

**PERANCANGAN DAN REALISASI *CIRCULARLY POLARIZED ANTENNA* UNTUK APLIKASI
*WIRELESS ENERGY HARVESTING***

***DESIGN AND REALIZATION CIRCULARLY POLARIZED ANTENNA FOR WIRELESS ENERGY
HARVESTING***

Nurina Hasanah¹, Zulfi², Yuyu Wahyu³

^{1,2}Prodi S1 Teknik Telekomunikasi, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom

³Laboratorium Pusat Penelitian Elektronika dan Telekomunikasi (PPET)-Lembaga Ilmu
Pengetahuan Indonesia (LIPI) Bandung

nurinahasanah@student.telkomuniversity.ac.id¹, zulfi@telkomuniversity.ac.id²,

yuyuwahyusr@gmail.com³

Abstrak

Sistem *RF energy harvesting* bertujuan menangkap sinyal RF sebanyak mungkin untuk diubah menjadi sinyal DC. Namun, polarisasi sinyal RF sangat sulit untuk diprediksi. Pada Tugas Akhir ini untuk mengatasi masalah tersebut, digunakan antena penerima yang memiliki polarisasi sirkular. Dengan menggunakan antena penerima dengan polarisasi sirkular, rugi-rugi yang disebabkan ketidaksesuaian polarisasi dapat diminimalisir dan sinyal RF yang dapat ditangkap oleh antena menjadi optimal.

Pada Tugas Akhir ini, teknik yang digunakan untuk menghasilkan polarisasi sirkular pada antena mikrostrip rektanguler adalah membangkitkan dua mode arus yang tegak lurus dengan amplitudo yang sama dan berbeda fasa 90°. Perbedaan fasa 90° dapat diperoleh dengan mengatur selisih panjang saluran pencatutan sebesar $\lambda/4$.

Berdasarkan hasil dari simulasi menggunakan software CST 2019 didapatkan nilai return loss pada port 1 -24.287 dB pada port 2 -22.997 dB, nilai VSWR pada port 1 1.830 pada port 2 1.822, dan nilai gain pada port 1 adalah 3.4 dBi pada port 2 1.7dBi. Untuk hasil pengukuran pada antena realisasi adalah return loss port 1 -17.335 dB pada port 2 -20.309 dB, nilai VSWR pada port 1 adalah 1.329 pada port 2 1.218 dan pada nilai gain adalah 3.157 dBi.

Kata Kunci: *RF energy harvesting, circular polarization antenna, microstrip patch antenna.*

Abstract

In this final project, to solve this problem, a circular polarized receiver antenna is used. By using circular polarization receiving antennas, the losses caused by polarization mismatches can be minimized and the RF signal that can be picked up by the antenna is optimal.

In this final project, the technique used to produce circular variations in rectangular microstrip antennas is to generate two perpendicular current modes with the same amplitude and 90 ° phase difference. A 90 ° phase difference can be obtained by coaching a ration length difference of $\lambda / 4$.

Based on the results of the simulation using CST 2019 software, the return loss value on port 1 - 24,287 dB on port 2 -22,997 dB, the VSWR value on port 1 1,830 on port 2 is 1,822, and the gain value on port 1 is 3.4 dBi on port 2 1.7dBi . For the measurement results on the actual antenna is a return loss port 1 -17.335 dB on port 2 -20.309 dB, the VSWR value on port 1 is 1.329 on port 2 1.218 and the gain value is 3.157 dBi.

Keywords: *RF energy harvesting, circular polarization antenna, microstrip patch antenna.*

1. Pendahuluan

perancangan antena mikrostrip array dengan menggunakan konfigurasi dual polarisasi dengan catuan Transmission feed line yang digunakan untuk aplikasi harvesting. Perancangan dalam membuat Antena susunan 2x2 mikrostrip patch persegi dengan catuan Transmission fed line ini dimaksudkan agar Antena ini dapat bekerja sesuai dengan spesifikasi yang telah ditentukan.

Pemanenan energi dapat dilakukan pada energi yang bersumber dari alam, seperti sinar matahari, angin, panas bumi dan gelombang laut. Namun energi-energi tersebut tidak tersedia sepanjang waktu. Gelombang elektromagnetik tersedia sepanjang waktu, karena sumber energi gelombang elektromagnetik seperti base transceiver station (BTS) selalu aktif dan hampir selalu ada di kota-kota besar di seluruh dunia. Oleh karena itu, energi gelombang elektromagnetik memiliki potensi yang lebih baik untuk pemanenan energi.

Tugas Akhir ini mengusulkan antena penerima yang memiliki polarisasi sirkular. Keuntungan dari antena yang memiliki polarisasi sirkular adalah antena tetap dapat menerima sinyal RF meskipun polarisasi dari sinyal RF tidak diketahui.

Dalam jurnal tugas akhir ini dilakukan perancangan dan realisasi *dual-circularly polarized antenna*.

Antena yang diusulkan adalah antena mikrostrip bentuk rektanguler dengan bekerja pada frekuensi 1,8 GHz.

