

# Perancangan Antena Vivaldi Antipodal 2 - 18 GHz untuk *Radio Direction Finder*

Deri Latika Herda<sup>1</sup>, Siska Aulia<sup>2</sup> dan Frenzi Agres Yudithia<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup>Politeknik Negeri Padang, Kampus Limau Manis, Padang, Indonesia

<sup>3</sup>Politeknik Kesehatan Siteba, Jalan Jhoni Anwar No. 17A, Padang, Indonesia

E-mail: [deri@pnp.ac.id](mailto:deri@pnp.ac.id)

## Abstrak

Pita frekuensi 2-18 GHz merupakan spektrum yang banyak digunakan untuk sistem telekomunikasi, baik militer maupun sipil. Hal ini sebanding dengan jumlah penggunaan ilegalnya. Penelitian ini mengembangkan antena vivaldi antipodal untuk mendukung kegiatan *direction finding* pemancar ilegal pada pita frekuensi 2-18 GHz. Perancangan antena bersifat simulasi menggunakan software CST dengan memodifikasi *ground*, memperlebar lengan antena, dan menambah panjang saluran transmisi. Rancangan antena berukuran 94.14 x 73.2 mm pada substrat FR-4 dengan konstanta dielektrik 4.6 dan ketebalan 1.6 mm. Hasil simulasi menunjukkan bahwa antena vivaldi antipodal memiliki nilai  $-49.95378 \text{ dB} \leq S_{11} \leq -10.022357 \text{ dB}$ ,  $1.0066947 \leq \text{VSWR} \leq 1.9248251$  dan *gain* rata-rata sebesar 5.1558 dB pada pita frekuensi 2-18 GHz.

*Kata kunci:* 2-18 GHz, *direction finding*, *vivaldi antipodal*

## Abstract

The 2-18 GHz frequency band is a spectrum that is widely used for telecommunication systems, both military and civil. This is proportional to the number of illegal uses. This research develops an antipodal vivaldi antenna to support direction finding activities of illegal transmitters in the 2-18 GHz frequency band. Antenna design is a simulation using CST software by modifying the ground, widening the antenna arm, and increasing the length of the transmission line. The antenna design measures 94.14 x 73.2 mm on FR-4 substrate with a dielectric constant of 4.6 and a thickness of 1.6 mm. The simulation results show that the antipodal vivaldi antenna has a value  $-49.95378 \text{ dB} \leq S_{11} \leq -10.022357 \text{ dB}$ ,  $1.0066947 \leq \text{VSWR} \leq 1.9248251$  and an average gain of 5.1558 dB in the 2-18 GHz frequency band.

*Keywords:* 2-18 GHz, *direction finding*, *antipodal vivaldi*

## 1. Pendahuluan

Pita 2-18 GHz merupakan spektrum yang banyak dipakai untuk sistem komunikasi, radar, dan telemetri baik militer maupun sipil. Militer menggunakan pita 2-18 GHz dalam *Electronic Support Measurement* (ESM). ESM adalah bagian dari *Electronic Warfare* yang mendeteksi dan mengidentifikasi semua emisi elektromagnetik yang masuk dalam frekuensi kerjanya, terutama emisi elektromagnetik yang berasal dari transmitter komunikasi dan radar [1] tanpa mengirimkan sinyal atau dengan kata lain tanpa memberi tahu posisi kepada target. Sedangkan pada penerapan sipil, Balai Monitoring Spektrum Frekuensi Radio Kominfo melakukan pengawasan penggunaan spektrum frekuensi dengan mencari posisi pemancar ilegal menggunakan sistem *direction finding* (DF) untuk mengurangi

penggunaan frekuensi secara ilegal pada *range* frekuensi tertentu. Antena merupakan salah satu sub-sistem penting dalam perangkat DF. Beberapa parameter yang perlu dalam merancang antena DF adalah *bandwidth* (frekuensi kerja), *gain* dan pola radiasi. Bentuk geometri yang *compact* juga merupakan isu karena semakin rendah frekuensi, semakin besar antena. Sistem DF menggunakan berbagai jenis antena seperti yagi, dipole, dan antena parabola. Teknologi mikrostrip dapat membantu pencapaian bentuk geometri *compact*. Antena mikrostrip memiliki ukuran kecil dan ringan. Fabrikasi antena mikrostrip juga mudah dengan biaya rendah [2].

