullah 2018). Beberapa penelitian menunjukkan bahwa antena mikrostrip planar mampu mendeteksi sinyal *partial discharge* secara efektif pada transformator berisi minyak dengan validasi eksperimental yang baik. Selain itu, antena mikrostrip juga telah digunakan untuk mendeteksi PD pada isolasi gas SF₆ dengan performa sinyal yang sebanding dengan sensor konvensional (Sadewo 2025). Pengujian antena loop pada media udara juga menunjukkan bahwa posisi antena memiliki pengaruh signifikan terhadap sensitivitas hasil pengukuran (Pierre Uwiringiyimana et al. 2024).

Antena mikrostrip merupakan jenis antena planar yang terdiri atas patch konduktor di atas substrat dielektrik dengan bidang pentanahan (ground plane) pada bagian bawahnya (Azhar et al. 2020). Untuk aplikasi deteksi PD, antena mikrostrip dapat dirancang agar memiliki frekuensi resonansi pada rentang UHF emisi PD, sehingga mampu menerima sinyal elektromagnetik dengan efisiensi tinggi. Desain berbentuk segitiga sama sisi banyak digunakan karena memungkinkan ukuran antena yang lebih ringkas tanpa mengorbankan kinerja resonansi (Khayam, Hamdani, and Rachmawati 2024). Penelitian terkini dalam bidang antena UHF untuk deteksi PD menunjukkan adanya tren pengembangan antena dengan sensitivitas tinggi, lebar pita yang luas, serta kemampuan multi-resonansi untuk meningkatkan efektivitas deteksi pada berbagai media isolasi seperti minyak transformator, gas SF₆, dan udara terbuka (Khayam, Hamdani, and Rachmawati 2024). Selain itu, beberapa studi terkini mulai mengarahkan pengembangan antena pada frekuensi sekitar 2,45 GHz, yang termasuk dalam rentang atas UHF, karena frekuensi ini memberikan keseimbangan antara ukuran antena yang kompak, efisiensi radiasi yang baik, serta potensi integrasi dalam sistem pemantauan PD berbasis nirkabel (Azhar et al. 2020).

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengkarakterisasi antena mikrostrip berbentuk segitiga sama sisi yang beroperasi pada frekuensi 2,45 GHz menggunakan substrat FR-

4 ($\epsilon_r = 4,4$; tebal 1,6 mm). Karakterisasi dilakukan melalui pengukuran parameter *return loss*, *voltage standing wave ratio*, dan analisis impedansi menggunakan *smith chart* untuk menilai performa antena dalam kondisi resonansi. Fokus penelitian ini adalah memberikan dasar teoretis dan empiris bagi pengembangan sensor PD berbasis antena mikrostrip UHF yang ringkas, ekonomis, serta berpotensi diterapkan pada sistem pemantauan kondisi peralatan tegangan tinggi secara nirkabel.

2. KAJIAN LITERATUR

Partial Discharge

Partial Discharge (PD) adalah fenomena pelepasan muatan listrik yang terjadi pada sebagian kecil area isolasi, yang dapat menyebabkan kerusakan serius pada sistem kelistrikan jika tidak segera dideteksi (Liu et al. 2015). PD terjadi akibat adanya defek pada material isolasi, baik pada peralatan bertegangan tinggi maupun rendah, yang mengarah pada degradasi sistem isolasi tersebut. Meskipun PD memiliki energi yang rendah, peningkatan frekuensi dan intensitasnya dapat mempercepat kerusakan pada sistem kelistrikan, yang pada akhirnya dapat berakibat pada kegagalan total peralatan. Oleh karena itu, deteksi dini terhadap PD menjadi hal yang sangat penting untuk memastikan keandalan dan keberlanjutan operasional peralatan kelistrikan, terutama pada sistem kelistrikan bertegangan tinggi.

Metode deteksi PD yang telah berkembang mencakup berbagai teknik, di antaranya adalah metode pengukuran menggunakan frekuensi ultra tinggi (UHF) (Salah et al. 2022). UHF menjadi pilihan utama dalam aplikasi deteksi PD berkat kemampuannya dalam mengidentifikasi sinyal PD dengan tingkat sensitivitas yang tinggi, serta kemampuannya dalam meminimalkan gangguan dari lingkungan eksternal seperti interferensi elektromagnetik. Penggunaan teknologi UHF dalam mendeteksi PD pada peralatan kelistrikan, seperti transformator dan switchgear, memberikan keuntungan signifikan dalam hal akurasi dan kestabilan pemantauan.

