

ANALISIS PENGARUH UKURAN DAN POSISI SLOT SIRKULAR PADA ANTENA PLANAR PATCH SIRKULAR SUPER WIDEBAND (SWB)

SIZE AND POSITION IMPACT ANALYSIS OF CIRCULAR SLOT ON CIRCULAR PATCH PLANAR SUPER WIDEBAND (SWB) ANTENNA

Zaharah Tricahyani Ardian¹, Dr. Ir. Heroe Wijanto., M.T.², Agus Dwi Prasetyo, S.T., M.T.³

^{1,2,3}Prodi S1 Teknik Telekomunikasi, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom

¹zahraardvan07@student.telkomuniversity.ac.id, ²heroe@telkomuniversity.ac.id,

³adprasetyo@telkomuniversity.ac.id

Abstrak

Dalam beberapa tahun terakhir, sebagian besar layanan komunikasi menggunakan teknologi nirkabel sebagai media transmisinya. Hal tersebut mengakibatkan meningkatnya kebutuhan antenna dengan teknologi *Super Wideband (SWB)* sebagai media pemancar dan penerima untuk dapat mencakup berbagai layanan dengan spektrum frekuensi yang sangat lebar. Oleh karena itu, dibutuhkan suatu antenna dengan teknologi SWB yang dapat mencakup keseluruhan platform komunikasi nirkabel pada suatu perangkat dengan biaya produksi murah, berukuran kecil, dan *bandwidth* super lebar.

Pada tugas akhir ini dilakukan simulasi dan analisis antenna SWB dengan *patch* sirkular yang ditambahkan celah sirkular untuk mendapatkan lebar pita super lebar. Celah sirkular diubah dimensi dan posisinya pada *patch* untuk mendapatkan karakteristik kinerja optimal, yaitu dengan lebar pita maksimal pada suatu VSWR atau *return loss* tertentu dan *gain* sesuai kebutuhan. Kondisi optimal tersebut menjadi dasar untuk realisasi hasil perancangan antenna yang diharapkan memberikan kinerja terbaik. Setelah mendapatkan hasil simulasi, maka dilakukan perbandingan antenna dengan beberapa slot yang berbeda ukuran dan posisi. Parameter yang dibandingkan antara lain *bandwidth*, *gain*, dan *return loss*.

Dari hasil simulasi telah didapatkan berbagai karakteristik antenna planar SWB *patch* sirkular dipengaruhi oleh perubahan ukuran dan posisi slot sirkular. Kinerja terbaik diperoleh ketika ditambahkan satu slot lingkaran berdiameter 6 mm yang diposisikan pada bagian bawah *patch* antenna, yaitu dengan *gain* 2,50 dBi dan S_{11} terendah -23,94 dB pada frekuensi 50 GHz. Secara keseluruhan untuk target frekuensi operasi 3-50 GHz dapat dicapai $S_{11} < -10$ dB.

Kata kunci : antenna SWB, *patch* sirkular, celah sirkular.

Abstract

In recent years, most communication services use wireless technology as their transmission media. This has led to an increase in the need for antennas with Super Wideband (SWB) technology as a transmitter and receiver to be able to cover a variety of services with a very wide frequency spectrum. Therefore, we need an antenna with SWB technology that can cover the entire wireless communication platform on a device with low production costs, small size, and super wide bandwidth.

In this final project a SWB antenna simulation and analysis with a circular patch are added with a circular slot to get super wide bandwidth. Circular slot is changed in dimensions and its position on the patch to get optimal performance characteristics, namely with maximum bandwidth at a certain VSWR or return loss and gain as needed. The optimal conditions are the basis for the realization of antenna design results that are expected to provide the best performance. After getting the simulation results, the antenna will be simulated with several slots of different sizes and positions. Parameters that compare between other bandwidth, gain, and return loss.

From the simulation results, had been obtained various characteristics of the circular patch SWB antenna are affected by changes the size and position of circular slot. The best performance is obtained when adding one slot with diameter 6 mm which positioned at the bottom of antenna patch, with the gain is 2.50 dBi and the lowest S-Parameter is -23.94 dB at frequency 50 GHz. Overall, the target operating frequency 3-50 GHz can be achieved the value of $S_{11} < -10$ dB.

Keywords: SWB antenna, circular patch sirkular, circular slot

1. Pendahuluan

Dalam beberapa tahun terakhir sebagian besar layanan komunikasi menggunakan teknologi nirkabel sebagai media transmisi. Hal tersebut mengakibatkan meningkatnya kebutuhan akan antenna sebagai media pemancar sekaligus penerima pada komunikasi nirkabel. Permasalahan mendasar dalam teknologi nirkabel yaitu adalah kebutuhan akan kecepatan data yang tinggi dengan rentang *bandwidth* yang lebar. Saat ini antenna yang banyak digunakan adalah antenna *Ultra Wideband* (UWB). Namun, jika ini dilihat dari *bandwidth*, antenna *Super Wideband* (SWB) memiliki lebar pita yang lebih luas dibandingkan dengan UWB. Salah satu tantangan dalam realisasi antenna SWB adalah pengembangan radiator yang sesuai untuk mendapatkan *bandwidth* yang lebih lebar [1].

