PERANCANGAN ANTENA MIKROSTRIP DENGAN SRR PADA FREKUENSI 900 MHz DAN 1800 MHz UNTUK PENERAPAN RF ENERGY HARVESTING PADA IoT

Berchmans Richard Gere Kopa
Teknik Telekomunikasi
Fakultas Teknik Elektro
Surabaya, Indonesia
berchmansrichardgere@gmail.com

Dr. Fannush Shofi Akbar,S.ST
Teknik Telekomunikasi
Fakultas Teknik Elektro
Surabaya, Indonesia

Dr. Mohammad Yanuar Hariyawan,S.T.,M.T.
Teknik Telekomunikasi
Fakultas Teknik Elektro
Surabaya, Indonesia

***Abstrak* — Penelitian ini membahas desain dan analisis antena mikrostrip dual-band yang digunakan untuk menerima sinyal radio frekuensi (RF) dalam mendukung sistem RF energy harvesting pada perangkat IoT. Meningkatnya jumlah perangkat IoT dan keterbatasan dalam penggantian baterai mendorong pengembangan solusi pengisian daya alternatif. Antena yang dirancang memanfaatkan struktur Split Ring Resonator (SRR) untuk menghasilkan karakteristik dual-band pada frekuensi 900 MHz dan 1800 MHz.**

Proses perancangan dilakukan melalui simulasi menggunakan perangkat lunak CST Studio Suite 2019 serta pengujian eksperimental. Hasil simulasi menunjukkan antena mampu beresonansi pada frekuensi 902 MHz dan 1806 MHz dengan nilai return loss masing-masing sebesar –27,52 dB dan –24,24 dB. Sementara itu, hasil pengukuran menunjukkan nilai –19,47 dB dan –18,25 dB. Bandwidth yang diperoleh sebesar 36 MHz untuk 900 MHz dan 75 MHz untuk 1800 MHz. Dengan kinerja tersebut, antena ini berpotensi diterapkan pada berbagai aplikasi IoT, seperti pemantauan lingkungan, manajemen energi, dan sistem kesehatan nirkabel.

Kata kunci*— *(Desain antenna, antenna microstrip, SRR, Dan IOT)

I. PENDAHULUAN

Perkembangan pesat Internet of Things (IoT) telah mendorong integrasi berbagai perangkat cerdas yang saling terhubung melalui jaringan nirkabel. Teknologi ini memainkan peran penting dalam berbagai aplikasi, seperti pemantauan lingkungan, otomasi industri, sistem kesehatan digital, dan manajemen energi. Namun, salah satu tantangan utama dalam penerapan IoT adalah penyediaan sumber daya listrik yang andal dan berkelanjutan, terutama untuk perangkat yang ditempatkan di lokasi terpencil atau sulit dijangkau.

Salah satu solusi yang potensial untuk mengatasi permasalahan tersebut adalah teknologi Radio Frequency (RF) energy harvesting, yaitu metode pengumpulan energi dari gelombang elektromagnetik di lingkungan sekitar. Gelombang RF dipancarkan oleh berbagai sumber seperti BTS, Wi-Fi, dan stasiun siaran, sehingga dapat dimanfaatkan sebagai sumber daya alternatif bagi perangkat berdaya rendah. Untuk mendukung efisiensi sistem RF energy harvesting, diperlukan antena penerima yang mampu bekerja secara optimal pada frekuensi-frekuensi yang umum digunakan dalam komunikasi nirkabel.

Dalam konteks ini, frekuensi 900 MHz dan 1800 MHz menjadi pilihan yang strategis karena banyak digunakan pada sistem komunikasi seluler dan jaringan IoT. Oleh karena itu, penelitian ini mengusulkan perancangan antena mikrostrip dual-band dengan penambahan struktur Split Ring Resonator (SRR) yang dirancang untuk bekerja pada kedua frekuensi tersebut. Antena yang dirancang diharapkan mampu meningkatkan efisiensi penerimaan daya RF dengan dimensi yang kompak dan biaya produksi yang rendah, sehingga sesuai untuk diintegrasikan ke dalam perangkat IoT.

Penelitian ini mencakup proses simulasi menggunakan CST Studio Suite 2019, fabrikasi prototipe antena, serta pengukuran parameter performa seperti return loss, Voltage Standing Wave Ratio (VSWR), pola radiasi, dan polarisasi. Hasil yang diperoleh diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan sistem pengisian daya nirkabel berbasis RF yang efisien dan aplikatif untuk perangkat IoT. Walaupun konsep ini memiliki potensi yang signifikan, proses perancangan antena mikrostrip yang memiliki kinerja optimal dan keandalan tinggi pada frekuensi 900 MHz dan 1800 MHz masih memerlukan riset dan pengembangan lanjutan. Berdasarkan latar belakang tersebut, studi mengenai desain antena mikrostrip sebagai solusi pengisian daya alternatif bagi perangkat IoT menjadi sangat relevan, khususnya pada frekuensi kerja tersebut. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk merumuskan pendekatan inovatif dan efisien dalam mengatasi permasalahan suplai daya pada perangkat IoT, sehingga dapat mendorong pemanfaatan teknologi IoT yang lebih hemat energi dan berkelanjutan di berbagai bidang aplikasi.

II. KAJIAN TEORI

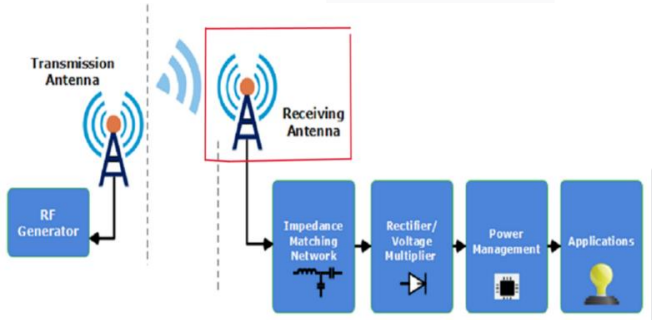
A. RF Energy Harvesting

Pemanenan energi dari gelombang radio (Radio Frequency/RF) merupakan salah satu pendekatan yang menjanjikan untuk penyediaan sumber daya alternatif bagi perangkat berdaya rendah, khususnya dalam ekosistem Internet of Things (IoT). Meskipun sistem pemanen RF saat ini umumnya menghasilkan daya dalam skala miliwatt, hal ini sudah memadai untuk mengoperasikan perangkat seperti sensor nirkabel, modul komunikasi, serta perangkat monitoring.

Ketersediaan sinyal RF di lingkungan sekitar—yang berasal dari pemancar seperti base transceiver station (BTS), Wi-Fi, serta siaran televisi dan radio—membuka peluang untuk mengonversi energi elektromagnetik yang tersebar menjadi daya listrik yang dapat digunakan. Namun, tingkat efisiensi energi yang dapat dipanen masih tergolong rendah, terutama di lingkungan terbuka, sehingga diperlukan optimalisasi dari sisi rancangan antena dan sistem penyearah (rectifier).

Dalam implementasinya, pemilihan rentang frekuensi memegang peranan penting. Untuk aplikasi luar ruangan, penggunaan frekuensi rendah seperti VHF dan UHF lebih disarankan karena jangkauan yang lebih luas, sedangkan untuk aplikasi dalam ruangan, frekuensi tinggi (GHz) dapat memberikan performa lebih baik.

Oleh karena itu, penelitian ini difokuskan pada perancangan antena mikrostrip dual-band yang bekerja pada frekuensi 900 MHz dan 1800 MHz untuk mendukung kinerja sistem RF energy harvesting. Antena dirancang agar mampu menangkap energi RF secara efisien, yang selanjutnya dikonversi menjadi daya DC melalui rangkaian penyearah, untuk kemudian dimanfaatkan oleh perangkat IoT.[11]. Penelitian ini berfokus pada perancangan antenna penerima dapat dilihat pada gambar 1.