Antena vivaldi dibagi menjadi tiga kategori yaitu antena vivaldi co-planar, antipodal, dan antipodal balans. Gazit memperkenalkan antena vivaldi antipodal sebagai solusi pencatutan dari rancangan antena vivaldi original milik

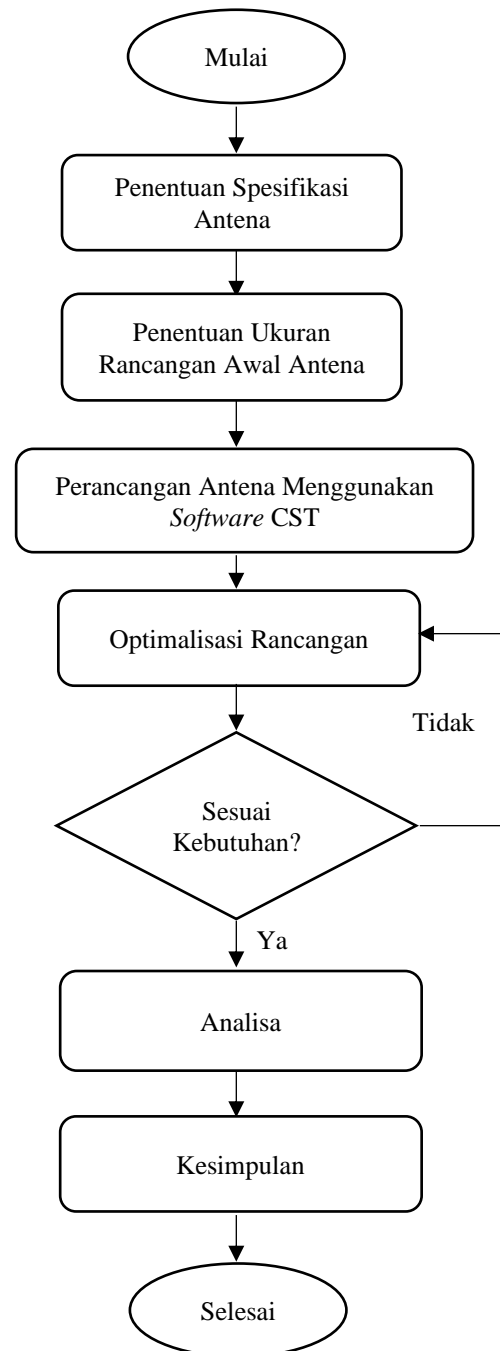
Gibson. Pada tipe ini, satu layer dicetak di bagian atas dari substrat dan layer (lengan) lain dicetak di bagian bawah dengan arah berlawanan. Bagian pencatutan adalah saluran mikrostrip. Gazit merancang transisi dari titik catu ke lengan berdasarkan teori saluran transmisi. Untuk mengurangi pantulan dari saluran mikrostrip ke saluran transisi *twin line*, dipilih ketebalan dari substrat dielektrik sedemikian rupa sehingga lebar saluran mikrostrip dan lebar *twin line* memenuhi impedansi karakteristik  $50\Omega$  [3].

Penelitian beberapa tahun terakhir mulai banyak menggunakan antenna vivaldi antipodal. Verma memodifikasi lengan *Antipodal Vivaldi Antenna* (AVA) konvensional sehingga berbentuk sisir untuk meningkatkan *gain* dan *front-to-back ratio* AVA pada 8-75 GHz [4]. Kahar menambahkan *balun*  $100\ \Omega$  pada *ground* AVA untuk memperoleh pola radiasi yang lebih terarah pada 2-18 GHz. Kahar melakukan optimalisasi parameter panjang, lebar, dan jarak antara dua *strip balun* agar *balun* sesuai dengan saluran transmisi  $50\ \Omega$  [5]. Tayebi memodifikasi lengan AVA konvensional sehingga berbentuk *tapered triangular corrugated edge* (TTCE) untuk mengurangi *side lobes* pada 1.3-44 GHz [6]. Tangwachirapan merancang AVA 1.8-12 GHz dengan *square dielectric lens* untuk meningkatkan *gain* antenna pada frekuensi tinggi tanpa struktur yang rumit [7]. Xiaoyan memodifikasi lengan AVA konvensional dengan frekuensi kerja 800 MHz- 20 GHz sehingga berbentuk *sinusoidal* dan *sinusoidal-elliptical* untuk meningkatkan kinerja antenna pada frekuensi bawah (rendah). Kedua AVA modifikasi memiliki parameter  $S_{11}$  yang lebih baik dari pada AVA konvensional [8].