Solusi yang tepat untuk mengatasi permasalahan tersebut adalah dengan menggunakan teknologi SWB untuk mendapatkan *bandwidth* yang lebar. Dimana antenna dengan teknologi SWB menyediakan *bandwidth* rasio lebih dari 10:1 [2]. Terdapat beberapa penelitian sebelumnya yang berkaitan mengenai cara melebarkan *bandwidth* pada antenna yang dijelaskan pada [3], [4], dan [5]. Pada penelitian [3] dirancang antenna monopole SWB yang mencakup pita frekuensi dari 0.9 GHz – 100 GHz. Pada penelitian [4] telah dirancang antenna monopole berbentuk mickey-mouse SWB pada frekuensi 2 GHz – 100 GHz. Pada penelitian [5] menyajikan antenna monopole microstrip SWB yang memiliki *bandwidth* tertinggi hingga 110 GHz.

Pada tugas akhir ini, dilakukan analisis pengaruh ukuran dan posisi slot sirkular pada antenna mikrostrip planar *patch* sirkular *super wideband* (SWB).

2. Dasar Teori /Metodologi/Perancangan

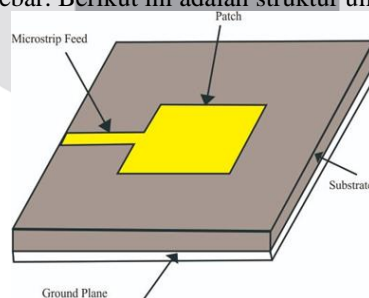
2.1 Super Wideband

Antena *Super Wideband* (SWB) ditemukan pada akhir 1950 dan awal 1960, dengan rasio *bandwidth* lebih dari 10:1 yang mana merupakan rasio *bandwidth* dari frekuensi atas dengan frekuensi bawah dan pertama kali dikembangkan oleh Rumsey et al [2].

Teknologi UWB didefinisikan sebagai skema nirkabel yang menempati *bandwidth* fraksional $BW/fc \geq 20\%$, dengan BW adalah *bandwidth* transmisi dan fc adalah frekuensi tengah, namun pada teknologi SWB dengan *bandwidth* rasio 10:1 memiliki nilai *bandwidth* fraksional 163% yang artinya melebihi *bandwidth* fraksional dari UWB.

2.2 Antena Mikrostrip Planar

Antena mikrostrip planar mempunyai bentuk *patch*, substrat dan *groundplane* yang datar dengan karakteristik fisik lebih sederhana dan *bandwidth* yang lebar. Berikut ini adalah struktur umum antenna mikrostrip planar



Gambar 1 Bentuk Geometri Antena Mikrostrip Planar

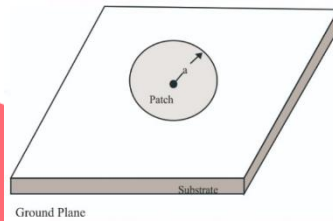
2.3 Slot pada Antena

Bentuk celah (slot) pada antenna mikrostrip merupakan bagian alternatif dari fungsi elemen peradiasi. Struktur antenna mikrostrip terdiri dari dua elemen konduktor yang dicetak pada substrat. Salah satu kelebihan dari antenna slot adalah *bandwidth* yang dihasilkan lebih lebar dibandingkan dengan antenna yang tidak memiliki slot [7].

Dengan memberikan sebuah slot ke *patch* bisa mengurangi frekuensi resonansi dan juga mengurangi dimensi antenna. Dengan slot yang tepat bisa menghasilkan dua frekuensi [7].

2.4 Patch Sirkular

Patch circular/lingkaran merupakan salah satu bentuk antena yang sering digunakan selain *patch rectangular*. Pada perancangannya yang dibutuhkan adalah jari-jari (a) dan ketebalan (t) patch. Sehingga, *patch circular* lebih mudah untuk dibuat dan dimodifikasi.