Gambar 1. Blok diagram RF Harvesting

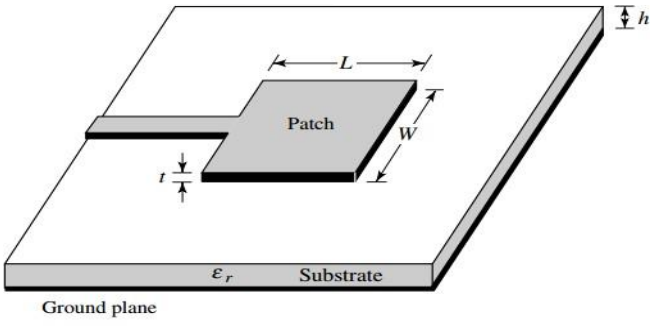
B. Antena

Antena merupakan komponen penting dalam sistem komunikasi nirkabel yang berfungsi sebagai penghubung antara perangkat elektronik dan ruang bebas. Fungsinya mencakup proses transmisi dan penerimaan gelombang elektromagnetik, di mana sinyal dari saluran transmisi dikonversi menjadi radiasi elektromagnetik saat dipancarkan, dan sebaliknya saat diterima. Efektivitas sebuah sistem komunikasi sangat dipengaruhi oleh karakteristik antena yang digunakan, termasuk bentuk fisik, pola radiasi, polarisasi, dan efisiensi pencocokan impedansi. Oleh karena itu, pemilihan dan perancangan antena yang tepat menjadi krusial dalam memastikan performa optimal dari perangkat komunikasi, terutama pada aplikasi yang mengandalkan frekuensi tertentu seperti 900 MHz dan 1800 MHz.

C. Antena Mikrostrip

Antena mikrostrip merupakan jenis antena planar yang tersusun atas patch konduktor yang dipasang di atas lapisan substrat dielektrik dan dipisahkan dari ground plane. Karakteristik fisiknya yang ringan, berukuran ringkas, dan mudah difabrikasi menjadikan antena ini sangat sesuai untuk integrasi pada perangkat komunikasi modern, termasuk sistem berbasis Internet of Things (IoT). Selain itu, bentuknya yang konformal memungkinkan pemasangan pada berbagai permukaan tanpa mengganggu desain perangkat secara keseluruhan.

Kelebihan lain dari antena mikrostrip adalah kemudahannya dalam proses pencetakan melalui teknologi printed circuit board (PCB) serta kemampuannya untuk dikonfigurasi guna menghasilkan berbagai pola radiasi dan polarisasi. Namun demikian, jenis antena ini memiliki keterbatasan dalam hal bandwidth, gain, dan efisiensi radiasi, yang menjadikannya subjek utama dalam berbagai penelitian untuk meningkatkan performa melalui teknik rekayasa struktur, seperti penambahan resonator atau elemen parasitik. Dalam konteks perancangan antena dual-band, antena mikrostrip dapat dioptimalkan dengan penambahan elemen seperti Split Ring Resonator (SRR) untuk menghasilkan karakteristik frekuensi ganda dan memperluas cakupan operasionalnya.



Gambar 2. Struktur dasar antena

Dengan:

t	= Tinggi Patch/Tebal Patch
W	= Panjang Patch
L	= Lebar Patch
h	= Tinggi Substrat/Tebal Substrat
εr	= Susbtrat Dielektrik

D. Perhitungan dimensi antena

Salah satu bentuk patch pada antena mikrostrip adalah persegi
panjang (rectangular). Pada pembuatan antena yang dilakukan adalah
dengan menggunakan patch persegi panjang (rectangular)
Untuk menentukan dimensi antena berupa lebar patch persegi panjang,
dapat dicari dengan persamaan :

$$w = \frac{c}{2fc}\sqrt{\frac{\varepsilon_r+1}{2}} \quad (1)$$

Dengan C = kecepatan cahaya ($3 \times 108 m/s$)

fc = frekuensi tengah dari antena
εr= konstanta dari bahan substrate yang digunakan
Panjang patch (L) dapat ditentukan dengan mengetahui nilai ΔL yang
merupakan pertambahan dari L. Nilai dari ΔL dapat dicari dengan
persamaan :

$$\Delta L = \frac{0.412h(\varepsilon eff+0.3)\left(\frac{w}{h}+0.264\right)}{\left(\varepsilon_{e_{ff}}-0.258\right)\left(\frac{w}{h}+0.8\right)} \quad (2)$$

h adalah ketebalan lapisan dielektrik substrate
εeff adalah konstanta efektifitas dielektrik relatif yang dapat dicari dengan persamaan :

$$\varepsilon_{e_{ff}} = \frac{\varepsilon_r+1}{2} + \frac{\varepsilon_r-1}{2}\left(\left[1+\frac{12h}{W}\right]^{-\frac{1}{2}}\right) \quad (3)$$

Maka Panjang patch (L) dapat di cari dengan :

$$L = Leff + 2\Delta L \quad (4)$$

$Leff$ Merupakan panjang patch efektif yang dapat dicari dengan
persamaan:

$$Leff = \frac{c}{2fc\sqrt{\varepsilon_{eff}}} \quad (5)$$

Untuk mencari Panjang dan lebar ground plane digunakan rumus berikut:

$$LG = 6h + Lp \quad (6)$$

$$WG = 6h + Wp \quad (7)$$

Keterangan:
Lg = Panjang ground plane (mm)
Wg = lebar ground plane (mm)

Lalu pada antenna juga terdapat saluran microstrip yang merupakan sebuah strip dengan lebar W dan bidang grounding, keduanya dipisahkan oleh suatu substrat yang memiliki permitivitas relatif (εreff) dengan tinggi (h). salah satu parameter utama pada saluran transmisi adalah impendansi karateristiknya Z0. Impendansi karakteristik Z0 dari saluran microstrip antenna patch di tentukan oleh lebar strip antenna (W) dan tinggi substrate (h). karakkterisstsik daari saluran microstrip untuk w/h < 1. Untuk menghitung konstanta dielektrik efektif (εreff) dapat menggunakan rumus berikut.

$$\varepsilon \text{ reff} = \frac{\varepsilon_r+1}{2} + \frac{\varepsilon_r}{2}\left[\frac{1}{\sqrt{1+\frac{12h}{w}}} + 0{,}04\,(1-w/h)^2\right] \quad (8)$$

Dan untuk mencari karakteristik impedansi digunakan :

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_{reff}}} In\left(\frac{8h}{w}+\frac{w}{4h}\right) \quad (9)$$

Sedangkan untuk W/h > 1
Perhitungan konstanta dielekrtik efektif (ε_{reff}) menggunakan :

$$\varepsilon_{reff} = \frac{\varepsilon_r+1}{2} + \frac{\varepsilon_r-1}{2}\left[\frac{1}{\sqrt{1+\frac{12h}{w}}}\right] \quad (10)$$

Dan untuk mencari karakteristik impedansi, digunakan :

$$Z_0 = \frac{120\pi/\sqrt{\varepsilon_{reff}}}{\frac{w}{h}+1{,}393+\frac{2}{3}In\left(\frac{w}{h}+1{,}44\right)} \quad (11)$$

Perhitungan saluran microstrip menggunakan rumus berikut :

$$W = \frac{2h}{\pi}\{B-1-In(2B-1)+\frac{\varepsilon r}{2\varepsilon r}[In(B-1)+ 0{,}3 \quad (12)$$

Dengan εr adalah konstanta dielektrik relatif dan :

$$B = \frac{60\pi^2}{Z_0\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (13)$$

Keterangan :
B : besar impedansi pada saluran (ohm)
Z_0: impedansi beban (ohm)
ε_r : konstanta dielekrtik efektif