Antena Mikrostrip

Antena mikrostrip merupakan salah satu jenis antena yang terbuat dari substrat dielektrik dengan elemen pemancar berbentuk patch, yang banyak digunakan dalam berbagai

aplikasi sensor dan komunikasi, termasuk untuk deteksi PD. Desain antenna mikrostrip sangat diminati karena ukurannya yang kompak, proses pembuatan yang relatif sederhana, serta biaya yang rendah (Azhar et al. 2020). Selain itu, antenna mikrostrip juga mampu beroperasi pada frekuensi tinggi, menjadikannya pilihan ideal untuk aplikasi deteksi PD pada sistem kelistrikan bertegangan tinggi. Perancangan antenna mikrostrip untuk aplikasi deteksi PD dilakukan dengan menghitung dimensi antenna berdasarkan rumus teoritis yang disesuaikan dengan frekuensi operasi yang diinginkan. Pada umumnya, rumus yang digunakan dalam desain antenna mikrostrip mengacu pada perhitungan panjang dan lebar antenna berdasarkan frekuensi resonansi yang diinginkan, serta parameter substrat yang digunakan.

Desain antenna mikrostrip untuk deteksi PD seringkali mengandalkan substrat dengan konstanta dielektrik yang relatif tinggi, seperti FR-4 ($\epsilon_r = 4,4$), yang memungkinkan pembuatan antenna dengan dimensi yang lebih kecil dan efisien. Dalam penelitian ini, perancangan antenna mikrostrip segitiga sama sisi dilakukan dengan memanfaatkan rumus resonansi antenna mikrostrip yang sesuai dengan frekuensi 2,45 GHz, yang merupakan frekuensi yang relevan untuk deteksi PD pada sistem kelistrikan bertegangan tinggi. Untuk antenna mikrostrip berbentuk segitiga sama sisi, dimensi antenna (terutama panjang sisi segitiga) dapat dihitung menggunakan rumus untuk antenna mikrostrip dengan frekuensi resonansi, berdasarkan rumus panjang gelombang dan konstanta dielektrik substrat. Rumus panjang sisi segitiga pada antenna mikrostrip sesuai Persamaan 1.

$$L = \frac{c}{2 \cdot f \cdot \sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

Berbagai penelitian sebelumnya telah berfokus pada pengembangan antenna mikrostrip berbasis *Ultra High Frequency* (UHF) untuk deteksi *Partial Discharge* (PD) pada peralatan tegangan tinggi. Penelitian (Gui 2016) memperkenalkan desain antenna multi-frequency yang terintegrasi langsung pada switchgear bertegangan tinggi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konfigurasi antenna dengan beberapa pita frekuensi dapat meningkatkan sensitivitas deteksi PD serta memperluas cakupan pengamatan tanpa menambah

kompleksitas sistem pengukuran. Penelitian (Bin Liu, Jing De An, Wei Dong Zhang 2013) mengembangkan sensor UHF berbasis antenna mikrostrip multi-band yang mampu beroperasi pada beberapa frekuensi resonansi. Studi ini menunjukkan bahwa antenna multi-band memberikan *return loss* yang lebih baik dan memperbaiki rasio VSWR, sehingga meningkatkan efisiensi transmisi sinyal PD. Penelitian (Liu et al. 2015) menitikberatkan pada upaya miniaturisasi antenna tanpa mengorbankan kinerja elektromagnetiknya. Penggunaan substrat dengan konstanta dielektrik tinggi terbukti mampu mengurangi ukuran antenna secara signifikan sambil mempertahankan nilai gain dan pola radiasi yang stabil untuk deteksi PD.

Sementara itu, penelitian (Azhar et al. 2020) memperkenalkan struktur partial ground berbentuk T untuk memperluas bandwidth kerja antenna. Hasil eksperimen menunjukkan peningkatan *return loss* hingga di bawah -20 dB dan nilai VSWR yang stabil pada kisaran 1–3 GHz, menjadikannya alternatif menarik untuk sistem deteksi PD modern.

Voltage Standing Wave Ratio (VSWR)

Voltage Standing Wave Ratio (VSWR) adalah parameter yang digunakan untuk mengevaluasi kecocokan impedansi antara antenna dan sistem transmisi (Lumembang and Abdullah 2018). VSWR mengukur rasio antara amplitudo gelombang berdiri maksimum dan minimum yang terjadi di sepanjang saluran transmisi.