Gambar 2 Patch Sirkular Antena

Dalam merancang mikrostrip *patch* sirkular, diperlukan konstanta dielektrik dari substrat yang digunakan (ϵ_r) sebesar 4.4 dan tebal dari bahan yang digunakan sebagai substrat (h) sebesar 1.6 mm untuk mengetahui nilai jari-jari (a) dapat menggunakan persamaan berikut [10]:

$$F = \frac{8.791 \times 10^9}{f_r \sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.1)$$

Dengan f_r sebagai frekuensi resonansi, F sebagai variabel pengganti dan ϵ_r sebagai konstanta *relative*. Maka untuk mempermudah perhitungan jari-jari fisik lingkaran rumus diatas disubstitusikan ke dalam persamaan (2.2) berikut:

$$a = \frac{F}{\left\{1 + \frac{2h}{\pi \epsilon_r F} \left[\ln\left(\frac{\pi F}{1.1h}\right) + 1.7726 \right] \right\}^{\frac{1}{2}}} \quad (2.2)$$

Dimana a merupakan jari-jari *patch* antena dan h merupakan tebal substrat (mm). Untuk mengukur dimensi saluran pencatu jenis mikrostrip *feed line* dapat menggunakan persamaan (2.3) berikut:

$$W = \frac{2h}{\pi} \left\{ B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left[\ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right] \right\} \quad (2.3)$$

Dengan mencari nilai B yaitu :

$$B = \frac{60\pi^2}{Z_0 \sqrt{\epsilon_e}} \quad (2.4)$$

Untuk menentukan panjang saluran pencatu dapat menggunakan persamaan 2.5 berikut:

$$\epsilon_{\text{reff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[\frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{h}{w}}} \right] \quad (2.5)$$

Dari persamaan diatas selanjutnya dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\Delta l = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} \quad (2.6)$$

Sedangkan untuk mencari λ_0 dengan menggunakan persamaan :

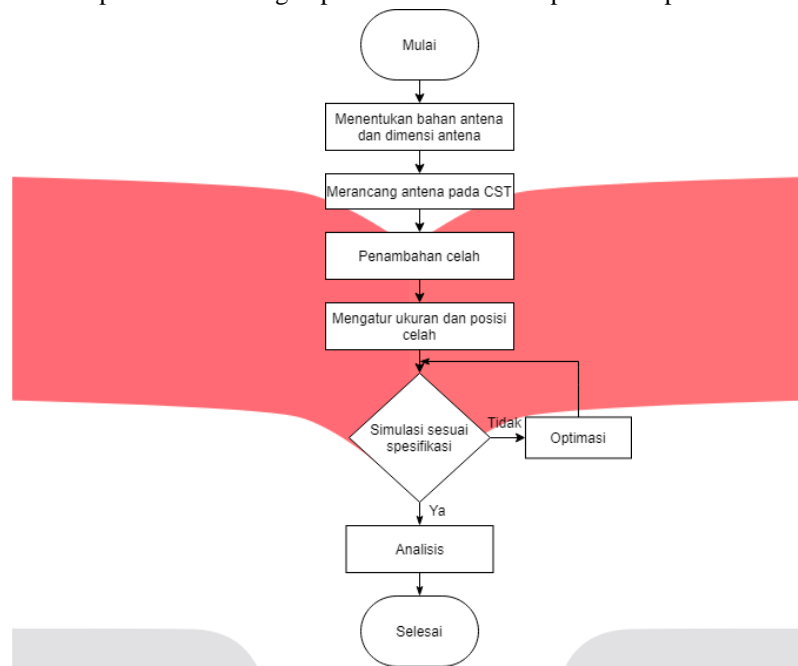
$$\lambda_0 = \frac{c}{f} \quad (2.7)$$

Maka Panjang saluran pencatu dapat dihitung menggunakan persamaan berikut :

$$L = \frac{\Delta l}{2} \quad (2.8)$$

2.5 Tahap Perancangan

Dalam perancangan antenna planar SWB dengan penambahan celah dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3 Diagram Alir Perancangan

3. Pembahasan

3.1 Perancangan Antena

Pada perancangan ini dilakukan pembuatan 25 *sample* antenna dengan variasi celah yang berbeda ukuran dan posisi. Sedangkan untuk *patch* antenna menggunakan *patch* sirkular dan pada semua *groundplane* tidak semua *full* menutupi substrat.

Perancangan antenna dilakukan bertahap pada simulasinya, dimulai dari frekuensi 3-25 GHz kemudian dilanjutkan dengan frekuensi 25-50 GHz.

3.2 Spesifikasi Antena

Langkah awal dalam perancangan yaitu menentukan spesifikasi antenna yang akan dibuat, penentuan spesifikasi ini berdasarkan pada tujuan perancangan, yaitu membuat Antena *Planar Super Wideband*. Adapun spesifikasi awal yang akan dicapai oleh antenna yang akan dirancang adalah sebagai berikut:

Tabel 1 Spesifikasi Antena yang dirancang

Parameter	Nilai
Frekuensi kerja	3-50 GHz
<i>Return Loss</i>	≤ -10 dB

3.3 Karakteristik Bahan

Parameter dalam memilih jenis substrat yang akan digunakan adalah ketebalan bahan (h) dan konstanta dielektrik relative (ϵ_r). Pada perancangan antenna ini menggunakan bahan dasar pada substrat jenis FR-4 dengan spesifikasi pada Tabel 2.