E. Parameter Antena

a. S-Parameter

Parameter dasar antena, seperti return loss atau S11, digunakan untuk menunjukkan performa antena. Return loss adalah salah satu parameter yang digunakan untuk menilai performa antena. Dalam perancangan antena, seperti impedansi terminal antena, VSWR, bandwidth, pola radiasi, polarisasi, directivity, dan gain. Impedansi terminal antena didefinisikan sebagai impedansi yang ditimbulkan antena pada terminalnya[15]. Gain antena adalah perbandingan antara intensitas radiasi pada titik tertentu antena dengan intensitas radiasi rata-rata di seluruh antena dibagi dengan 4π. Pola radiasi antena menunjukkan sifat pancaran secara visual. antena yang dibuat menggunakan parameter koordinat ruang. Parameter ini digunakan untuk menguji dan mengukur apakah antena bekerja dengan baik dan memenuhi fungsinya. Nilai VSWR dan kehilangan kembali berpengaruh pada unjuk kerja antena yang dirancang. Daya direfleksikan lebih besar jika nilai VSWR lebih tinggi, sehingga unjuk kerja antena lebih buruk. Sebaliknya, jika nilai VSWR lebih rendah, daya direfleksikan lebih sedikit, sehingga unjuk kerja antena lebih baik. Polarisasi adalah sifat gelombang yang terkait dengan orientasi geometri osilasi pada gelombang transversal Dalam gelombang transversal, arah rambat (osilasi) mengirimkan sinyal dalam bidang yang perpendikal dengan arah pergerakan (motion) gelombang Polarisasi mempengaruhi cara sinyal radio, cahaya, atau magnet yang bergerak ke arah tertentu

b. Gain

Gain antena merupakan parameter yang menggambarkan kemampuan antena dalam memfokuskan daya radiasi ke arah tertentu dibandingkan dengan antena isotropik ideal. Besarnya gain menunjukkan seberapa efisien antena dalam mengubah daya input menjadi radiasi elektromagnetik yang terarah. Secara matematis, gain dapat didefinisikan sebagai rasio antara intensitas radiasi pada arah tertentu terhadap daya total yang diterima oleh antena,

dan biasanya dinyatakan dalam satuan desibel isotropik (dBi).

Terdapat dua jenis gain yang umum digunakan, yaitu absolute gain dan relative gain. Absolute gain membandingkan intensitas radiasi antena terhadap antena isotropik dengan distribusi radiasi merata ke segala arah. Sementara itu, relative gain membandingkan antena uji dengan antena referensi non-isotropik namun memiliki daya input yang sama. Dalam perancangan antena untuk aplikasi RF energy harvesting dan IoT, nilai gain yang tinggi menjadi penting karena berkontribusi langsung pada efisiensi penerimaan daya dari sumber gelombang elektromagnetik di lingkungan sekitar.

c. Bandwith

Bandwidth antena adalah rentang frekuensi di mana antena mampu bekerja secara efektif dengan pantulan sinyal yang rendah, biasanya ditandai dengan nilai $|S_{11}| < -10$ dB atau VSWR < 2. Bandwidth menunjukkan seberapa lebar antena dapat mentransmisikan atau menerima sinyal tanpa kehilangan performa yang signifikan.

Antena mikrostrip secara umum mempunyai Bandwidth yang sempit, sekitar 2–5% dari Frekuensi tengah, karena sifat resonansi tunggal dari patch. Beberapa faktor yang memengaruhi bandwidth antara lain ketebalan dan konstanta dielektrik substrat, rugi-rugi material, serta teknik pencocokan impedansi.

Untuk memperlebar bandwidth atau menambahkan frekuensi kerja kedua (dual-band), dapat digunakan teknik seperti penambahan Split Ring Resonator (SRR), slot, atau struktur parasitik. SRR berfungsi sebagai resonator pasif yang mampu menciptakan resonansi tambahan, memperluas bandwidth, dan meningkatkan kinerja antenna

d. Pola Radiasi

Pola radiasi antena merupakan gambaran tentang bagaimana energi gelombang elektromagnetik dipancarkan atau diterima oleh antena ke berbagai arah. Dengan kata lain, pola ini menunjukkan ke mana saja sinyal dari antena menyebar di udara.

Pola radiasi biasanya digambarkan dalam bentuk grafik dua dimensi atau tiga dimensi, dan membantu kita memahami arah mana yang memiliki pancaran paling kuat (disebut main lobe) serta arah lainnya yang memiliki pancaran lemah (side lobe dan back lobe).

Setiap jenis antena memiliki pola radiasi yang unik, tergantung bentuk fisik, cara pemberian sinyal (feed), dan struktur pendukungnya. Pada antena mikrostrip, pola radiasi cenderung bersifat arah (directional), dan dapat berubah saat antena dimodifikasi

e. Polarisasi

Dalam sistem komunikasi nirkabel, polarisasi antena menjadi salah satu aspek penting yang menentukan seberapa baik sinyal dapat dipancarkan dan diterima. Polarisasi mengacu pada arah medan listrik dari gelombang elektromagnetik saat gelombang tersebut merambat di udara. Sederhananya, ini adalah arah "getaran" sinyal yang dipancarkan oleh antena.

Terdapat beberapa jenis polarisasi yang umum digunakan, di antaranya adalah polarisasi linear, sirkular, dan elips. Pada polarisasi linear, medan listrik bergetar dalam satu arah tertentu, seperti vertikal atau horizontal. Ini adalah bentuk polarisasi yang paling umum dan banyak digunakan dalam aplikasi sehari-hari. Sementara itu, pada polarisasi sirkular, medan listrik berputar secara spiral saat merambat, yang membuat sinyal tetap stabil meskipun orientasi antena berubah. Polarisasi elips berada di antara keduanya, dengan bentuk getaran yang lebih kompleks dan melengkung.

Kesesuaian polarisasi antara antena pemancar dan penerima sangatlah penting. Jika arah polarisasinya berbeda secara ekstrem, seperti satu vertikal dan satu horizontal, maka sebagian besar energi sinyal bisa hilang, dan komunikasi menjadi tidak efisien. Inilah sebabnya mengapa dalam desain antena, pemilihan dan pengujian polarisasi menjadi langkah yang tidak bisa diabaikan.

f. VSWR

Voltage Standing Wave Ratio adalah ukuran seberapa baik antena menerima daya dari sumber (misalnya generator atau transmitter). Dalam sistem transmisi RF, tidak semua daya dari sumber bisa langsung diterima oleh antena—sebagian bisa dipantulkan kembali jika terjadi ketidakcocokan impedansi antara antena dan jalur transmisinya.

Nilai VSWR menunjukkan tingkat kecocokan ini. Semakin mendekati angka 1, maka semakin baik kinerjanya karena hampir tidak ada daya yang dipantulkan. Sebaliknya, nilai VSWR yang tinggi menunjukkan banyak energi yang terpantul dan tidak dimanfaatkan oleh antena.

Sebagai acuan umum:

VSWR = 1 : cocok sempurna (tidak ada pantulan sama sekali)

VSWR $\leq$ 2 : masih dianggap baik untuk sebagian besar sistem komunikasi

VSWR > 2 : menunjukkan adanya ketidaksesuaian impedansi yang signifikan

Dalam desain antena, menjaga agar nilai VSWR tetap rendah pada frekuensi kerja sangat penting, karena hal ini berkaitan langsung dengan efisiensi dan efektivitas pemancaran sinyal.

g. Metode dual-band mikrostrip antena

Antena dual-band adalah jenis yang dirancang untuk berkerja secara efektif pada dua frekuensi berbeda dalam satu struktur fisik. Dengan kemampuan ini, satu antena dapat digunakan

untuk menangani dua sistem atau layanan komunikasi yang berbeda secara bersamaan, misalnya jaringan GSM 900 MHz dan 1800 MHz.

Konsep dual-band menjadi sangat penting dalam dunia modern, terutama untuk perangkat yang membutuhkan konektivitas multi-frekuensi seperti ponsel, perangkat IoT, atau sistem energy harvesting. Dengan hanya satu antena, perangkat dapat berkomunikasi pada dua frekuensi, sehingga desain menjadi lebih ringkas dan hemat ruang.