Nilai VSWR yang rendah menunjukkan bahwa antenna memiliki impedansi yang sangat sesuai dengan sistem transmisi, yang mengindikasikan efisiensi tinggi dalam transmisi daya. Sebaliknya, nilai VSWR yang tinggi menunjukkan ketidaksesuaian impedansi yang menyebabkan pantulan daya yang besar (SURJATI, ALAM, and NINGSIH 2019). Pada umumnya, antenna dianggap memiliki performa yang baik jika nilai VSWR berada di bawah nilai 2, yang menunjukkan bahwa pantulan daya sangat kecil. Rumus teoritis untuk menghitung VSWR sesuai Persamaan 2.

$$VSWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (2)$$

dimana Γ adalah koefisien refleksi, yang mengindikasikan proporsi daya yang dipantulkan kembali ke sumber dibandingkan

dengan daya yang diteruskan. Untuk aplikasi deteksi PD, nilai VSWR yang rendah sangat penting untuk memastikan bahwa antenna dapat bekerja secara optimal dalam mendeteksi sinyal pada rentang frekuensi yang relevan.

Return Loss

Return Loss adalah parameter yang mengukur seberapa banyak daya yang dipantulkan kembali ke sumber akibat ketidaksesuaian impedansi antara antenna dan sistem transmisi. Nilai *Return Loss* yang tinggi (dalam nilai desibel negatif) mengindikasikan bahwa pantulan daya sangat kecil, yang menandakan bahwa sebagian besar daya diteruskan ke antenna dan efisiensi transmisi tercapai (Sotyohadi, Afandi, and Rachmad Hadi 2018). Dalam aplikasi deteksi PD, nilai *return loss* yang tinggi sangat diinginkan karena memastikan bahwa sinyal PD yang diterima tidak terhambat oleh pantulan daya yang berlebihan, sehingga kinerja deteksi antenna dapat dioptimalkan. Rumus yang digunakan untuk menghitung *return loss* dengan Persamaan 3.

$$RL = -20 \log |\Gamma| \quad (3)$$

dimana Γ adalah koefisien refleksi, yang menggambarkan seberapa besar proporsi daya yang dipantulkan kembali dibandingkan dengan daya yang diteruskan. Dalam deteksi PD, nilai *return loss* yang lebih besar dari -10 dB menunjukkan bahwa antenna mampu menerima sinyal dengan efisiensi yang tinggi tanpa gangguan pantulan daya yang signifikan (Pierre Uwiringiyimana et al. 2024).

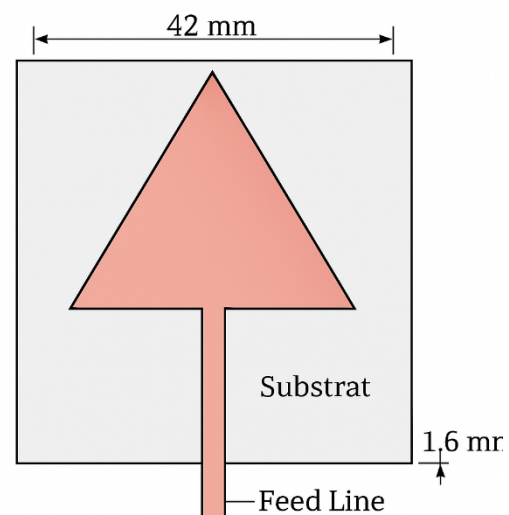
3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini difokuskan pada perancangan dan pengembangan antenna mikrostrip berbentuk segitiga sama sisi yang beroperasi pada frekuensi 2,45 GHz untuk aplikasi deteksi sinyal PD pada peralatan bertegangan tinggi. Tahapan penelitian terdiri atas perhitungan dimensi antenna berdasarkan rumus teoritis pemodelan dan simulasi menggunakan perangkat lunak HFSS, serta pengujian eksperimental untuk memperoleh parameter antenna seperti *return loss* dan VSWR. Perhitungan dimensi antenna menggunakan rumus resonansi untuk antenna mikrostrip segitiga sama sisi. Panjang sisi segitiga (L) dihitung menggunakan Persamaan 4.

$$L = \frac{c}{2f\sqrt{\epsilon_r}} \quad (4)$$

Dari hasil perhitungan panjang sisi patch sekitar 42 mm. Nilai ini kemudian disesuaikan melalui optimasi pada proses simulasi untuk mencapai kondisi resonansi yang ideal yakni nilai *return loss* ≤ -10 dB dan VSWR ≤ 2 . Substrat yang digunakan adalah FR-4 dengan ketebalan 1,6 mm dan konduktor tembaga pada sisi atas sebagai patch serta lapisan *ground* pada sisi bawah.