Tabel 2 Spesifikasi Substrat yang digunakan

Jenis Substrat	FR-4
Konstanta Dielektrik Relatif (ϵ_r)	4,3
Dielektrik Loss Tangen ($\tan \delta$)	0,02
Ketebalan Substrat (h)	1,6 mm

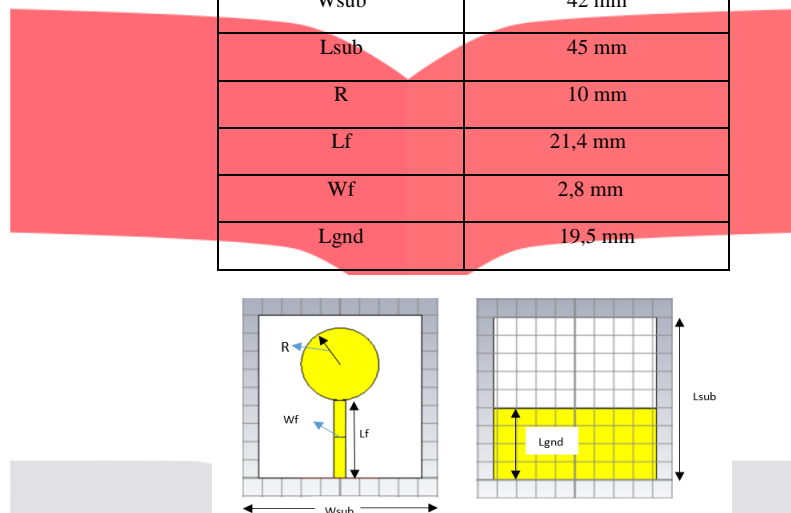
3.4 Perancangan Dimensi Antena

Dimensi dari *patch* mempengaruhi frekuensi kerja dari antenna, sebelum menentukan dimensi elemen peradiasi, maka terlebih dahulu harus ditentukan frekuensi resonansi (f_r) yang akan digunakan pada perancangan ini adalah 3-50 GHz. Antena planar ini dibuat pada bahan *substrat epoxy FR4*.

Antena yang akan dirancang berdasarkan jurnal referensi *A Compact Super Wideband Monopole Antenna* oleh Yi Huang, Rula Alrawashdesh, dan Jingweii Zhang[3] akan dijelaskan pada Gambar 4 dengan struktur awal antena seperti pada Tabel 3:

Tabel 3 Dimensi Struktur Awal Antena

Komponen	Dimensi
W_{sub}	42 mm
L_{sub}	45 mm
R	10 mm
L_f	21,4 mm
W_f	2,8 mm
L_{gnd}	19,5 mm



Gambar 4 Geometri Antena Planar

Gambar 4 menunjukkan R adalah jari-jari dari *patch*, W_f adalah lebar dari *feedline*, L_f adalah panjang *feedline*, L_{sub} adalah panjang substrat, W_{sub} adalah lebar substrat, dan L_{gnd} adalah panjang *groundplane*

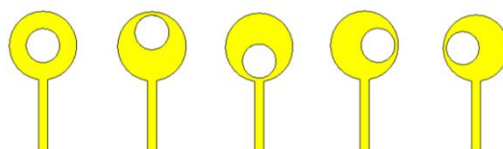
3.1 Simulasi Antena

Hasil perancangan antena ini akan disimulasikan dengan menggunakan *software CST Studio Suite*. Tujuan simulasi ini adalah untuk mengetahui karakteristik dari antena yang akan dirancang. Antena yang akan dirancang menggunakan *patch* sirkular dengan 5 desain posisi celah yang masing-masing berbeda ukuran di setiap diameter celah antena. Setiap antena menggunakan frekuensi yang sama yaitu 3-50 GHz. Akan tetapi dilakukan secara bertahap pada proses memasuki frekuensinya. Langkah awal perancangan dilakukan pada frekuensi 3-25 GHz, kemudian setelah melakukan simulasi, maka akan terlihat parameter-parameter yang akan diamati. Variabel yang akan dianalisis yaitu parameter antena di *return loss*, *bandwidth* dan *gain*. Dilakukan simulasi yang sama pada frekuensi 25-50 GHz.

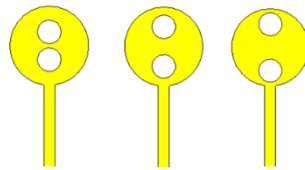
3.2 Variabel yang di Analisis

Pada penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh dari ukuran dan posisi slot sirkular pada antena mikrostrip *patch* sirkular. Perancangan penelitian ini menggunakan 3 bentuk antena yang berbeda slot pada setiap *patch*, mulai dari ukuran dan posisinya seperti pada Gambar 5 dan Gambar 6.