Untuk mencapai karakteristik dual-band, beberapa teknik bisa digunakan, seperti:

Menyesuaikan dimensi patch

Menambahkan slot, stub, atau celah

Menggunakan elemen resonator tambahan, seperti Split Ring Resonator (SRR)

Tujuannya adalah menciptakan dua frekuensi resonansi yang berbeda dalam satu struktur antena.

h. Split Ring Resonator (SRR)

Split Ring Resonator adalah struktur logam berbentuk cincin yang memiliki celah (split) dan biasanya terdiri dari dua ring konsentris. SRR merupakan salah satu jenis metamaterial resonator yang dirancang untuk memberikan respon elektromagnetik tertentu pada frekuensi yang diinginkan.

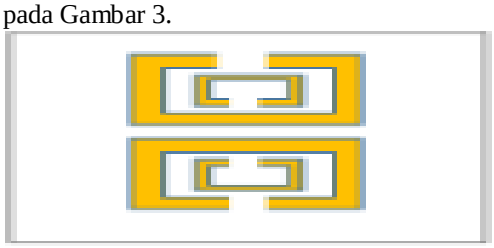
Fungsi utama SRR adalah untuk menghasilkan resonansi tambahan pada frekuensi tertentu tanpa harus memperbesar ukuran antena. Artinya, SRR bisa membantu antena bekerja pada frekuensi ganda (dual-band) atau bahkan memperluas bandwidth dengan desain yang tetap ringkas.

SRR bekerja dengan cara merespons medan magnet dari gelombang elektromagnetik yang melewatinya. Karena bentuk dan celahnya, SRR akan beresonansi pada frekuensi tertentu dan menciptakan medan lokal yang dapat memengaruhi karakteristik radiasi antena di sekitarnya.

Dalam desain antena, SRR sering digunakan untuk:

- Menambahkan frekuensi kerja kedua
- Meningkatkan gain dan efisiensi
- Mendukung aplikasi seperti energy harvesting dan miniaturisasi antena

Berikut bentuk design dari SRR dapat dilihat pada Gambar 3.

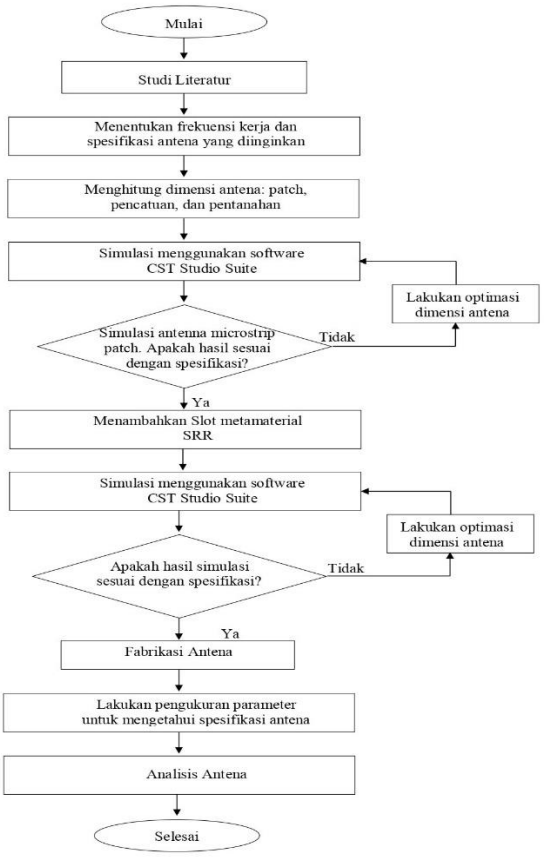


Gambar 3. Bentuk Split Ring Resonator

III. METODE

A. Alur Penelitian

Secara keseluruhan, tahapan perancangan sistem dalam penelitian ini dapat dijelaskan melalui diagram alur berikut.:



Gambar 4. Alur Penelitian

Penelitian ini dimulai dengan membaca literatur dan mencari referensi yang relevan. Selanjutnya, referensi yang telah diperoleh sebelumnya digunakan untuk menentukan spesifikasi antena. Selanjutnya, metode perancangan yang sesuai dengan spesifikasi tersebut dipilih. Setelah itu, persamaan yang diperoleh dari proses penelitian literatur digunakan untuk menghitung dimensi awal antena. Setelah memperoleh dimensi awal antena, langkah selanjutnya adalah merancang antena menggunakan software perancang. Setelah antena selesai di fabrikasi maka dilakukan proses pengukuran antena realisasi

B. Perrhitungan dimensi antena

Dalam tahap perancangan antena, penentuan spesifikasi teknis yang sesuai dengan kebutuhan aplikasi merupakan langkah awal yang harus dilakukan:

Tabel 1. Spesifikasi Antena

NO	Spesifikasi Antena	Keterangan
1	Frekuensi	900 Mhz & 1800 Mhz
2	S-11	< - 10
3	VSWR	< 2
4	Bahan substrate	FR-4 lossy (4.3)
5	Ketebalan substrate	4.3 mm

Tahap awal yang dilakukan dalam proses perancangan adalah menentukan dimensi patch, khususnya lebar patch, yang dihitung menggunakan Persamaan (1) dengan hasil sebagai berikut:

Frekuensi 1,8 Ghz

$$Wp = \frac{c}{2f_0\sqrt{\frac{\varepsilon_r}{2}}}$$

$$\frac{3x10^8}{2x1{,}8x10^9\sqrt{\frac{4.3+1)}{2}}}$$

= 0,0511913 m

= 511,913 mm

Setelah mendapatkan nilai Wp maka selanjutnya mencari Lp (Panjang patch) dengan menggunakan persamaan 2,3, 4, dan 5 sehingga didapatkan nilai sebagai berikut :

$$\varepsilon_{reff} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r + 1}{2}\left|\frac{1}{\sqrt{1+\frac{12h}{w}}}\right|$$

$$= \frac{4.3+1}{2} + \frac{4.3+1}{2}\left|\frac{1}{\sqrt{1+\frac{12(3.2)}{511.913}}}\right|$$

= 5,20587

$$L_{eff} = \frac{c}{2f_0\sqrt{\varepsilon_{reff}}}$$

$$= \frac{3\ x\ 10^8}{2\ x\ 1{,}8\ x\ 10^9\sqrt{5.20587}}$$

= 0,0365235 m

= 36,5235 mm

$$\Delta L = 0.412h\ \frac{(\varepsilon r+0.3)\left(\frac{w}{h}+0.264\right)}{(\varepsilon r-0.258)\left(\frac{w}{h}+0.8\right)}$$

$$= 0.412(3{,}2)\ \frac{(4.3+0.3)(159.9728125+0.264)}{(4.3-0.258)(159.9728125+0.8)}$$

= 1.4954

Lp = L_{eff} - 2ΔL

= 36.5235 – 2 x 1.4954

= 33.5327 mm

Lalu selanjutnya dapat dihitung Lg dan Wg (Panjang dan lebar ground plane) menggunakan persamaan 6, dan 7 :

Lg = 6h + L = 6 (3,2) + 33.5327= 52.7327 mm

Wg = 6h + W = 6 (3.2) + 511,913 = 531.113 mm

Frekuensi 0,9 Ghz

$$Wp = \frac{c}{2f_0\sqrt{\frac{\varepsilon_r}{2}}}$$

$$\frac{3x10^8}{2x0{,}9x10^9\sqrt{\frac{4.3+1)}{2}}}$$

= 0,102383 m

= 102,383 mm

$$\varepsilon_{reff} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r + 1}{2}\left|\frac{1}{\sqrt{1+\frac{12h}{w}}}\right|$$

$= \frac{4.3+1}{2} + \frac{4.3+1}{2}\left|\frac{1}{\sqrt{1+\frac{12(3,2)}{102,383}}}\right|$