2. Dasar Teori

Polarisasi antenna adalah gelombang yang di transmisikan atau diradiasikan oleh antenna [1]. Arah gain maksimum apabila arah tidak ditentukan . Gelombang yang berjalan pada suatu titik sebagai fungsi waktu digambarkan dalam bentuk vektor medan \mathbf{E} [3]. Terdapat tiga jenis polarisasi antenna, yaitu polarisasi *circular* (melingkar), *linier* (linier), *eliptical* (elips).

Polarisasi sirkular adalah gelombang yang berubah menurut waktu maka gelombang tersebut akan terpolarisasi melingkar pada titik tertentu dalam ruang jika vector medan listrik atau magnet pada titik itu melacak lingkaran sebagai fungsi waktu.

Polarisasi mekingkar terdapat dua jenis yaitu, *Left Hand Circular Polarization* (LHCP) dan *Right Hand Circular Polarization* (RHCP). LHCP terjadi pada saat $\delta = +\pi / 2$, dan sebaliknya RHCP terjadi pada saat $\delta = -\pi / 2$ [3].

Antena mikrostrip *patch* rektangular dengan frekuensi kerja 1,8 GHz, adapun spesifikasi antenna yang ditentukan adalah:

Spesifikasi antenna Microstrip Dual polarisasi yang akan dirancang :

- Desain antenna : Microstrip Dual polarisasi
- Sifat antenna : Receiver
- Frekuensi kerja : 1,8 GHz
- Impedansi : 50 Ohm
- VSWR : ≤ 2
- Pola radiasi : Directional
- Polarisasi : dual polarisasi (vertikal dan horizontal)
- Gain : ≥ 1 dB
- Bahan : FR-4

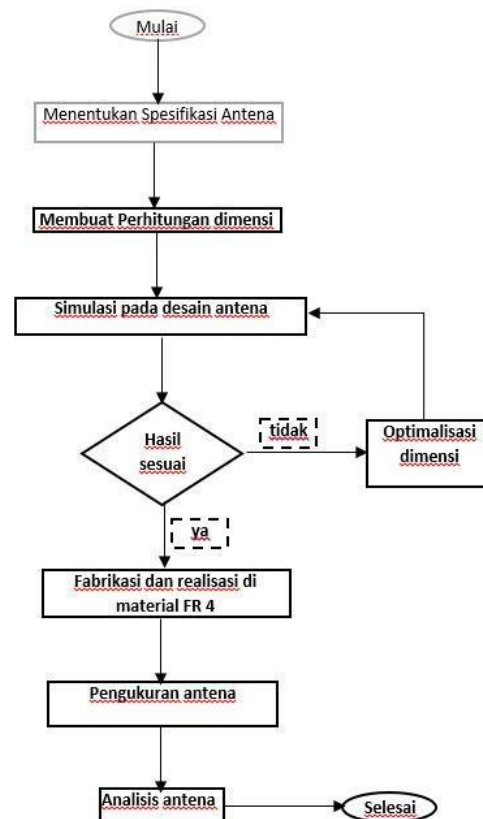
Pemilihan bahan FR-4 disebabkan karena bahan ini dapat bekerja secara optimal untuk frekuensi tinggi, adapun spesifikasi bahan FR-4 ini adalah :

- Permittivitas : 4,3-4,8
- Tinggi Substrat : 1.6 mm
- Tinggi Tembaga: 0.035 m

Pada system wireless energy harvesting, untuk menghasilkan tegangan DC yang relatif besar, amplitudo sinyal yang ditangkap oleh antenna harus sebesar mungkin. Ini bisa diperoleh jika menggunakan antenna dengan gain yang besar. Salah satu cara untuk mendapatkan gain yang besar adalah dengan menyusun beberapa antenna tunggal menjadi antenna array. Karena antenna microstrip tunggal hanya menghasilkan gain yang kecil, maka pada penelitian ini digunakan antenna array yang terdiri dari susunan dua antenna microstrip tunggal.

3. Perancangan

Pada pembuatan tugas akhir ini dilakukan dengan melakukan perancangan dan langkah demi langkah dari awal hingga analisis akhir perancangan, yang sesuai dengan diagram alir gambar 1. Langkah perancangan dimulai dengan studi literatur yang akan dijadikan referensi untuk penentuan dari antenna yang akan dirancang. Setelah spesifikasi antenna telah ditentukan, selanjutnya dilakukan peninjauan parameter-parameter untuk memahami perilaku dan karakteristik dasar dari antenna. Hal ini sangat membantu dalam hal perancangan karena mempermudah langkah optimasi menggunakan simulator antenna. Setelah hasil dari optimasi didapatkan sesuai spesifikasi, selanjutnya dilakukan fabrikasi dan pengukuran untuk validasi. Jika hasil pengukuran tidak valid, maka dilakukan proses optimasi kembali menggunakan simulator antenna dan begitu seterusnya. Jika hasil pengukuran sudah valid, maka selanjutnya dilakukan analisis terhadap antenna yang telah berhasil dirancang.