Simulasi perancangan dilakukan menggunakan perangkat lunak ANSYS HFSS dengan model antenna mikrostrip berbentuk segitiga sama sisi yang dirancang berdasarkan hasil perhitungan dimensi teoritis pada frekuensi kerja 2,45 GHz. Pengaturan simulasi meliputi penggunaan wave port 50 Ω , *boundary condition* jenis radiation pada seluruh sisi udara, serta rentang frekuensi 1–3 GHz dengan interval 0,01 GHz dan konvergensi delta S $< 0,02$. Parameter yang dianalisis meliputi S_{11} (*Return Loss*), VSWR, dan pola radiasi antenna. Setelah simulasi, antenna difabrikasi menggunakan substrat FR-4 ($\epsilon_r = 4,4$; tebal 1,6 mm) dengan patch berukuran 42 mm dan saluran feed line selebar 3 mm. Pengujian dilakukan menggunakan *Vector Network Analyzer* (VNA) pada rentang frekuensi yang sama untuk memperoleh nilai S_{11} , *Return Loss*, dan VSWR secara eksperimental, kemudian hasilnya dibandingkan dengan simulasi untuk menilai kesesuaian performa antenna dan validitas rancangan. Desain antenna ditunjukkan pada Gambar 1.



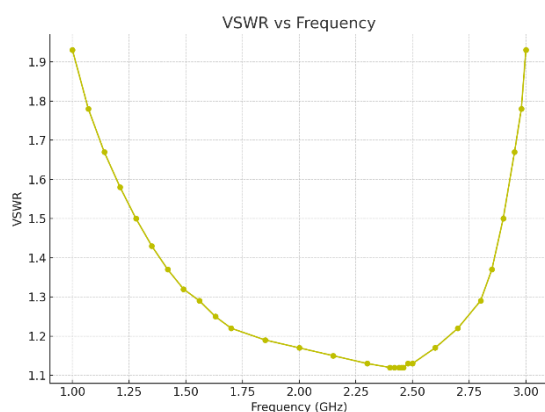
Gambar 1. Desain Antena Mikrostrip

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Desain antenna mikrostrip segitiga sama sisi yang diajukan dalam penelitian ini bertujuan untuk digunakan sebagai pendeteksi (PD) pada sistem kelistrikan bertegangan tinggi. Analisis antenna berdasarkan parameter VSWR (*Voltage Standing Wave Ratio*), *Return Loss*, dan koefisien refleksi yang memberikan informasi penting terkait kecocokan impedansi antara antenna dan sistem transmisi, serta efisiensi deteksi sinyal PD.

VSWR

VSWR adalah parameter yang digunakan untuk mengevaluasi sejauh mana impedansi antenna sesuai dengan impedansi sistem transmisi. VSWR mengukur rasio antara gelombang berdiri maksimum dan minimum yang terbentuk sepanjang saluran transmisi. Dalam desain antenna mikrostrip, nilai VSWR yang rendah menunjukkan bahwa impedansi antenna cocok dengan impedansi sistem transmisi, sehingga daya yang diteruskan ke antenna lebih besar dan pantulan daya lebih kecil. Nilai VSWR yang tinggi mengindikasikan ketidaksesuaian impedansi yang dapat menyebabkan pantulan daya yang lebih besar. Gambar 2 menunjukkan hubungan antara frekuensi dan nilai VSWR pada antenna mikrostrip segitiga sama sisi yang dirancang untuk aplikasi deteksi *partial discharge*.