= 4,90988

$L_{eff} = \frac{c}{2f_0\sqrt{\varepsilon_{reff}}}$

$= \frac{3\ x\ 10^8}{2\ x\ 0,9\ x\ 10^9\sqrt{4,90988}}$

= 0.0752165 m

= 75,2165 mm

$\Delta L = 0.412h\ \frac{(\varepsilon r+0.3)\left(\frac{w}{h}+0.264\right)}{(\varepsilon r-0.258)\left(\frac{w}{h}+0.8\right)}$

$= 0.412(3,2)\ \frac{(4.3+0.3)(31.9946875+0.264)}{(4.3-0.258)(31.9946875+0.8)}$

= 1,11945

Lp = L_{eff} - 2ΔL

= 75.2165 – 2 x 1,11945

= 72,9776 mm

Lalu selanjutnya dapat dihitung Lg dan Wg (Panjang dan lebar ground plane menggunakan persamaan 6 dan 7 :

Lg = 6h + L = 6 (3,2) + 75.2165 = 94.4165 mm

Wg = 6h + W = 6 (3,2) + 102.383 = 121.583 mm

Uuntuk menghitung saluran pencatu kita perlu menghitung Wf (lebar saluran mikrostrip) yang tergantung pada impedansi karakteristik (Z0) yang diinginkan. Perhitungan dilakukan menggunakan persamaan 12, dan 13 yang di lakukan sebagai berikut dengan impedansi bebean sebesar 50 Ohm:

$B = \frac{60\pi^2}{Z0\sqrt{\varepsilon r}}$

$= \frac{60\pi^2}{50\sqrt{4.3}}$

= 5.71145505

$Wf = \frac{2h}{\pi}\ \{ B - 1 - \ln(2B-1) + \frac{\varepsilon r-1}{2\varepsilon r}[\ln(B-1) + 0,39 - \frac{0.61}{\varepsilon r}]\}$

$Wf = \frac{2(.16)}{\pi}\ \{ 5.711455056 - 1 - \ln(2 \text{ x } 5.711455056 - 1) + \frac{4.3-1}{24.3}[\ln(B-1) + 0,39 - \frac{0.61}{\varepsilon r}]\}$

= 3.114273 mm

Setelah mendapatkan nilai – nilai perhitungan, nilai tersebut dapat digunakan untuk melakukan proses simulasi yang telah di lakukan pada tahap simulasi yang sudah dilakukan pada tahap berikutnya.

Berikut adalah spesifikasi yang telah digunakan pada simulasi:

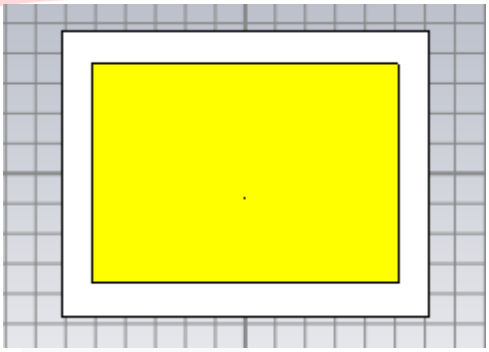
Perhitungan dimensi antenna

Tabel 2. Hasil perhitungan dimensi antenna awal

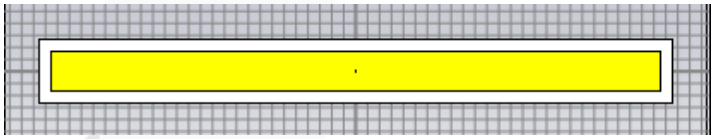
Frekuensi 0.9 Ghz		Frekuensi 1.8 Ghz	
Parameter	Nilai	Parameter	Nilai
Wp	102,383 mm	Wp	511,913 mm
Lp	72.9776 mm	Lp	33.5327 mm
Wg	121.583 mm	Wg	531.113 mm
Lg	94.4165 mm	Lg	52.7327 mm
B	5.71145505	B	5.71145505
Wf	3.114273 mm	Wf	3.114273 mm

C. Desain simulasi antena sebelum ditambahkan SRR

Simulasi dilakukan menggunakan aplikasi software CST studio 2019. Selain parameter – parameter yang telah di tentukan sebelumnya, parameter tambahan yang dapat di gunakan sebagai pendukung sudah juga dimasukan, yaitu pilihan di field monitor (E-field, H-field, surface current,dan farfield), range frekuensi (0,9 Ghz dan 1.8 Ghz), dan tipe pencatuan yang di pakai pada antenna yakni coaxial probe.



Gambar 5. Hasil perancangan simulasi antenna patch 900 Mhz



Gambar 6. Hasil perancangan simulasi antenna patch 1800 Mhz

Pada gambar 5 dan 6 dapat dilihat hasil desain antenna microstrip sesuai dengan perhitungan,.

Antenna microstrip dengan pencatuan coaxial probe merupakan desain antena sebagai dasarnya atau sebagai awal sebelum ditambahkan dengan SRR. Dari data ini didapatkan hasil dari nilai S11,VSWR, return loss, Gain, dan Polaradiasi

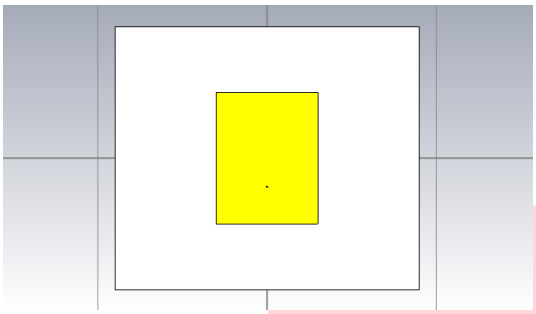
Tabel 3. Hasil simulasi antenna sebelum optimasi

Frekuensi 900 Mhz		Frekuensi 1800 Mhz	
Parameter	Hasil simulasi	Parameter	Hasil simulasi
S1.1	-0.19377	S1.1	-0.72654
VSWR	89.655	VSWR	23.928
Gain	-5.430	Gain	0.6160

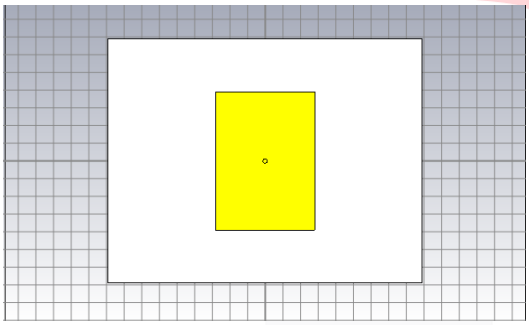
dikarenakan hasil desain perhitungan menghasilkan nilai yang kurang bagus. Sehingga perlu dilakukukan

optimasi dari desain yang mana optimasi ini menggunakan fitur parameter sweep pada CST studio 2019. Desain antenna ini berdasarkan perubahan yang dilakukan pada ukuran Wp (lebar patch), Lp (Panjang patch), Lg (panjang ground plane), Wg (lebar ground plane), dan Yf (letak pencatuan microstrip).

D. Hasil setelah optimasi



Gambar 7. Hasil antenna setelah di optimasi 900 Mhz



Gambar 8. Hasil antenna setelah di optimasi 1800 Mhz

Pada Gambar 7 dan Gambar 8 dapat dilihat hasil desain antenna microstrip sesuai dengan optimasi yang telah dilakukan dan desain menunjukan antenna tersebut dengan dimensi akhir yang di dapatkan tertera pada tabel 4 dan nilai-nilai yang didapatkan tertera pada tabel 5.