Gambar 1. Diagram alir

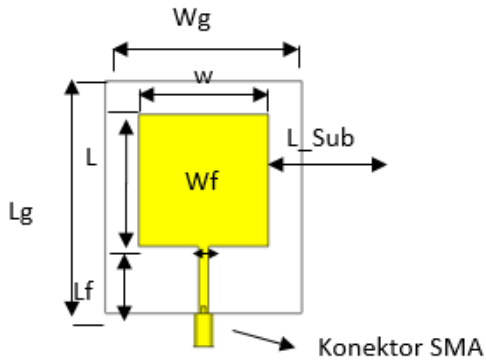
3.1 Antena Simulasi

Simulasi antenna dibuat menggunakan CST 2019. Substrat yang digunakan adalah FR-4 dengan nilai permittivitas 4,3-4,8 dan tinggi substrat 1.6 mm.

3.1.1. Simulasi Antenna Patch Rectangular

Hasil simulasi antenna singel patch sebelum

penambahan array, berdasarkan hasil perhitungan yang didapat pada tabel 1, diperoleh perancangan seperti gambar 3.1.

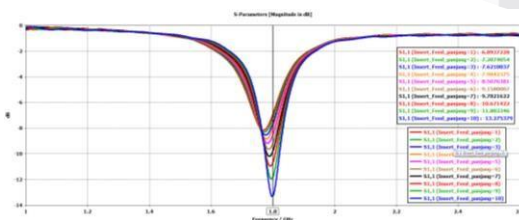


Gambar 3.1 Single patch desain bedasarkan hitungan awal.

Berdasarkan hasil simulasi pada gambar 3.1 menghasilkan nilai dari VSWR frekuensi tengah 1.,8 GHz masih jauh diatas batas yang diinginkan yaitu ≤ 2 . Tabel 3.1. Dimensi desain antenna rectangular 1 elemen

Dimensi Antena Mikrostrip	Parameter	Nilai
Lebar Patch	W	31,835 mm
Panjang Patch	L	31,835 mm
Lebar Ground Plane	Wg	51,853 mm
Panjang Ground Plane	Lg	89,179 mm
Lebar Feedline	Wf	3,05 mm
Panjang Feedline	Lf	19,863 mm
Jarak Substrat	Sub L	10 mm
Tebal Substrat	H	1,6 mm
Tebal Ground Plane	T	0,035 mm
Permivitas Substrat	ϵ_r	4,4

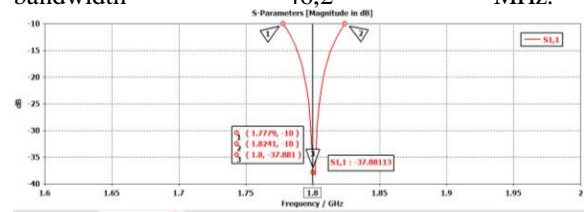
Tahapan berikutnya dilakukan optimalisasi dengan cara menambahkan slot pada sisi kiri dan kanan saluran transmisi.



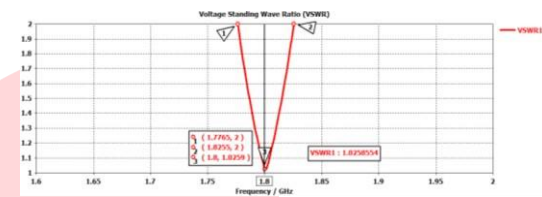
Gambar 3.2 Optimalisasi panjang penambahan insert slot pada kiri dan kanan saluran.

Hasil simulasi grafik *return loss* dari optimalisasi antenna dapat dilihat pada gambar 3.3, untuk gambar grafik VSWR dapat dilihat pada gambar 3.4 dan untuk impedansi yang dihasilkan dapat dilihat pada gambar 3.5. hasil return los

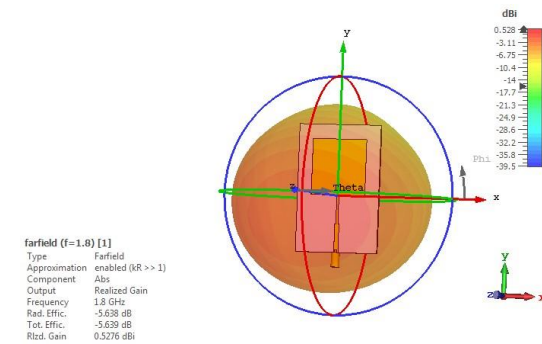
menunjukkan hasil yang paling optimum, dengannilai return loss -37,081 dB, dengan banwidit dibatasi -10 dB dari frekuensi 1,7779 GHz sampai dengan 1,8241 GHz. Dengan lebar bandwidth 46,2 MHz.



Gambar 3.3 Grafik hasil *return loss* persegi pada patch 1 saluran



Gambar 3.4 Grafik hasil VSWR persegi pada patch 1 saluran.



Gambar 3.6 Grafik hasil gain dan polarisasi persegi pada patch 1 saluran.

Dapat dilihat bahwa hasil yang didapatkan pada gambar 3.6, gain yang dihasilkan sebesar 0,5276.