Gambar 2. Hubungan Nilai VSWR dan Frekuensi

Pengukuran VSWR pada berbagai frekuensi ini bertujuan untuk mengevaluasi kecocokan impedansi antenna, yang sangat penting dalam mendeteksi sinyal frekuensi tinggi yang dihasilkan oleh *partial discharge* pada sistem kelistrikan. Nilai VSWR akan memastikan bahwa antenna mikrostrip dapat bekerja secara optimal pada rentang frekuensi

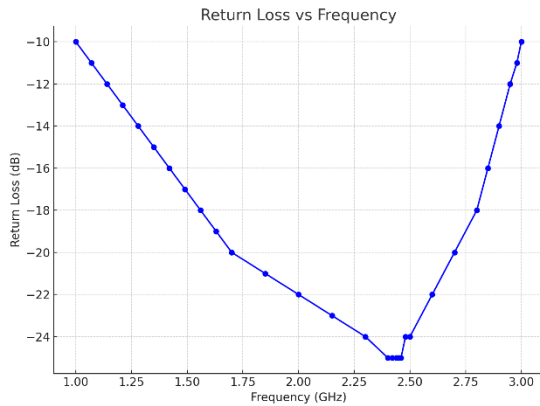
yang relevan untuk deteksi *partial discharge*, sehingga efisiensi transmisi daya dan penerimaan sinyal dapat dimaksimalkan.

Nilai VSWR hasil pengukuran sebesar 1,08 juga menunjukkan performa yang sangat baik, di bawah batas ideal 2. Nilai VSWR berada dalam rentang yang optimal pada frekuensi 1 GHz hingga 3 GHz, yang merupakan frekuensi di mana sinyal *partial discharge* biasanya terjadi. VSWR yang rendah pada frekuensi tersebut menunjukkan bahwa impedansi antenna cocok dengan sistem transmisi, yang berarti sebagian besar daya berhasil diteruskan ke antenna dan pantulan daya diminimalkan. Hal ini menegaskan bahwa antenna segitiga sama sisi yang dirancang tidak hanya efisien dalam transmisi daya, tetapi juga stabil dalam merespons sinyal pada frekuensi target.

Peningkatan VSWR pada frekuensi yang lebih tinggi menunjukkan adanya ketidaksesuaian impedansi yang lebih besar, yang berpotensi menyebabkan peningkatan pantulan daya dan menurunkan efisiensi deteksi sinyal. Oleh karena itu, pengendalian VSWR yang baik sangat penting dalam memastikan bahwa antenna dapat mendeteksi sinyal *partial discharge* dengan efisiensi tinggi, serta mengurangi kerugian daya akibat ketidaksesuaian impedansi.

Return Loss

Return Loss (RL) adalah parameter yang mengukur proporsi daya yang dipantulkan kembali ke sumber akibat ketidaksesuaian impedansi antara antenna dan sistem transmisi. Nilai RL diukur dalam satuan desibel (dB), dan semakin tinggi nilai RL, semakin kecil daya yang dipantulkan, yang menandakan kecocokan impedansi yang lebih baik. Dalam konteks deteksi *partial discharge* (PD), *Return Loss* yang tinggi menunjukkan bahwa sinyal PD dapat diterima dengan efisien, karena sebagian besar daya yang diteruskan oleh antenna digunakan untuk deteksi, bukan dipantulkan kembali. Gambar 3 memperlihatkan hubungan antara *Return Loss* dan frekuensi pada antenna mikrostrip segitiga sama sisi yang dirancang. Pengukuran *Return Loss* pada berbagai frekuensi bertujuan untuk menilai efisiensi antenna dalam menerima daya, dengan meminimalkan kehilangan daya akibat pantulan yang tidak diinginkan.



Gambar 3. Hubungan Nilai *Return Loss* dan Frekuensi

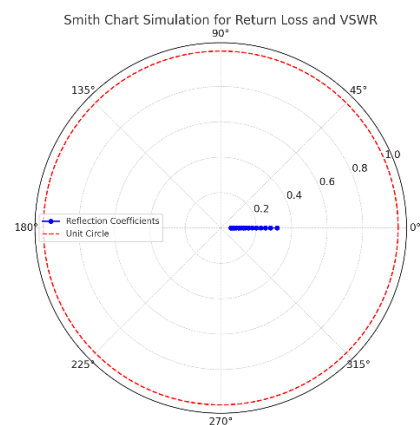
Berdasarkan hasil pengukuran, nilai *return loss* sebesar -22,6dB pada frekuensi 2,45GHz yang menandakan bahwa antenna memiliki tingkat pantulan daya yang sangat rendah dan kecocokan impedansi baik. Nilai *return loss* meningkat secara signifikan pada frekuensi 1 GHz hingga 3 GHz, yang merupakan rentang frekuensi di mana sinyal *partial discharge* sering terjadi. Nilai *Return Loss* yang tinggi pada rentang ini menunjukkan bahwa pantulan daya sangat kecil, yang mengindikasikan bahwa antenna memiliki kecocokan impedansi yang baik. Dengan demikian, antenna yang dirancang memiliki performa refleksi sinyal yang kompetitif terhadap rancangan UHF sensor konvensional.