Tabel 4. Dimensi antenna setelah di optimasi

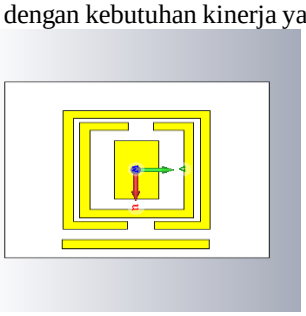
Frekuensi 900 Mhz		Frekuensi 1800 Mhz	
Parameter	Nilai	Parameter	Nilai
Wp	30 mm	Wp	28 mm
Lp	38.8 mm	Lp	39.1 mm
Wg	90 mm	Wg	89 mm
Lg	77.6 mm	Lg	69 mm
Yf	-17	Yf	0

Tabel 5. Hasil simulasi antenna setelah optimasi

Frekuensi 900 Mhz		Frekuensi 1800 Mhz	
Parameter	Hasil simulasi	Parameter	Hasil simulasi
S1.1	-18.04	S1.1	-23.072
VSWR	1.2865	VSWR	1.1518
Gain	-6.687	Gain	0.6160

E. Hasil perancangan simulasi yang sudah sitambahkan SRR

Desain antena pada Gambar 9 menunjukkan penerapan awal metode Split Ring Resonator (SRR). Namun, hasil awal tersebut belum memberikan performa yang optimal, sehingga diperlukan proses optimasi lebih lanjut. Setelah dilakukan penyesuaian parameter desain, diperoleh bentuk antenna yang lebih sesuai dengan kebutuhan kinerja yang diharapkan.



Gambar 9. Antena patch yang ditambah dengan SRR

Pada gambar 9 dapat dilihat hasil desain antenna yang sudah dirancang dengan metode yang digunakan. Lalu pada tabel 6 dapat dilihat antenna yang telah dioptimasi. Dan pada tabel 7 dapat dilihat hasil dari simulasi yang telah digunakan untuk mendapatkan hasil dari S11,VSWR, polaradiasi.

Tabel 6. Dimensi antenna patch microstrip dual-band yang ditambah (SRR)

Parameter	Nilai
Wp	74 mm
Lp	45 mm
Wg	222 mm
Lg	270 mm
Innerpin	0.7 mm
Outerpin	2.35 mm

Pada Tabel 7 hasil yang di dapatkan bahwa Antena menunjukkan performa yang baik pada frekuensi 900 MHz dengan nilai S11 sebesar -17,55 dB dan VSWR 1,31, menandakan kecocokan impedansi yang cukup ideal. Pada frekuensi 1800 MHz, performa sedikit menurun dengan S11 -11,07 dB dan VSWR 1,78, namun masih dalam batas dapat diterima. Bandwidth yang diperoleh cukup lebar, yaitu 30 MHz pada 900 MHz dan 60 MHz pada 1800 MHz, sehingga antena ini mampu bekerja secara efektif pada kedua frekuensi yang ditargetkan. Sehingga desain ini layak untuk difabrikasi dan diujikan lebih lanjut.

Tabel 7. Hasil simulasi antenna Patch Mikrostrip Dual-Band yang ditambah (SRR)

Parameter	Hasil simulasi
S1.1 (900 Mhz)	-17.55
S1.1 (1800 Mhz)	-11.065
VSWR (900 Mhz)	1.3057
VSWR (1800 Mhz)	1.7788
Bandwith (900 Mhz)	30 Mhz
Bandwith (1800 Mhz)	60 Mhz

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Fabrikasi Antena

Berdasarkan hasil fabrikasi antena yang ditambahkan SRR yang telah di fabrikasi dapat dilihat pada Gambar 10.

(A) (B)

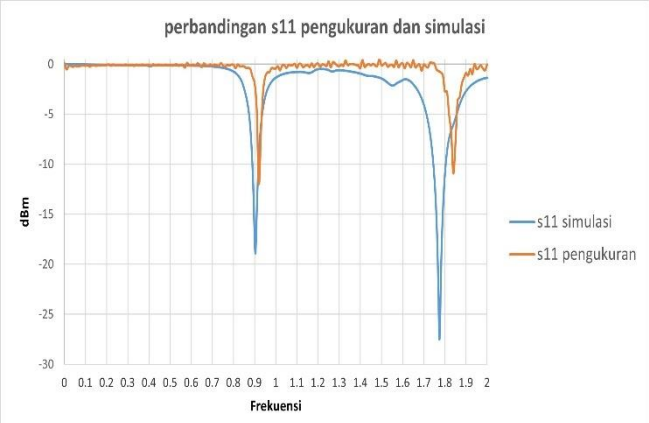
Gambar 10. tampak antena depan (A), dan tampak antena belakang (B)

B. Hasil dan Analisis

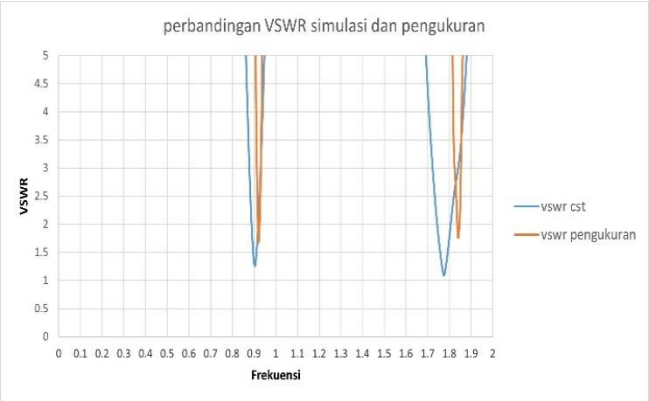
Analisis dilakukan terhadap antena yang ditambahkan SRR. pada simulasi dengan antena yang ditambahkan SRR ,yang telah di fabrikasi dan sudah dilakukan pengukuran. Analisis ini berguna untuk mengetahui apakah parameter antena telah bekerja dengan spesifikasi yang diinginkan dan melihat perbandingan antara simulasi dan pengukuran. Dari pembuatan analisa ini diharapkan dapat ditarik kesimpulan dari jurnal ini.

Perbandingan parameter antena simulasi dengan antena yang sudah di fabrikasi tertera pada tabel 8. Parameter kerja antena dapat dikatakan sudah sesuai dengan spesifikasi yang diinginkan, jika pada frekuensi kerja yang telah ditetapkan didapatkan hasil S-parameter < -10 dB, VSWR < 2, dan Bandwith.

Pada gambar 11 merupakan perbandingan S11 antena yang ditambahkan SRR antara pengukuran dan simulasi yang telah diplotkan. Untuk garis yang berwarna orange merupakan hasil pengukuran dari VNA dan garis biru merupakan hasil simulasi dari CST studio 2019. Dapat dilihat dari hasil S-parameter pada frekuensi kerja 900 mhz terdapat perubahan dari hasil simulasi dengan nilai fabrikasi. Besar dari perubahan tersebut sebesar 9 dB dengan bandwith 40 mhz, dan pada frekuensi 1800 mhz terdapat perubahan sebesar 13 dB dengan bandwith 50 mhz.



Gambar 11. Perbandingan S1.1 pengukuran dan simulasi



Gambar 12. Perbandingan VSWR pengukuran dan simulasi

Gambar 12. di atas memperlihatkan perbandingan nilai VSWR antara hasil simulasi menggunakan CST Studio Suite dan hasil pengukuran langsung terhadap antena dual-band. Parameter VSWR digunakan untuk menilai sejauh mana pencocokan impedansi antena terhadap saluran transmisi, di mana nilai mendekati 1 menunjukkan kinerja optimal. Pada frekuensi 900 MHz, nilai VSWR hasil simulasi sebesar 1,3 dan hasil pengukuran sebesar 1,7. Sementara pada frekuensi 1800 MHz, hasil simulasi menunjukkan nilai 1,1 dan pengukuran sebesar 1,8. Kedua nilai pengukuran masih berada di bawah ambang batas VSWR < 2, yang menandakan performa pencocokan masih baik. Perbedaan kecil antara simulasi dan pengukuran merupakan hal yang wajar dan dapat disebabkan oleh toleransi fabrikasi dan kondisi lingkungan saat pengujian. Secara umum, hasil ini menunjukkan bahwa antena dual-band yang dirancang berfungsi dengan baik pada kedua frekuensi kerja yang ditargetkan.