Penelitian-penelitian sebelumnya memperlihatkan bahwa AVA merupakan antenna yang memiliki *bandwidth* yang sangat lebar dengan pola radiasi *directional* dan *bidirectional*. Antena ini sesuai dengan *directional finder* yang bekerja pada frekuensi lebar dan membutuhkan elemen tunggal antenna dengan pola radiasi *directional* seperti antenna yagi [9] atau *bidirectional* seperti antenna dipole [10]. Oleh karena itu, penelitian ini akan mengembangkan rancangan antenna vivaldi antipodal dengan ukuran *compact* yang bekerja pada frekuensi 2-18 GHz untuk *radio direction finder*.

## 2. Metoda Penelitian

Gambar 1 merupakan tahapan perancangan antenna. Tahapan pertama adalah penentuan spesifikasi antenna vivaldi antipodal agar sesuai dengan kebutuhan *direction finder*. Tabel 1 merupakan parameter spesifikasi antenna.



Gambar 1. Diagram Alir Perancangan Antena

Tabel 1. Spesifikasi Bahan Antena

Parameter	Nilai
$S_{11}$	-10 dB
Bandwidth	16 GHz
Frekuensi Kerja	2-18 GHz
Gain Rata- Rata	4 dB

Tabel 2. Spesifikasi Bahan Antena

Parameter	Nilai
Substrat	FR-4
Konstanta dielektrik ( $\epsilon_r$ )	4.6
Ketebalan Substrat ( $h$ )	1.6 mm
Konduktor ( <i>patch</i> )	Copper ( <i>annealed</i> )
Konstanta dielektrik ( $\epsilon_r$ )	1
Ketebalan konduktor ( $h_p$ )	0.035 mm

Setelah memperoleh spesifikasi, tahapan selanjutnya adalah pemilihan bahan antena. Hal ini akan mempengaruhi ukuran antena. Perancangan ini menggunakan bahan FR-4 Epoxy untuk substrat dan konduktor tembaga untuk *patch* dikarenakan harga yang rendah dan banyak di pasaran. Tabel 2 merupakan tabel spesifikasi bahan antena.

Tahapan selanjutnya adalah penentuan dimensi rancangan awal antena berupa lebar ( $W$ ) dan panjang *patch* ( $L$ ), jarak tepi substrat ke saluran transmisi ( $R_1$  dan  $R_2$ ), jarak lengkungan *patch* ke saluran transmisi ( $RS_2$ ), serta lebar ( $w_f$ ) dan panjang saluran transmisi ( $L_f = \frac{\lambda_g}{4}$ ) pada Gambar 2.

Penentuan ukuran-ukuran tersebut menggunakan persamaan berikut [11] :

$$W = L = \frac{c}{2fl} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (1)$$

$$R_1 = \frac{W}{2} + \frac{w_f}{2} \quad (2)$$

$$R_2 = \frac{W}{2} - \frac{w_f}{2} \quad (3)$$

$$R_{S2} = \frac{R_2}{2} \quad (4)$$

Penentuan  $w_f$  menggunakan persamaan berikut [12]:

$$\epsilon_{r_{eff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{h}{W}}} \quad (5)$$

$$Z_c = \begin{cases} \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{r_{eff}}}} \ln \left[ \frac{8h}{W_0} + \frac{W_0}{4h} \right] & , \frac{W_0}{h} \leq 1 \\ \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{r_{eff}} \left[ \frac{W_0}{h} + 1.393 + 0.667 \ln \left( \frac{W_0}{h} + 1.444 \right) \right]}} & , \frac{W_0}{h} > 1 \end{cases} \quad (6)$$

Penentuan  $L_f$  menggunakan persamaan (7) dan (8)