Penambahan celah pada 5 desain antena yang akan dirancang dengan frekuensi 3 sampai dengan 50 GHz, akan dilakukan bertahap pada frekuensinya dengan diameter celah 4mm, 5mm dan 6mm. Kemudian akan dilakukan analisa pada setiap antena yang akan dirancang



Gambar 5 Sample Antena yang diuji (1 slot sirkular)

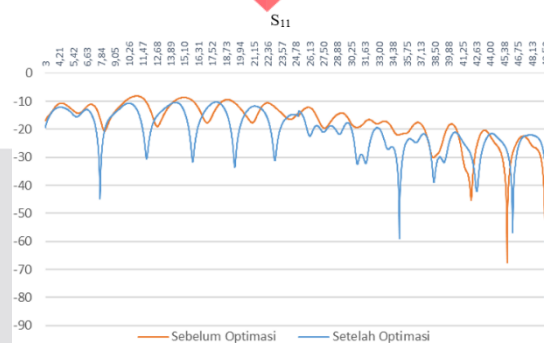


Gambar 6 Sample Antena yang diuji (2 slot sirkular)

Untuk *sample* yang kedua yaitu dengan penambahan celah pada 3 desain antena yang akan dirancang dengan posisi jarak dan diameter yang berbeda pada masing-masing celah, frekuensi 3 sampai dengan 50 GHz, akan dilakukan bertahap pada frekuensinya. Kemudian akan dilakukan analisa pada setiap antena yang akan dirancang.

3.3 Analisis Antena Planar SWB Patch Sirkular Tanpa Slot

Perancangan antena *patch* sirkular tanpa slot dengan menggunakan parameter pada Tabel 3 sebelum optimasi. Setelah optimasi terdapat beberapa perubahan parameter diantaranya jari-jari sebesar 11,9 mm, lebar substrat sebesar 48 mm, panjang *feedline* sebesar 20,5 mm dan panjang *groundplane* sebesar 19,9 mm. Hasil analisa dapat dilihat pada Gambar 7.

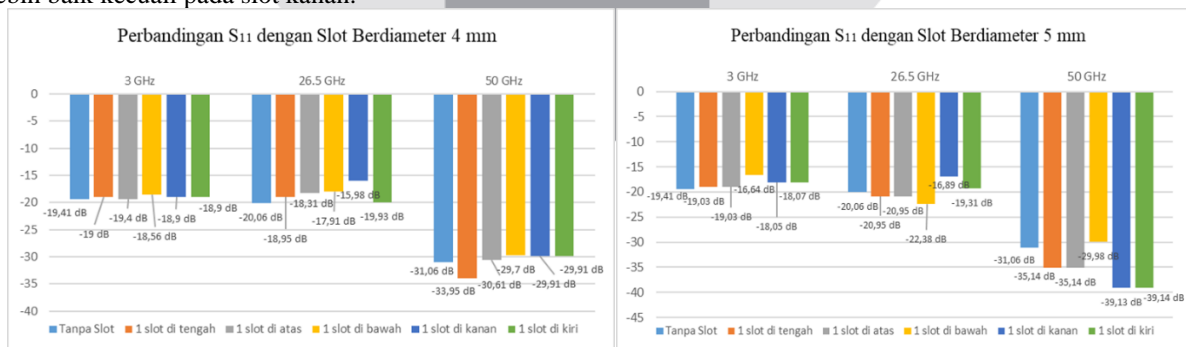


Gambar 7 Hasil S-Parameter Antena Patch Sirkular Tanpa Slot

3.4 Analisis Keterkaitan antar Skenario

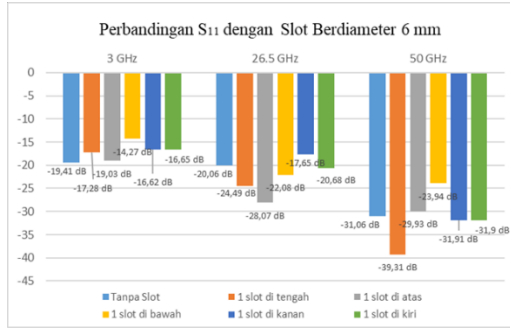
3.4.1 Slot 1 Lingkaran

Pada Gambar 8 dapat dilihat bahwa penambahan satu slot dengan ukuran 4 mm sedikit mengalami perubahan dari antena tanpa slot, pada frekuensi 50 GHz dengan posisi slot ditengah nilai S₁₁ lebih besar 2,89 dB terhadap antena tanpa slot. Namun penambahan 1 slot dengan ukuran 5 mm mengalami perubahan nilai S₁₁ di setiap *sample*. Pada frekuensi tengah nilai S₁₁ lebih baik terhadap antena tanpa slot, namun pada slot kanan dan slot kiri mengalami kenaikan terhadap nilai S₁₁ terhadap antena tanpa slot. Dan dengan penambahan 1 slot dengan ukuran 6 mm mengakibatkan spesifikasi antena pada frekuensi tinggi menjadi lebih baik tetapi pada slot atas dan slot bawah mengalami penurunan. Sedangkan pada frekuensi rendah nilai S₁₁ lebih kecil. Kemudian pada frekuensi tengah nilai S₁₁ lebih baik kecuali pada slot kanan.