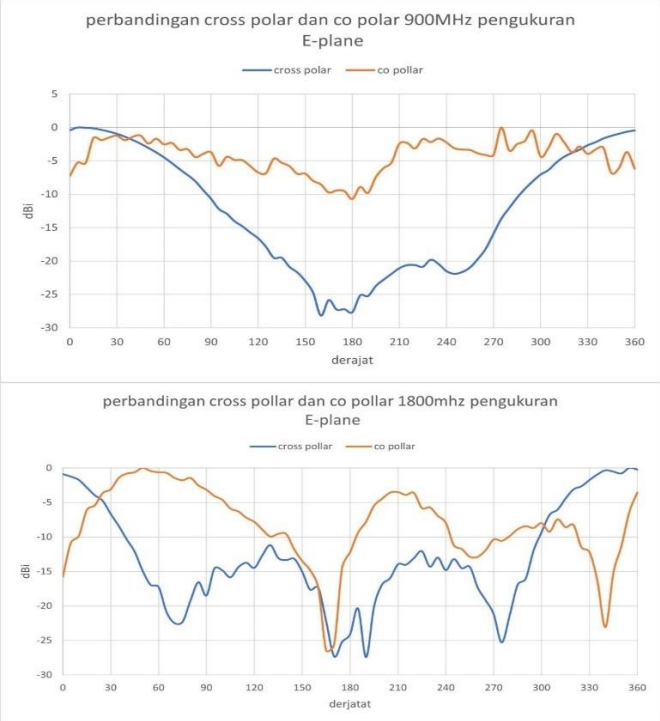
Berdasarkan data pada tabel 8 perbandigan hasil simulasi dan pengukuran, antena yang dirancang untuk keperluan RF energy harvesting menunjukkan performa yang cukup baik. Nilai S11 dan bandwidth berada dalam rentang yang sesuai. Hal ini menunjukkan bahwa antena mampu menerima sinyal dengan efisien, sehingga layak diterapkan untuk aplikasi RF energy harvesting, meskipun masih terdapat beberapa perbedaan teknis yang dapat diperbaiki pada pengembangan selanjutnya.

Tabel 8. Perbandingan simulasi dan pengukuran antena patch yang ditambahkan SRR

parameter	simulasi	pengukuran	perubahan
S11 900 mhz	-17,551	-11,84	5,711 dB (lebih besar rugi pantul)
S11 1800 mhz	-11,049	-16,42	-5,371 dB (lebih baik rugi pantul)
Bandwith 900 mhz	30 mhz	40 mhz	10 mhz (lebih lebar)

Bandwith 1800 mhz	60 mhz	50 mhz	-10 mhz (lebih sempit)
VSWR 900 mhz	1,3	1,7	0,4 (meningkat, performa menurun)
VSWR 1800 mhz	1,1	1,8	0,7 (meningkat, performa menurun)

C. Polarisasi



Gambar 13. Pengukurkran perbandingan pola radiasi sebagai hasil polarisasi antena

Pada pengukuran pola radiasi antena, dilakukan perbandingan antara komponen co-polarisasi dan cross-polarisasi pada frekuensi 900 MHz dan 1800 MHz dalam bidang E-plane. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa pada frekuensi 900 MHz, level daya co-polarisasi secara konsisten lebih tinggi dibandingkan dengan cross-polarisasi di seluruh arah sudut. Cross-polarisasi bahkan mencapai nilai minimum sekitar -30 dB, menandakan bahwa antena memiliki kemurnian polarisasi linier yang sangat baik pada frekuensi ini.

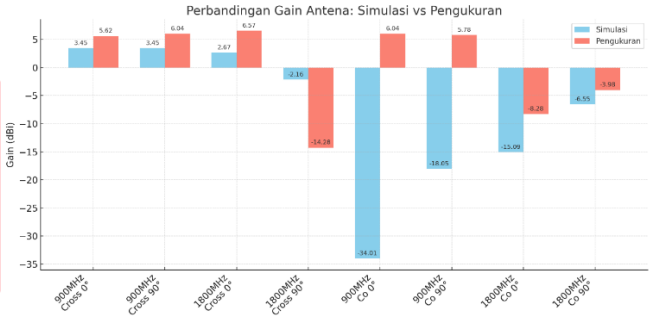
Sementara itu, pada frekuensi 1800 MHz, pola radiasi menunjukkan adanya peningkatan level cross-polarisasi di beberapa arah, bahkan mendekati nilai co-polarisasi di sudut sekitar 180° dan 300°. Hal ini mengindikasikan penurunan kualitas polarisasi linier, karena adanya kebocoran sinyal dalam arah cross polar.

Dalam sistem RF energy harvesting, efisiensi penangkapan daya sangat bergantung pada seberapa sejajar polarisasi antena dengan gelombang RF yang datang. Polarisasi linear yang kuat meminimalkan kerugian arah (polarization loss), sehingga mampu menyerap energi lebih efektif.

Pada 900 MHz, kemurnian polarisasi yang tinggi memastikan antena dapat menerima dan memanfaatkan energi RF secara optimal, ideal untuk perangkat IoT yang memerlukan sumber daya mandiri dari lingkungan.

Sebaliknya, pada 1800 MHz, munculnya komponen cross-polarisasi mengindikasikan potensi penurunan efisiensi penyerapan daya, sehingga perlu penyesuaian desain atau penerapan teknik matching tambahan jika tetap ingin digunakan untuk RF harvesting.

D. Analisis perbandingan Gain dan pengaruh struktur SRR



Gambar 14. Perbandingan simulasi dan pengukuran Gain antenna patch yang ditambahkan SRR

Penelitian ini menunjukkan bahwa penambahan struktur Split Ring Resonator (SRR) di atas substrat, yang ditempatkan mengelilingi patch antena, secara signifikan memengaruhi performa radiasi, khususnya pada parameter gain. Meskipun SRR tidak tertanam dalam substrat, penempatannya tetap menghasilkan efek resonansi elektromagnetik yang kuat, karena posisi tersebut memungkinkan interaksi langsung antara medan magnet patch dan struktur SRR.

Hasil pengukuran gain menunjukkan adanya perbedaan mencolok dibandingkan hasil simulasi, terutama pada polarisasi co-polar. Sebagai contoh, pada frekuensi 900 MHz co-polar sudut 0°, gain meningkat dari –34,01 dBi (simulasi) menjadi 6,04 dBi (pengukuran), dengan perubahan sebesar 40,05 dB. Ini mengindikasikan bahwa SRR berperan penting dalam meningkatkan efisiensi radiasi, serta memperbaiki pencocokan impedansi antena terhadap medan elektromagnetik sekitar.

Kondisi tersebut juga menunjukkan potensi terbentuknya sifat permeabilitas negatif ($\mu < 0$) pada frekuensi resonansi tertentu, yang merupakan ciri khas dari material metamaterial. Secara teori, resonansi lokal yang ditimbulkan oleh SRR dapat menyebabkan distribusi arus permukaan yang lebih terkonsentrasi dan penguatan arah radiasi tertentu, sehingga menghasilkan gain yang lebih tinggi daripada struktur tanpa SRR.