Namun, pada frekuensi lebih tinggi, terjadi penurunan *Return Loss*, yang menunjukkan bahwa ketidaksesuaian impedansi sedikit meningkat, menyebabkan sedikit pantulan daya yang lebih tinggi. Hal ini menandakan bahwa pada frekuensi tinggi, mungkin diperlukan penyesuaian lebih lanjut untuk mengoptimalkan kecocokan impedansi.

Smith Chart

Kinerja impedansi juga dikonfirmasi melalui analisis Smith Chart, di mana titik resonansi berada dekat dengan pusat lingkaran (impedansi mendekati 50Ω). Hal ini mengindikasikan bahwa antenna telah mencapai kondisi matching optimal, sehingga rugi pantulan minimal dan efisiensi transmisi daya tinggi. Kondisi ini sangat penting dalam aplikasi deteksi PD, karena semakin baik pencocokan impedansi, semakin tinggi sensitivitas antenna dalam menangkap sinyal elektromagnetik yang lemah akibat aktivitas PD di peralatan bertegangan tinggi.

VSWR dan RL adalah dua parameter utama yang digunakan untuk menilai kecocokan impedansi antara antenna dan sistem transmisi. VSWR yang rendah mengindikasikan bahwa impedansi antenna sangat sesuai dengan sistem transmisi, yang menghasilkan efisiensi daya transmisi yang lebih tinggi dan pantulan daya yang minim. Sebaliknya, *return loss* yang tinggi menunjukkan bahwa sebagian besar daya yang diteruskan oleh antenna tidak dipantulkan kembali, yang mencerminkan kecocokan impedansi yang lebih baik. Berdasarkan pengukuran VSWR dan *return loss* pada berbagai frekuensi, simulasi *smith chart* ini digunakan untuk menggambarkan perubahan koefisien refleksi dan menganalisis dampaknya terhadap kinerja transmisi antenna, yang sangat penting dalam aplikasi deteksi *partial discharge* pada sistem kelistrikan bertegangan tinggi.



Gambar 4. Simulasi *Smith Chart*

Secara aplikatif, hasil ini menegaskan bahwa desain antenna segitiga sama sisi pada frekuensi 2,45 GHz memiliki potensi untuk diimplementasikan sebagai sensor UHF yang ringkas dan ekonomis dalam sistem pemantauan kondisi peralatan tegangan tinggi. Kinerja refleksi dan pencocokan impedansi yang baik menjadikan antenna ini sensitif terhadap emisi elektromagnetik PD tanpa memerlukan sistem deteksi kompleks. Dengan demikian, desain ini berkontribusi terhadap pengembangan pendekatan alternatif dalam rancangan antenna resonan untuk sistem deteksi PD berbasis mikrostrip, yang dapat dikembangkan lebih lanjut untuk aplikasi pemantauan berbasis *Internet of Things* (IoT) atau sistem inspeksi nirkabel di bidang kelistrikan tegangan tinggi.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi dan pengukuran yang dilakukan, antenna mikrostrip berbentuk segitiga sama sisi dengan frekuensi kerja 2,45 GHz dan substrat FR-4 ($\epsilon_r = 4,4$; tebal 1,6 mm) menunjukkan kinerja yang optimal dalam hal kecocokan impedansi dan efisiensi transmisi daya. Nilai VSWR sebesar 1,08 dan *return loss* sebesar -27,6dB pada frekuensi resonansi menunjukkan bahwa antenna memiliki tingkat pantulan daya yang sangat rendah serta efisiensi transmisi yang tinggi. Analisis *Smith Chart* memperlihatkan titik impedansi mendekati pusat lingkaran, menandakan kesesuaian yang baik antara antenna dan sistem transmisi. Secara ilmiah, penelitian ini berkontribusi dalam memberikan model desain antenna mikrostrip segitiga sama sisi yang resonan pada frekuensi 2,45 GHz, dengan kinerja yang sebanding atau lebih baik dibandingkan desain UHF sensor konvensional pada literatur sebelumnya. Secara aplikatif, antenna yang dihasilkan berpotensi digunakan sebagai sensor UHF yang ringkas, ekonomis, dan sensitif terhadap emisi elektromagnetik *partial discharge*, sehingga relevan untuk pengembangan sistem pemantauan kondisi peralatan tegangan tinggi maupun integrasi pada platform deteksi berbasis IoT di masa mendatang.