(a)

(b)

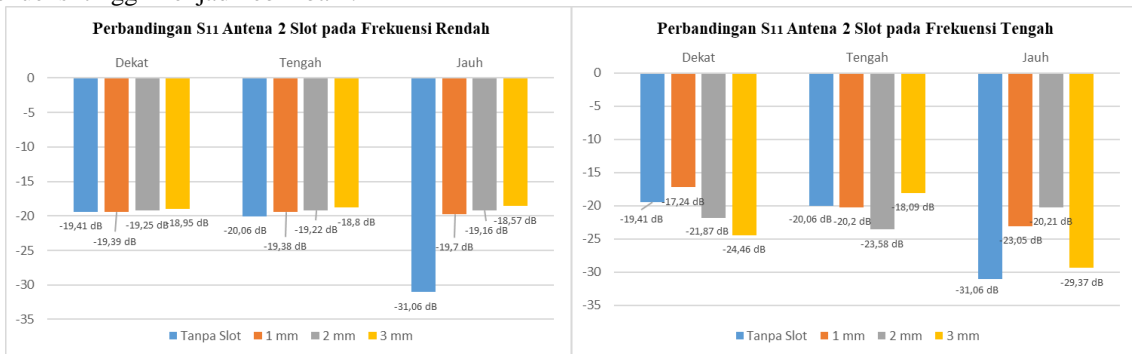


(c)

Gambar 8 Hasil S₁₁ 1 slot sirkular (a) Diameter 4 mm (b) Diameter 5 mm (c) Diameter 6 mm

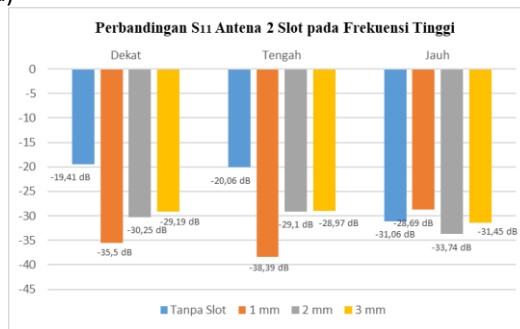
3.4.2 2 Slot Sirkular

Pada Gambar 4.41 dapat dilihat bahwa dengan penambahan 2 slot pada frekuensi rendah nilai S₁₁ dominan turun tetapi untuk S₁₁ pada saat jarak antar slot jauh dengan diameter slot 1 mm lebih baik. Namun dengan penambahan 2 slot pada frekuensi tengah nilai S₁₁ dominan lebih besar sehingga spesifikasi pada frekuensi tengah menjadi lebih baik. Kemudian dan dengan penambahan 2 slot pada frekuensi tinggi nilai S₁₁ dominan lebih besar sehingga spesifikasi pada frekuensi tinggi menjadi lebih baik.



(a)

(b)



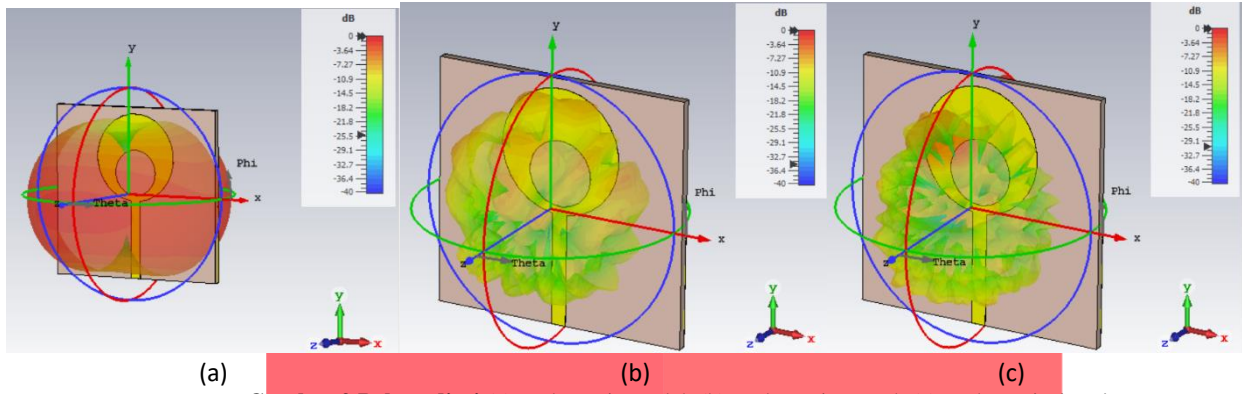
(c)