3.1.2. Simulasi Antena Patch Rectangular dengan dua saluran transmisi

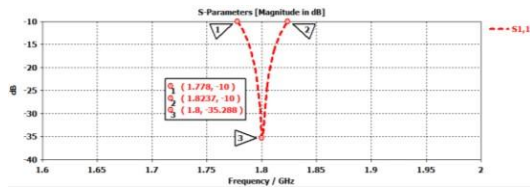
Pada tahap ini dibuat struktur antenna single patch dengan menggunakan dua buah saluran transmisi yang dipasangkan berbeda sisi.

Tabel 3.2. Dimensi desain antenna persegi patch 1 elemen dan 2 saluran.

Dimensi Antena Mikrostrip	Parameter	Nilai
Lebar Patch	W	38,85 mm
Panjang Patch	L	38,85 mm
Lebar Ground Plane	Wg	88,713 mm

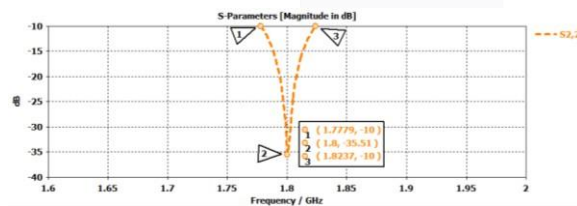
Panjang Ground Plane	L_g	88,713 mm
Lebar Feedline (70,71 Ω)	W_{f1}	1,56 mm
Panjang Feedline (70,71 Ω)	L_{f1}	19,863 mm
Lebar Feedline (50 Ω)	W_{f2}	3,05 mm
Panjang Feedline (50 Ω)	H	19,863 mm
Jarak Substrate	t	10 mm
Tebal Substrat	ϵ_r	1,6 mm

Hasil simulasi grafik dari optimalisasi antena dual polarisasi dapat dilihat pada grafik dibawah.



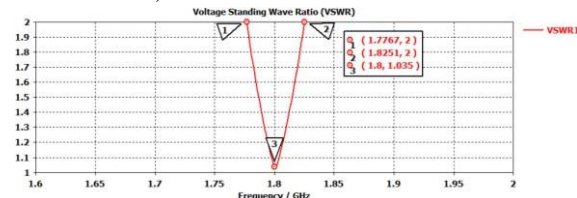
Gambar 3.7. Grafik hasil Return loss persegi pada patch, 2 saluran port 1.

Dapat dilihat hasil yang paling optimum, dengan nilai return loss -35,288 dB yang ditunjukkan pada marker 3, dengan bandwidth dibatasi -10 dB yang ditunjukkan pada marker 1 dan 2 dari frekuensi 1,778 GHz sampai dengan 1,8237 GHz. Dengan lebar bandwidth 45,7 MHz.



Gambar 3.8. Grafik hasil Return loss persegi pada patch, 2 saluran port 2

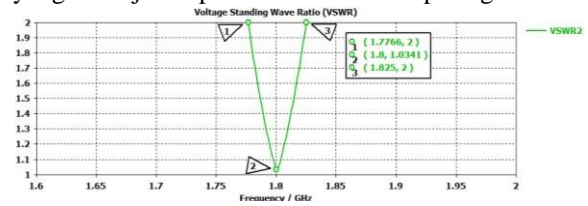
Hasil yang paling optimum, dengan nilai return loss -35,51 dB yang ditunjukkan pada marker 2, dengan bandwidth dibatasi -10 dB yang ditunjukkan pada marker 1 dan 3 dari frekuensi 1,7779 GHz sampai dengan 1,8237 GHz. Dengan lebar bandwidth 45,8 MHz.



Gambar 3.9. Grafik hasil VSWR persegi pada patch, 2 saluran port 1

Hasil simulasi port 1 untuk grafik VSWR pada gambar 3.9 menunjukkan bahwa interpretasi return loss dalam bentuk VSWR, dimana nilai VSWR pada frekuensi 1,8 GHz adalah sebesar 1,035 yang di tunjukan pada marker 2, yaitu

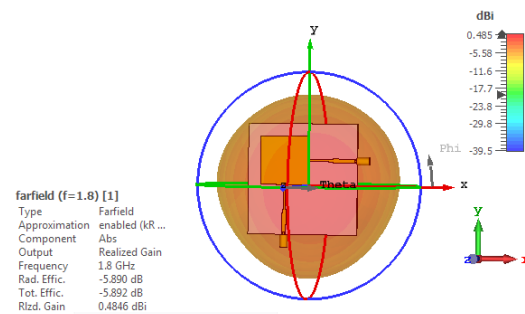
dibawah standart batas yang ditentukan, yaitu 2 yang di tunjukan pada marker 1 dan 3 pada grafik.