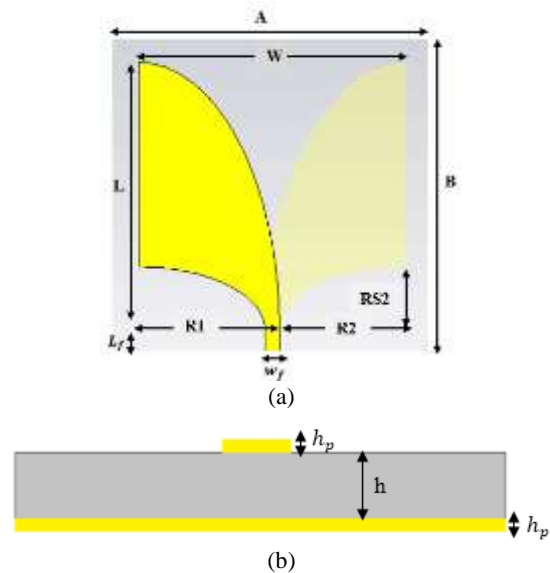
$$\lambda_g = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_r}} \quad (7)$$

$$L_f = \frac{\lambda_g}{4} \quad (8)$$

Perancangan antena perlu memperhatikan jarak antara antara *patch* dan sisi substrat karena adanya *fringing effect* agar antena bekerja maksimal. Penentuan jarak antara *patch* dan sisi substrat menggunakan persamaan berikut

$$\frac{\Delta L}{h} = 0.412 \frac{(\epsilon_{r_{eff}} + 0.3) \left( \frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{r_{eff}} + 0.258) \left( \frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad (9)$$

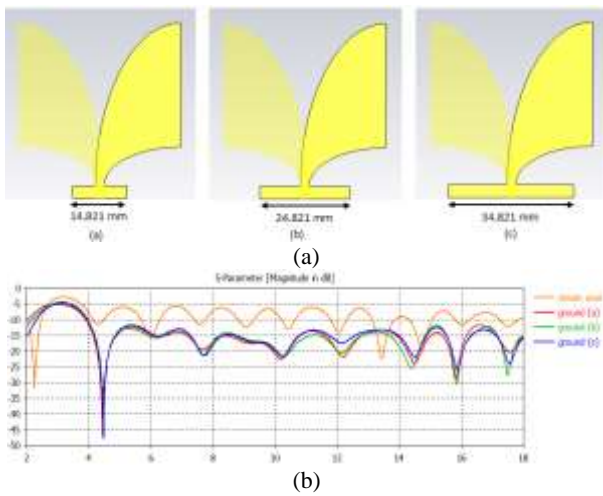
Gambar 2(a) menampilkan rancangan awal antena vivaldi antipodal tampak depan. Gambar 2(b) menampilkan rancangan awal antena tampak samping dengan rincian ukuran pada Tabel 3.



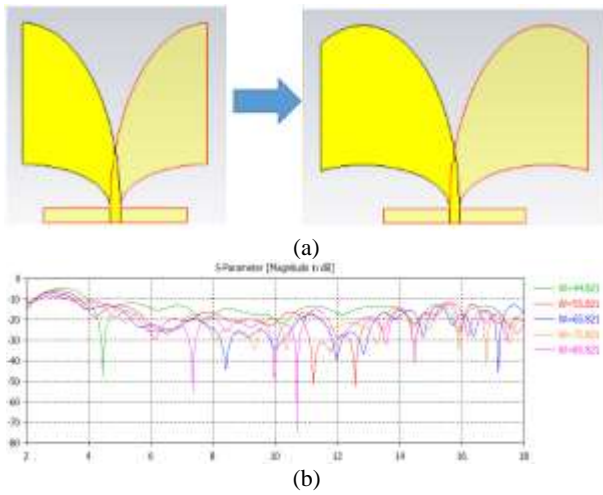
Gambar 2. Rancangan Awal Antena Vivaldi Antipodal (a) tampak depan; (b) tampak samping)