Gambar 8 Hasil S₁₁ 2 slot sirkular (a) Frekuensi Rendah (b) Frekuensi Tengah (c) Frekuensi Tinggi

3.5 Analisis Pola Radiasi

pola radiasi antena yang dihasilkan pada frekuensi rendah (3 GHz) . Untuk nilai $\phi=90^0$ adalah 42 dan $\phi=0^0$ adalah 34,9. Pola radiasi pada frekuensi rendah berbentuk *directional*. pola radiasi antena yang dihasilkan pada frekuensi tengah (26,5 GHz). Untuk nilai $\phi=90^0$ adalah 21,7 dan $\phi=0^0$ adalah 78,7. Pola radiasi pada frekuensi tengah berbentuk *directional*. Dan Pada Gambar 4.37 terlihat pola radiasi antena yang dihasilkan pada frekuensi tinggi (50 GHz) . Untuk nilai $\phi=90^0$ adalah 22 dan $\phi=0^0$ adalah 13,9. Pola radiasi pada frekuensi tengah berbentuk *directional*.

Dari ketiga frekuensi yaitu frekuensi rendah, tengah, dan tinggi, didapatkan hasil pola radiasi terbaik pada frekuensi rendah (3 GHz). Semakin tinggi frekuensi maka level sinyal yang dihasilkan semakin menurun, dan area pancar sedikit mengalami penurunan.

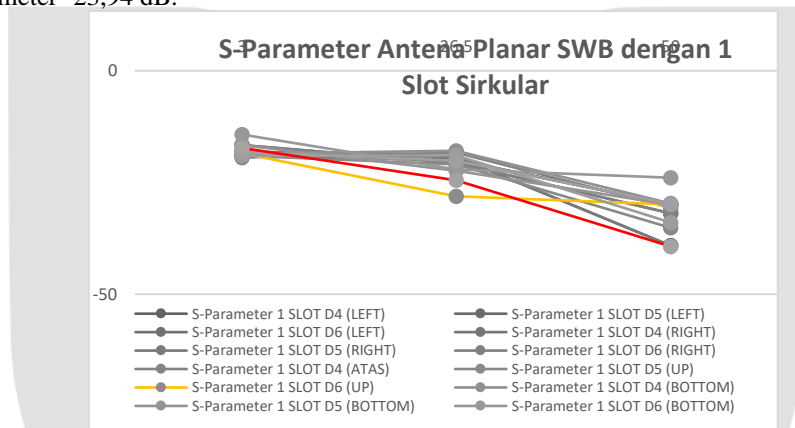


Gambar 9 Pola radiasi (a) Frekuensi Rendah (b) Frekuensi Tengah (c) Frekuensi Tinggi

3.6 Analisis Keterkaitan antar Skenario

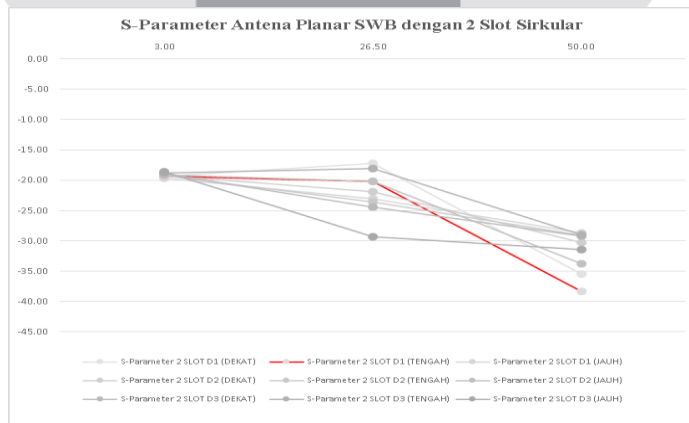
Setelah dilakukan percobaan terhadap 25 sample antenna planar patch sirkular, terdapat perubahan terhadap nilai parameter antenna dengan adanya penambahan slot sirkular.

Dapat dilihat pada Gambar 16 nilai S-Parameter paling rendah ditunjukkan pada garis merah yaitu -39,31 dB, namun dapat dilihat pada Gambar 17 dengan garis merah bahwa nilai gain dibawah 0 yaitu -0,75 dBi yang berarti tidak mengalami penguatan. Nilai gain terbaik untuk antenna dengan 1 slot sirkular ditunjukkan pada garis kuning yaitu 2,50 dBi dengan nilai S-Parameter -23,94 dB.