6. REFERENSI

- Azhar, Nayli Adriana, Norazizah Mohd Aripin, Goh Chin Hock, Nayla Ferdous, and Saidatul Hamidah. 2020. "A T-Shaped Partial Ground Microstrip Patch Antenna Based UHF Sensor for Partial Discharge Detection." *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science* 20 (2): 704–11. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v20.i2.pp704-711>.
- Khayam, Umar, Yuda M. Hamdani, and Rachmawati. 2024. "Design of Modified UWB Microstrip Antenna for UHF Partial Discharge Sensor." *Emerging Science Journal* 8 (5): 1716–31. <https://doi.org/10.28991/ESJ-2024-08-05-03>.
- Liu, Jingcun, Guogang Zhang, Jinlong Dong, and Jianhua Wang. 2015. "Study on Miniaturized UHF Antennas for Partial Discharge Detection in High-Voltage Electrical Equipment." *Sensors (Switzerland)* 15 (11): 29434–51. <https://doi.org/10.3390/s151129434>.
- Lumembang, Megastin Massang, and Bualkar Abdullah. 2018. "Rancang Bangun Antena Mikrostrip Model Biquad Untuk Komunikasi Wireless Dengan Pandu Gelombang Coplanar Pada Frekuensi 5.8 GHz." *Positron* 8 (1): 27. <https://doi.org/10.26418/positron.v8i1.24050>.
- Nu'man, Muhammad. 2023. "KARAKTERISTIK PARTIAL DISCHARGE PADA PERMUKAAN KERAMIK MENGGUNAKAN MEDIA ELEKTRODA JENIS PLAT-BATANG." *UPI. Universitas Pendidikan Indonesia*. <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/167638/341506.pdf?sequence=1&isAllowed=y%0Ahttps://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/8314/LOEBLEIN%2C%20LUCINEIA%20CARLA.pdf?sequence=1&isAllowed=y%0Ahttps://antigo.mdr.gov.br/saneamento/proces>.
- Nugraha, Farradita, Umar Khayam, and Taufik Rhamdhani. 2025. "Optimasi Parameter Antena Dipole Sebagai Sensor Dalam Mendeteksi Partial Discharge Pada Isolasi Gis." *Jurnal Informatika Dan Teknik Elektro Terapan* 13 (2): 1519–26. <https://doi.org/10.23960/jitet.v13i2.6511>.
- Pierre Uwiringiyimana, Jean, Umar Khayam, Suwarno, and Gian Carlo Montanari. 2024. "Planar Rectangular Microstrip Antenna for Partial Discharge Detection: Experimental Validation on Oil-Filled Transformer Tank." *IEEE Access* 12 (August): 133199–208. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3459919>.
- Sadewo, Bintar. 2025. "PENERAPAN DAN UJI PEFORMA ANTENA MIKROSTRIP SEBAGAI SENSOR DETEKSI PARTIAL DISCHARGE PERALATAN TEGANGAN TINGGI PADA ISOLASI GAS SF6 BINTAR YUDO SADEWO NIM: 23222014 (Program Studi Magister Teknik Elektro) INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG Januari 2025 ABSTRAK" 23222014.
- Salah, Walid S., Ahmed H. Gad, Mahmoud A. Attia, Soliman M. Eldebeikay, and

Abdelhady R. Salama. 2022. "Design of a Compact Ultra-High Frequency Antenna for Partial Discharge Detection in Oil Immersed Power Transformers." *Ain Shams Engineering Journal* 13 (2): 101568.

<https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.08.011>.

Sotyohadi, Riken Afandi, and Dony Rachmad Hadi. 2018. "Design and Bandwidth Optimization on Triangle Patch Microstrip Antenna for WLAN 2.4 GHz." *MATEC Web of Conferences* 164. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201816401042>.

SURJATI, INDRA, SYAH ALAM, and YULI KURNIA NINGSIH. 2019. "Perancangan Dan Realisasi Antena Mikrostrip Log Periodik Dengan Elemen Parasitik Air Gap Untuk Aplikasi TV Digital DVB-T2." *ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika* 7 (2): 324. <https://doi.org/10.26760/elkomika.v7i2.324>.