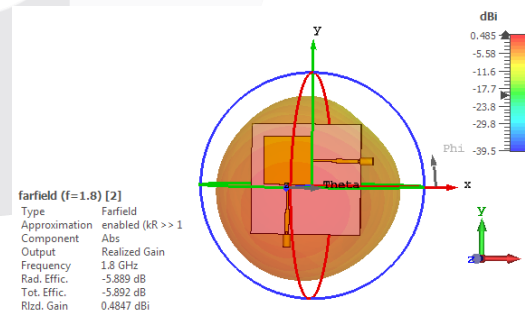
Gambar 3.10. Grafik hasil VSWR persegi pada patch, 2 saluran port 2

Hasil simulasi port 2 untuk grafik VSWR pada gambar 3.10 menunjukkan bahwa interpretasi return loss dalam bentuk VSWR, dimana nilai VSWR pada frekuensi 1,8 GHz adalah sebesar 1,0341 yang di tunjukan pada marker 2, yaitu dibawah standart batas yang ditentukan, yaitu 2 yang di tunjukan pada marker 1 dan 3 pada grafik. VSWR yang dihasilkan menunjukkan data bahwa hasil simulasi dilakukan memenuhi syarat dari kebutuhan spesifikasi dari harvesting.

hasil simulasi karekteristik parameter luar, untuk gain dan polaradiasi 3D dapat dilihat pada gambar 3.13 dan gambar 3.14.



Gambar 3.13 Grafik hasil gain dan polarisasi persegi pada patch 2 saluran port 1



Gambar 3.14. Grafik hasil gain dan polarisasi persegi pada patch 2 saluran port 2.

Dari simulasi gain dan polaradiasi 3D yang dihasilkan oleh port 1 dan port 2 pada patch yang menggunakan dua saluran transmisi tidak jauh beda dengan single patch yang hanya menggunakan satu saluran transmisi.

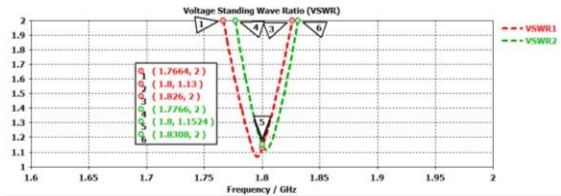
3.1.3 Simulasi Antenna 2 x 1 Patch Rectangular Optimalisasi

Tabel 3.3. Dimensi desain antenna persegi patch 2 elemen dan 2 saluran transmisi.

Dimensi Antena Mikrostrip	Paremeter	Nilai
Lebar Patch	W	39 mm
Panjang Patch	L	39 mm
Lebar Ground Plane	Wg	168,5 mm
Panjang Ground Plane	Lg	125,6145 mm
Lebar Feedline (50 Ω)	Wf1	3,05 mm
Panjang Feedline (50 Ω)	Lf1	19,863 mm
Lebar Feedline (59Ω)	Wf2	2,28 mm
Panjang Feedline (59Ω)	Lf2	19,863 mm
Lebar Feedline (70,71Ω)	Wf3	1,59 mm
Panjang Feedline (70,71Ω)	Lf3	19,863 mm
Lebar Feedline (100 Ω)	Wf4	0,625 mm
Panjang Feedline (100 Ω)	Lf4	11,33 mm
Lebar Feedline (100 Ω)	Wf5	0,625 mm
Panjang Feedline (100 Ω)	Lf5	7 mm
Lebar Feedline (100 Ω)	Wf6	0,625 mm
Panjang Feedline (100 Ω)	Lf6	75,3575 mm
Lebar Feedline (100 Ω)	Wf7	0,625 mm
Panjang Feedline (100 Ω)	Lf7	55 mm
Lebar Feedline (100 Ω)	Wf8	0,625 mm
Panjang Feedline (100 Ω)	Lf8	35 mm
Lebar Feedline (100 Ω)	Wf9	0,625 mm
Panjang Feedline (100 Ω)	Lf9	7 mm
Jarak Substrate	Sub L	10 mm
Tebal Substrat	h	1,6 mm
Tebal Ground Plane	t	0,035 mm
Permittivitas	ϵ_r	4,4

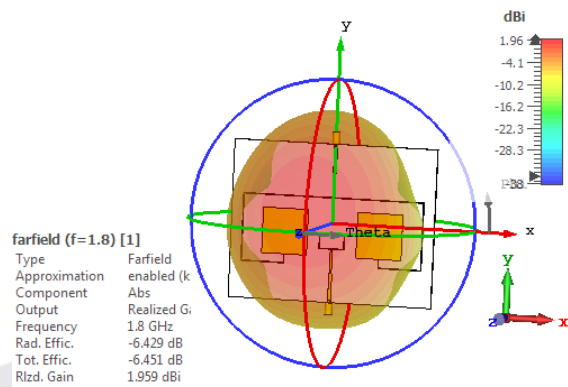
Substrat		
----------	--	--

Hasil optimalisasi lanjutan digunakan sebagai geometri yang akan dilakukan proses fabrikasi, untuk hasil final optimalisasi terhadap Return Loss, VSWR, Impedansi dapat dilihat pada gambar berikut.