Gambar 16 Grafik S-Parameter dengan 1 Slot Sirkular

Pada Gambar 17 dapat dilihat bahwa antenna dengan 2 slot sirkular memiliki nilai S-Parameter paling rendah yaitu -38,39 dB.



Gambar 17 Grafik S-Parameter dengan 2 Slot Sirkular

Dari beberapa skenario yang dilakukan dapat disimpulkan bahwa antenna Planar SWB dengan patch sirkular akan memiliki performansi maksimum jika menambahkan slot 1 lingkaran pada bagian bawah patch dengan diameter 6 mm serta antenna tersebut memiliki nilai S-Parameter -23,94 dB dan gain sebesar 2,50 dBi.

4. Kesimpulan dan Saran

4.1 Kesimpulan

1. Dengan penambahan 1 slot sirkular pada *patch* antena mikrostrip *planar* sirkular, semakin besar diameter slot mengakibatkan nilai S-Parameter semakin baik pada frekuensi tinggi. Namun *gain* semakin menurun.
2. Pada saat posisi slot di tengah dengan 1 slot sirkular, S-Parameter semakin baik. Namun pada saat posisi slot di atas, bawah, kanan, dan kiri justru mengakibatkan S-Parameter memburuk. Begitu pula dengan nilai *gain* yang dominan semakin kecil.
3. Dengan penambahan 2 slot sirkular pada *patch* antena *planar* sirkular, nilai S-Parameter dan *gain* tidak lebih baik dari 1 slot sirkular. Semakin besar diameter slot maka nilai S-Parameter dan *gain* semakin buruk. Semakin jauh jarak antar slot maka nilai S-Parameter dan *gain* semakin baik.
4. Dari seluruh percobaan, antena memiliki performansi maksimal pada slot 1 lingkaran yang di posisikan di bagian bawah *patch* dengan diameter 6 mm memiliki nilai S-Parameter -23,94 dB dan nilai *gain* 2,50 dBi.

4.2 Saran

1. Perancangan slot pada antena dapat divariasikan dengan bentuk slot yang lain seperti segitiga atau persegi.
2. Perancangan antena dapat di variasikan dengan merubah bentuk *patch*.
3. Menambahkan ukuran diameter slot pada antena.

Daftar Pustaka:

- [1] Evans, J.A., Lerma, F.L., Ammann, M.J. 2004. *Printed Planar Monopole Antenna With Electromagnetically Coupled Elements*. High Frequency Postgraduate Student Colloquium.
- [2] Rumsey, V.H. 1966. *Frequency Independent Antennas*. London: Academic Press.
- [3] Manohar, M., Kshetrimayum, R.S., Gogoi, A.K. 2015. *Super Wideband Antenna With Single Band Suppression*. International Journal of Microwave and Wireless Technologies Vol 9(1): 143-150.
- [4] Cao, P., Huang, Y., Zhang J., Alrawashdeh R. 2013. *A Compact Super Wideband Monopole Antenna*. 2013 7th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP).
- [5] Seyfollahi, A., Bornemann, J. 2018. *Printed-Circuit Monopole Antenna for Super Wideband Applications*. 12th European Conference on Antennas and Propagation.
- [6] Lu, W.J., Zhu, H.B. 2009. *Super-Wideband Antipodal Slot Antenna*. 2009 Asia Pacific Microwave Conference.
- [7] Cao, P., Huang, Y., & Zhang, J. (2012). *A UWB monopole antenna for GPR application*. 2012 6th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP).
- [8] Yunita, T., Usman, K., Kurniawan, A. 2012. *Experiment of Slotted Triangular Triple-band Antenna for WiMAX/WLAN Application in Indonesia*. 2012 7th International Conference on Telecommunication Systems, Services, and Applications (TSSA)
- [9] Hirawasa, Kazuhiro. Analysis, *Design and Measurement of Small and Low- Profile Antennas*. USA: Artech House Production.
- [10] Balanis, C.A. 2005. *Antenna Theory Analysis and Design 3rd edition*. New Jersey: Wiley Inc.
- [11] Rizal S. 2011. *Perancangan Dan Realisasi Antenna Dualband Mikrostrip Fractal Hexagonal Pada Frekuensi 2100 MHz dan 3600 MHz*. Tugas Akhir. ITTelkomm. Bandung.
- [12] J. I. Pramesthi, "Analisis Metode Pembentukan Antena Mikrostrip Berpolarisasi Sirkular Pada Frekuensi X-Band dan KU-Band," 2019.
- [13] W. L. Stutzman dan G. A. Thiele, *Antenna Theory and Design Third Edition*, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2013.
- [14] Balanis, C.A. 2016. *Antenna Theory Analysis and Design Fourth Edition*, New Jersey: ohn Wiley & Son, Inc.