Tabel 3. Ukuran Rancangan Awal Antena

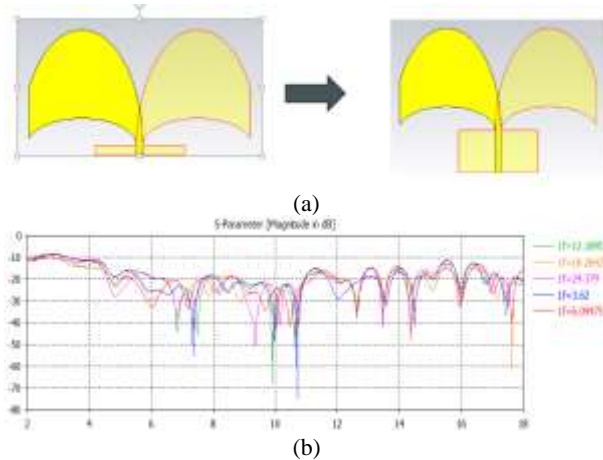
Parameter	Nilai
$W$	44.821 mm
$L$	44.821 mm
$w_f$	2.43 mm
$L_f$	3.62 mm
$R_1$	23.6255 mm
$R_2$	21.1955 mm
$R_{S2}$	10.59775 mm.
$h_p$	0.035 mm
$h$	1.6 mm
$A$	53.14 mm
$B$	48.441 mm



Gambar 3. (a) Modifikasi Ground; (b)  $S_{11}$



Gambar 4. (a) Optimalisasi Lebar Lengan; (b)  $S_{11}$



Gambar 5. (a) Optimalisasi Panjang Saluran Transmisi; (b)  $S_{11}$

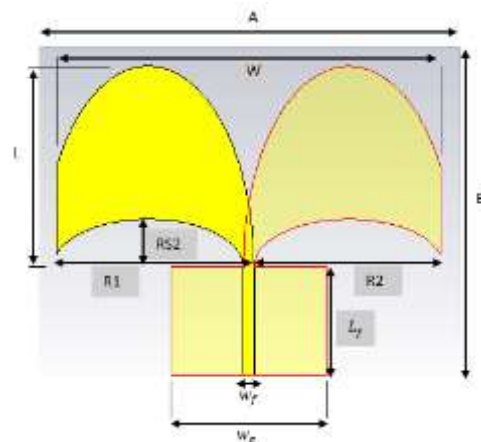
Setelah memperoleh rancangan awal, tahapan selanjutnya adalah optimalisasi rancangan untuk memenuhi spesifikasi. Optimalisasi rancangan berupa modifikasi *ground*, penambahan lebar lengan, dan penambahan panjang saluran transmisi.

Gambar 3(a) merupakan optimalisasi pertama, yaitu modifikasi lebar *ground*. Gambar 3(b) menampilkan grafik  $S_{11}$  rancangan awal dan modifikasi *ground*. Modifikasi *ground* menunjukkan penambahan lebar *ground* menurunkan  $S_{11}$ . Penurunan nilai  $S_{11}$  berarti menambah *bandwidth* antenna. *Ground* (c) dengan lebar sebesar 34.821 mm menghasilkan grafik  $S_{11}$  terbaik dimana hanya pada frekuensi 2.32-3.96 GHz saja (*bandwidth* sebesar 1.64 GHz)  $S_{11}$  tidak memenuhi  $\leq -10$  dB.

Gambar 4(a) merupakan optimalisasi lebar lengan pada rancangan antenna dengan *ground* (c). Pemilihan metode penambahan lebar lengan dikarenakan nilai  $S_{11}$  hasil modifikasi *ground* yang tidak terpenuhi adalah pada frekuensi bawah. Secara teori, semakin rendah frekuensi kerja maka dimensi antenna semakin besar. Gambar 4(b) menunjukkan bahwa penambahan lebar lengan antenna menurunkan nilai  $S_{11}$  pada frekuensi 2-4 GHz. Lebar lengan 85.821 mm menghasilkan grafik  $S_{11}$  terbaik dimana hanya pada frekuensi 2.43-3.33 GHz atau sekitar 0.9 GHz saja yang tidak memenuhi spesifikasi  $S_{11} \leq -10$  dB.