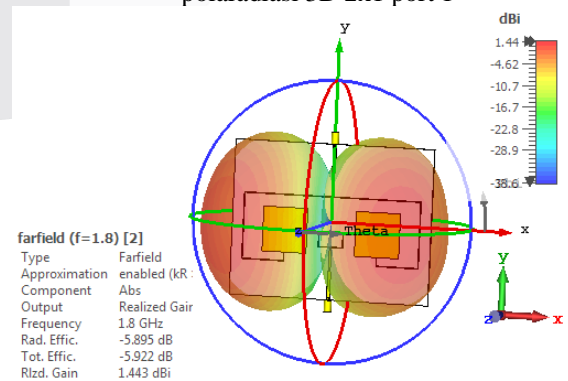


Gambar 3.16. Grafik hasil VSWR 2x1 port 1 dan 2.

hasil simulasi VSWR sdh sesuai dengan kebutuhan spesifikasi yang di inginkan, dengan batas bandwidth di bawah 2, dan VSWR pada frekuensi 1,8 GHz untuk port 1 sebesar 1,13 dan Port 2 sebesar 1,1524. badwidth sebesar 56 MHz. Port 2 menghasilkan nilai return loss sebesar -22,997 dB pada frekuensi 1,8 GHz, dengan bandwidth yang dimulasi dari frekuensi 1,7781 GHz sampai 1,8293 GHz pada batas return los -10 dB menghasilkan badwidth sebesar 51,2 MHz.



Gambar 3.18 Grafik hasil gain dan polaradiasi 3D 2x1 port 1



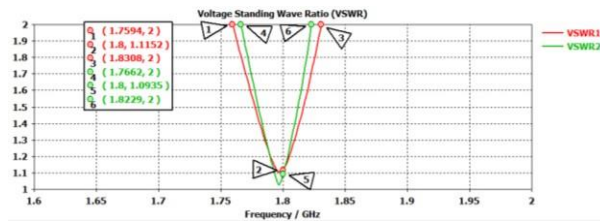
Gambar 3.19 Grafik hasil gain dan polaradiasi 3D 2x1 port 2.

Besaran gain yang didapatkan pada port 1 sebesar 1,959 dB, sedangkan gain untuk port 2 sebesar 1,443 dB. Perbedaan gain dipengaruhi dari nilai

VSWR, semakin mendekati $VSWR = 1$, dapat dipastikan semakin besar gain yang dihasilkan, dalam kasus ini port 2 memiliki nilai VSWR yang lebih bagus dibandingkan dengan port 1.

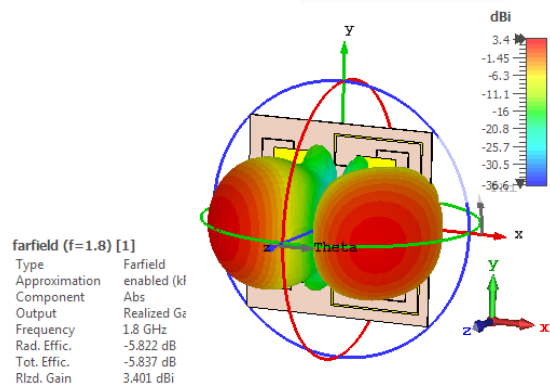
3.1.4. Simulasi Antenna 2 x 2 Patch Rectangular Optimalisasi

Hasil optimalisasi lanjutan digunakan sebagai geometri yang akan dilakukan proses fabrikasi, untuk hasil final optimalisasi terhadap Return Loss, VSWR, Impedansi dapat dilihat pada gambar berikut.

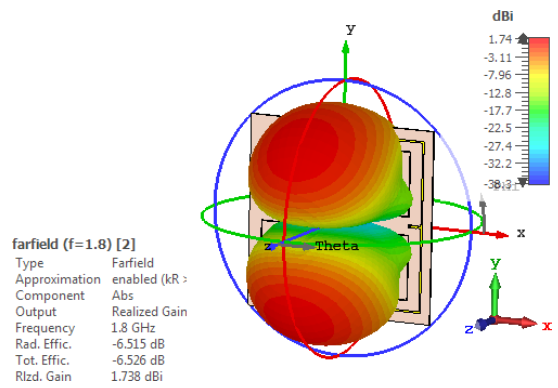


Gambar 3.21 Grafik hasil VSWR 2x2 port 1 dan port 2.

hasil simulasi VSWR sdh sesuai dengan kebutuhan spesifikasi yang di inginkan, dengan batas bandwidth di bawah 2, dan VSWR pada frekuensi 1,8 GHz untuk port 1 sebesar 1,1152 dan Port 2 sebesar 1,04935. bandwidth yang dimulasi dari frekuensi 1,7621 GHz sampai 1,8289 GHz pada batas VSWR 2 menghasilkan badwidth sebesar 66,8 MHz. Port 2 menghasilkan nilai return loss sebesar -27,005 dB pada frekuensi 1,8 GHz, dengan bandwidth yang dimulasi dari frekuensi 1,7682 GHz sampai 1,8214 GHz pada batas VSWR 2 menghasilkan badwidth sebesar 53,2 MHz.