Tabel 9. perbandingan gain antena uji dan simulasi

Frekuensi	Simulasi	Pengukuran	Perubahan
900 mhz (cross polar 0◦)	3,45 dBi	5,62 dBi	2,17 dB
900 mhz (cross polar 90◦)	3,45 dBi	6,04 dBi	2,59 dB
1800 mhz (cross polar 0◦)	2,67 dBi	6,57 dBi	3,9 dB

1800 mhz (cross polar 90◦)	-2,16 dBi	-14,28 dBi	-12,12 dB
900 mhz (copolar 0◦)	-34,01 dBi	6,04 dBi	40,05 dB
900 mhz (copolar 90◦)	-18,05 dBi	5,78 dBi	23,78 dB
1800 mhz (copolar 0◦)	-15,09 dBi	-8,28 dBi	6,81 dB
1800 mhz (copolar 90◦)	-6,55 dBi	-3,98 dBi	2,57 dB

V. KESIMPULAN

Berdasarkan rangkaian kegiatan mulai dari studi literatur, perancangan antena menggunakan perangkat lunak simulasi CST Studio Suite, proses fabrikasi, hingga pengukuran menggunakan Vector Network Analyzer (VNA), maka kesimpulan dari penelitian ini dapat dirangkum sebagai berikut:

1. Antena mikrostrip yang dirancang mampu bekerja pada dua frekuensi utama, yaitu 900 MHz dan 1800 MHz, sesuai dengan target yang diinginkan untuk sistem pengisian daya berbasis gelombang radio (RF energy harvesting). Hasil simulasi menunjukkan nilai S11 sebesar -17.55 dB (900 MHz) dan -11.065 dB (1800 MHz). Sedangkan hasil pengukuran menunjukkan nilai S11 sebesar -11.84 dB (900 MHz) dan -16.42 dB (1800 MHz). Nilai-nilai ini menunjukkan bahwa antena memiliki kemampuan penerimaan sinyal yang baik dengan pantulan daya yang rendah.

2. Parameter VSWR yang diperoleh, yaitu sekitar 1.3–1.8, menunjukkan bahwa antena memiliki pencocokan impedansi yang cukup baik. Artinya, sebagian besar daya dari gelombang RF dapat diserap antena, dan hanya sedikit yang terpantul kembali ke sumber.

3. Lebar pita frekuensi (bandwidth) yang dihasilkan juga cukup memadai untuk mendukung stabilitas penerimaan sinyal, yaitu antara 30–60 MHz (simulasi) dan 40–50 MHz (pengukuran). Ini berarti antena dapat bekerja dalam rentang frekuensi yang cukup luas dan tidak mudah terganggu oleh fluktuasi frekuensi di lingkungan.

4. Penambahan struktur Split Ring Resonator (SRR) terbukti meningkatkan performa antena secara keseluruhan, terutama dalam mendukung pencapaian resonansi ganda (dual-band), menambah bandwidth, serta Gain.

REFERENSI

[1]. K. Katzis and H. Ahmadi, “Challenges Implementing Internet of Things (IoT) Using Cognitive Radio Capabilities in 5G Mobile Networks.” *Internet of Things (IoT) in 5G Mobile Technologies*, pp. 55-76, 2016, doi: 10.1007/978-3-319-30913-2_4.

[2]. M. N. R. Rajab, “Rectifier Design in RF Energy Harvesting System with Television Antenna at UHF Frequency.” *Jurnal Jartel: Jurnal Jaringan Telekomunikasi*, vol. 9, no. 4, pp. 25-30, 2019, doi: 10.33795/jartel.v9i4.143.

[3]. R. D. Amna, I. Suandi, and N. Nasri, “Rancang Bangun Antena Mikrostrip Dual Band Patch Segi Empat pada Frekuensi 1,5 GHz Dan 2,4 GHz.” *Jurnal Litek : Jurnal Listrik Telekomunikasi Elektronika*, vol. 17, no. 1, p. 1, 2020, doi: 10.30811/litek.v17i1.1780.

[4]. M. P. Praja, “Bumbung Gelombang Lingkaran Susun Untuk Aplikasi RF Energy Harvesting pada GSM 1800 MHz.” *Jurnal Fokus Elektroda : Energi Listrik, Telekomunikasi, Komputer, Elektronika dan Kendali)*, vol. 6, no. 2, p. 135, 2021, doi: 10.33772/jfe.v6i2.18212.

[5]. T. Firmansyah, S. Purnomo, F. Fatonah, and T. H. Fajar Nugroho, “Antena Mikrostrip Rectangular Patch 1575,42 MHz dengan Polarisasi Circular untuk Receiver GPS.” *Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknologi Informasi (JNTETI)*, vol. 4, no. 4, 2016, doi: 10.22146/jnteti.v4i4.170.

[6]. M. N. R. Rajab, “Rectifier Design in RF Energy Harvesting System with Television Antenna at UHF Frequency.” *Jurnal Jartel: Jurnal Jaringan Telekomunikasi*, vol. 9, no. 4, pp. 25-30, 2019, doi: 10.33795/jartel.v9i4.143.

[7]. R. D. Amna, I. Suandi, and N. Nasri, “Rancang Bangun Antena Mikrostrip Dual Band Patch Segi Empat pada Frekuensi 1,5 GHz Dan 2,4 GHz.” *Jurnal Litek : Jurnal Listrik Telekomunikasi Elektronika*, vol. 17, no. 1, p. 1, 2020, doi: 10.30811/litek.v17i1.1780.

[8]. Z. Liang, “RF energy harvesting : powering internet of things.” doi: 10.14711/thesis-991012980221103412.

[9]. K. Katzis and H. Ahmadi, “Challenges Implementing Internet of Things (IoT) Using Cognitive Radio Capabilities in 5G Mobile Networks.” *Internet of Things (IoT) in 5G Mobile Technologies*, pp. 55-76, 2016, doi: 10.1007/978-3-319-30913-2_4.

[10]. M. N. R. Rajab, “Rectifier Design in RF Energy Harvesting System with Television Antenna at UHF Frequency.” *Jurnal Jartel: Jurnal Jaringan Telekomunikasi*, vol. 9, no. 4, pp. 25-30, 2019, doi: 10.33795/jartel.v9i4.143.

[11]. R. Rani, P. Kaur, and N. Verma, “Metamaterials and Their Applications in Patch Antenna: A Review.” *International Journal of Hybrid Information Technology*, vol. 8, no. 11, pp. 199-212, 2015, doi: 10.14257/ijhit.2015.8.11.17.

[12]. R. D. Amna, I. Suandi, and N. Nasri, “Rancang Bangun Antena Mikrostrip Dual Band Patch Segi Empat pada Frekuensi 1,5 GHz Dan 2,4 GHz.” *Jurnal Litek : Jurnal Listrik Telekomunikasi Elektronika*, vol. 17, no. 1, p. 1, 2020, doi: 10.30811/litek.v17i1.1780.

[13]. V. Monebhurrun, “Revision of IEEE Standard 145-2013: IEEE Standard for Definitions of Terms for

Antennas [Stand on Standards].” *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 62, no. 3, pp. 117-117, 2020, doi: 10.1109/map.2020.2983956.

[14]. D. M. Pozar, "Microstrip antennas," in Proceedings of the IEEE, vol. 80, no. 1, pp. 79-91, Jan. 1992.

[15]. I. Singh, V. S. Tripathi, and S. Tiwari, “Dual-Band Microstrip Patch Antenna Miniaturization Using Metamaterial.” *Journal of Engineering*, vol. 2013, pp. 1-5, 2013, doi: 10.1155/2013/928078.

[16]. I. Singh, V. S. Tripathi, and S. Tiwari, “Dual-Band Microstrip Patch Antenna Miniaturization Using Metamaterial.” *Journal of Engineering*, vol. 2013, pp. 1-5, 2013, doi: 10.1155/2013/928078.

[17]. M. I. Setiawan, J. Endri, and S. Sarjana, “Rancang Bangun Antena Mikrostrip Path Rectangular pada Frekuensi 900 MHz untuk Aplikasi GSM.” *Respati*, vol. 14, no. 2, 2019, doi: 10.35842/jtir.v14i2.287.

[18]. I. Singh, V. S. Tripathi, and S. Tiwari, “Dual-Band Microstrip Patch Antenna Miniaturization Using Metamaterial.” *Journal of Engineering*, vol. 2013, pp. 1-5, 2013, doi: 10.1155/2013/928078.