Optimalisasi berikutnya adalah pada panjang saluran transmisi. Gambar 5(a) menunjukkan optimalisasi dengan cara penambahan panjang saluran. Gambar 5(b) menunjukkan bahwa penambahan panjang saluran transmisi menggeser grafik  $S_{11}$  ke frekuensi rendah atau grafik bergeser ke kiri. Panjang saluran transmisi 24.379 mm memberikan hasil terbaik dimana antenna vivaldi yang dirancang memenuhi spesifikasi  $S_{11} \leq -10$  dB pada frekuensi kerja 2-18 GHz.

Gambar 6 merupakan rancangan akhir antenna vivaldi antipodal dengan rincian ukuran pada Tabel 4.



Gambar 6. Rancangan Akhir Antena

Tabel 4. Ukuran Rancangan Akhir Antena

Parameter	Nilai
$W$	85.821 mm
$L$	44.4821 mm
$w_f$	2.43 mm
$L_f = \lambda_g/4$	24.379 mm
$R_1$	23.6255 mm
$R_2$	21.1955 mm
$R_{S2}$	10.59775 mm
$w_g$	34.821 mm
$A$	94.14 mm
$B$	73.2 mm

### 3. Hasil dan Pembahasan

Tabel 5 menampilkan perbandingan nilai parameter hasil simulasi rancangan awal dan rancangan akhir (setelah optimalisasi) berupa nilai parameter  $S_{11}$ , VSWR,  $bandwidth$ , dan  $gain$  rata-rata.

Suatu antena memiliki kinerja baik jika nilai  $S_{11} \leq -10$  dB [12]. Semakin besar  $S_{11}$ , pemancar akan menerima sinyal pantulan yang semakin banyak sehingga pemancar menjadi tidak stabil. Dengan  $S_{11} \leq -10$  dB, kinerja antena dalam mentransmisikan sinyal semakin baik. Gambar 7 menampilkan grafik  $S_{11}$  antena sebelum dan setelah optimalisasi. Rancangan antena awal (sebelum optimalisasi) memenuhi  $S_{11} \leq -10$  dB pada beberapa titik frekuensi dengan frekuensi kerja terbaik ( $bandwidth$  terlebar) pada 17.1 GHz-18 GHz. Kisaran nilai  $S_{11}$  antena sebelum optimalisasi adalah -2.4391982 dB hingga -50.004125 dB. Setelah optimalisasi, antena memenuhi spesifikasi  $S_{11} \leq -10$  dB pada 2 GHz - 18 GHz dengan kisaran  $S_{11}$  -49.6782 dB hingga -10.022357 dB.

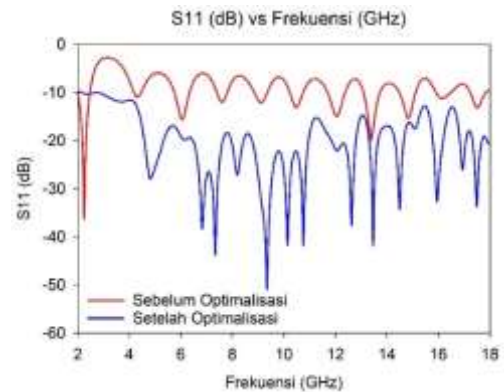
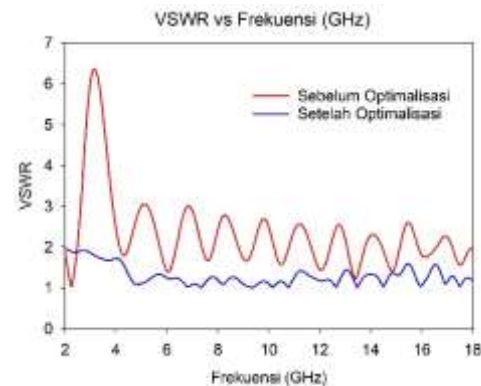
Tabel 5. Perbandingan Nilai Paramter Rancangan Antena Awal dan Akhir

Parameter	Rancangan Awal	Rancangan Akhir
$S_{11}$	-50.004125 dB hingga -2.4391982 dB	-49.6782 dB hingga -10.022357 dB
VSWR	1.0063416 hingga 7.1686647	1.0066947 hingga 1.9248251
Bandwidth	0.9 GHz	16 GHz
Frekuensi Kerja	17.1-18 GHz	2-18 GHz
Gain Rata- Rata	4 dBi	5.1558 dBi

Berkaitan dengan  $S_{11}$ , VSWR merupakan cara lain untuk menentukan kualitas kinerja antena. VSWR ideal bernilai 1 yang berarti pemancar tidak akan menerima sinyal pantulan sehingga pemancar bekerja dengan stabil. Namun, suatu antena akan tetap memiliki kinerja baik jika nilai  $VSWR \leq 2$  [12].