Gambar 3.23 Grafik hasil gain dan polaradiasi 3D 2x2 port 1



Gambar 3.24. Grafik hasil gain dan polaradiasi 3D 2x2 port 2

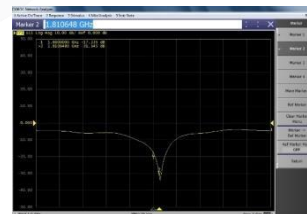
Dari gambar 3.23 merupakan hasil simulasi gain dan polarisasi dari port 2, dimana port 2 menghasilkan polarisasi vertical linier, sehingga mempengaruhi arah pergerakan gain. Gambar 3.24 merupakan merupakan hasil simulasi gain dan polarisasi dari port 1, dimana port 1 menghasilkan polarisasi horizontal linier, sehingga mempengaruhi arah pergerakan gain juga.

4. Pengukuran dan Analisis

Antena hasil simulasi direalisasikan atau dicetak kemudian dilakukan pengukuran terhadap parameter antenna realisasi, antenna yang direalisasikan menggunakan bahan substrat Epoxy FR-4. Hasil yang diperoleh kemudian dibandingkan dengan pengukuran antenna yang telah difabrikasi.

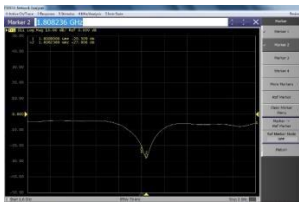


Gambar 4.1 Antena realisasi tampak depan dan belakang



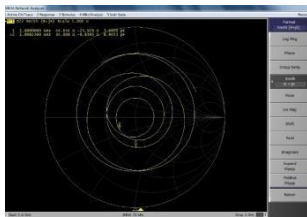
Gambar 4.2 Return loss antenna realisasi port 1

Pada frekuensi 1.8 GHz bahwa nilai return loss berada pada titik -17.335 dB.



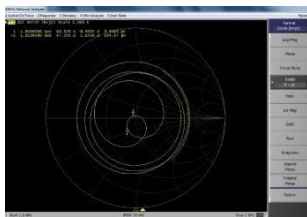
Gambar 4.3 Return loss antenna realisasi port 2

Pada frekuensi 1.8 GHz bahwa nilai *return loss* berada pada titi -20.309 dB.



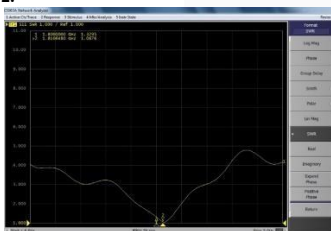
Gambar 4.4 pengukuran *matching impedance* port 1.

Pengukuran *matching impedance* pada antenna realisasi pada frekuensi kerja antenna adalah (44.654 -23.929) Ω

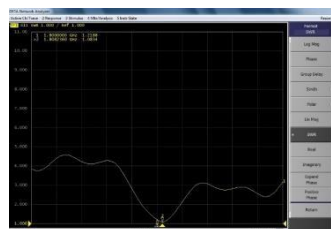


Gambar 4.5 pengukuran *matching impedance* port 2.

pengukuran *matching impedance* port 2 pada antenna realisasi pada frekuensi kerja adalah (40.528 -8.9003) Ω.

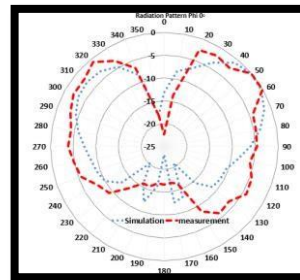


Gambar 4.6 pengukuran VSWR port 1. VSWR antenna realisasi yang didapat dari hasil pengukuran menggunakan alat *network analyzer* adalah 1.3295

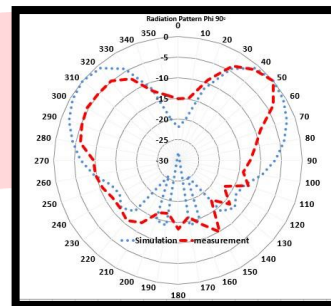


Gambar 4.7 pengukuran VSWR port 2. VSWR port 2 antenna realisana pada frekuensi kerja pada alat ukur *network analyzer* adalah 1.2188.

Pengukuran polaradiasi Azimuth diambil saat antenna penerima diputar secara horizontal dan vertikal setiap 10°.

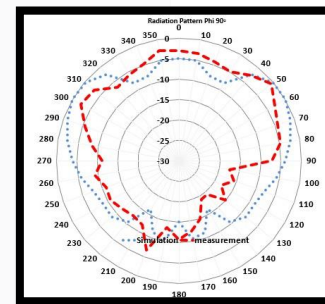


Gambar 4.8 pengukuran pola radiasi azimuth port 1.

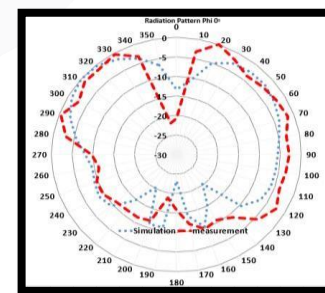


Gambar 4.9 pengukuran pola radiasi azimuth port 2.

Pengukuran pola radiasi elevasi diambil saat antenna penerima diputar setiap 10°.

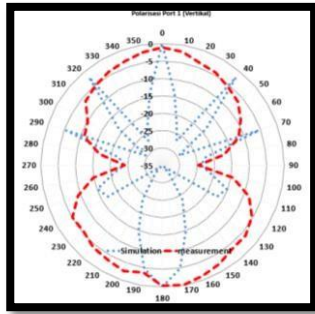


Gambar 4.10 pengukuran pola radiasi elevasi port 1.

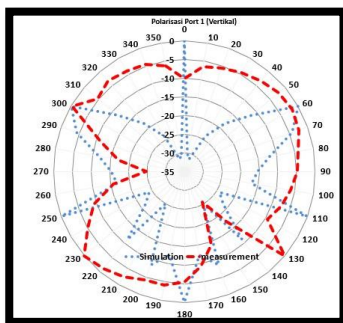


Gambar 4.11 pengukuran pola radiasi elevasi port 2.

pengukuran polarisasi dilakukan antenna dilakukan di outdoor dengan cara memutar antenna penerima pada sumbu Z setiap 10°. Hasil pengukuran dapat dilihat pada gambar 4.12 dan gambar 4.13



Gambar 4.12 pengukuran polarisasi port 1 (vertikal).



Gambar 4.13 pengukuran polarisasi port 2 (horizontal).

5. Kesimpulan

1. Parameter *return loss*, *VSWR* dan *Matching Impedance* telah berhasil diverifikasi dan sesuai dengan spesifikasi perancangan awal sehingga dapat diaplikasikan pada *Energy Harvesting*.
2. Nilai pada Gain yang diinginkan adalah ≥ 1 dB. Nilai yang didapat saat simulasi adalah 0.4846 dB dan nilai gain pada pengukuran realisasi adalah 3.157769771 dB. Dapat dilihat bahwa yang dapat memenuhi spesifikasi yang diinginkan adalah pengukuran pada antenna realisasi.

REFERENSI

- [1] Constantine. A. Balanis, *Antena Theory : Analysis and Design*, (USA : John Wiley and Sons, 1997).
- [2] Fawwaz T. Ulaby, *Fundamentals of applied Electromagnetics*, (USA : Prentice Hall, 2001).
- [3] Helszajn, J., James, D.S., dan Nisbet, W.T., "Circulators Using Planar Triangular Resonators", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 27, no.2, pp. 188-193, February 1979.
- [4] Garg, R., Bhartia, P, Bahl, I., dan Ittipiboon, A., "Microstrip Design Handbook", Artech House Inc., Norwood, MA, 2001. .
- [5] A.D Prasetyo, Heroe Wijanto, J. Tetuko S. S., Arifin Nugroho, "Perancangan Antena Mikrostrip Truncated Edges Circular Patch Untuk Circularly-Polarized Synthetic Aperture Radar Onboard Microsatellite (Msat Cp-Sar)", Universitas Telkom, 2013
- [6] 2013 - A Harmonic Suppression Circularly Polarized Patch Antenna for an RF Ambient Energy Harvesting System.
- [7] Hagerty, J.A., Helmbrecht, F.B., McCalpin, W.H., Zane, R. and Popovic, Z.B. (2004), "Recycling ambient microwave energy with broad-band rectenna arrays", *IEEE Transactions Microwave Theory and Techniques*, Vol. 52 No. 3, pp. 1014-24.
- [8] R.A.Rahim, S.I.S.Hassan, F.Malek, M.N.Junita, F.Jamlos "An Investigation of Ambient Radio Frequency as a Candidate for Energy Harvesting Source," 2012 IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications, Bandung, Indonesia, pp.95-99.
- [9] Arif Rahman Hakim, Bambang Setia Nugroho, Agus Dwi Prasetyo, "Perancangan Dan Realisasi Antena Mikrostrip Polarisasi Sirkular Dengan Catuan Proximity Coupled Untuk Circularly Polarized Synthetic Aperture Radar (CP-SAR)", Universitas Telkom, 2014.
- [10] Achmad Rizal Ridwan Mattulada, Zulfi, Yuyu Wahyu, "Perbandingan Daya Keluaran Rectenna Singleband dan Multiband Pada RF Energy Harvesting 900-2400 MHz Universitas Telkom," e-Proceeding of Engineering, Vol. 5, No. 1, Maret 2018, page 760, ISSN: 2355-9365.
- [11] Fadhli Iwanda, Zulfi, Yuyu Wahyu, "Rectifying Antenna (Rectenna) untuk Sinyal TV UHF 470-806 MHz," e-Proceeding of Engineering, Vol. 5, No. 3, Desember 2018, page 5483, ISSN: 2355-9365.
- [12] Hendro Fransniko Situmeang, Levy Olivia Nur, Zulfi, "Perancangan dan Realisasi Rectenna Array Bow-Tie Dipole Frekuensi 2,4 GHz dengan Voltage Multiplier untuk Energy Harvesting," e-Proceeding of Engineering, Vol. 6, No. 2, Agustus 2019, page 4579, ISSN: 2355-9365.