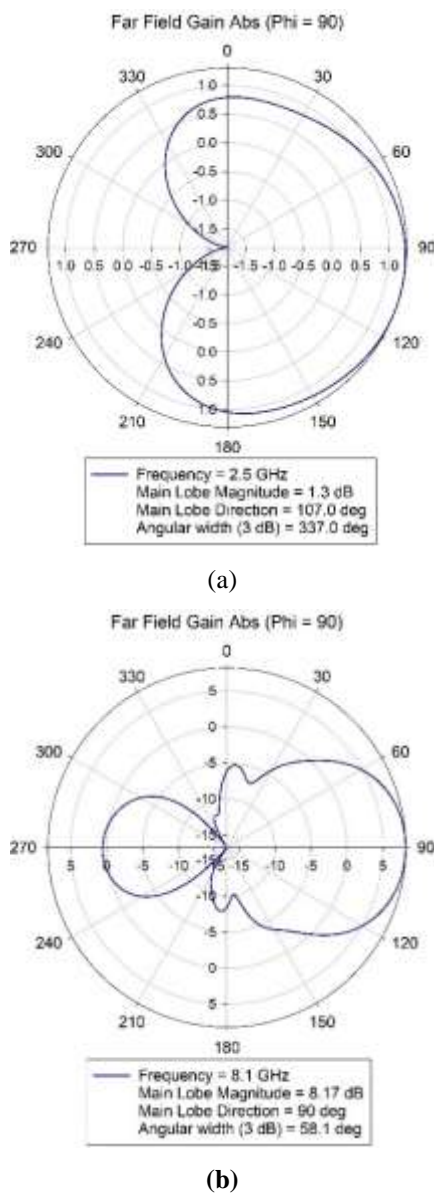
Gambar 8 menampilkan perbandingan grafik VSWR antena sebelum dan setelah optimalisasi. Antena sebelum optimalisasi memenuhi  $VSWR \leq 2$  di beberapa titik frekuensi seperti 17.1 GHz hingga 18 GHz. Kisaran nilai VSWR antena sebelum optimalisasi adalah 1.0063416 hingga 7.1686647. Setelah optimalisasi, antena memenuhi spesifikasi  $VSWR \leq 2$  pada 2 GHz- 18 GHz dengan kisaran VSWR 1.0066947 hingga 1.9248251.

$Bandwidth$  adalah lebar pita frekuensi saat antena memiliki kinerja baik atau memenuhi spesifikasi  $S_{11} \leq -10$  dB atau  $VSWR \leq 2$ . Berdasarkan Gambar 7 dan Gambar 8, rancangan antena awal bekerja pada 17.1 GHz- 18 GHz atau memiliki  $bandwidth$  sebesar 0.9 GHz. Sedangkan rancangan antena akhir bekerja pada 2GHz- 18 GHz atau memiliki  $bandwidth$  sebesar 16 GHz.  $Bandwidth$  rancangan antena akhir 17.78 kali lebih lebar dari  $bandwidth$  rancangan antena akhir.

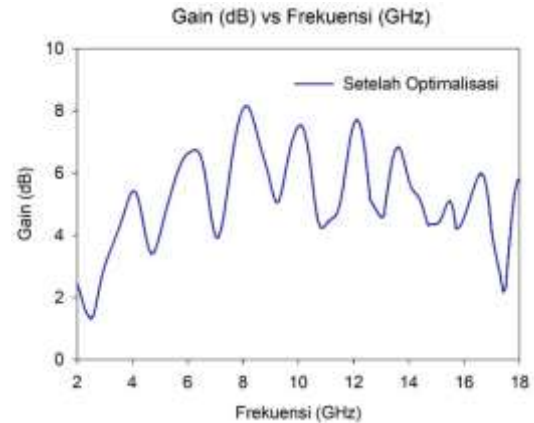
Gambar 7.  $S_{11}$  (dB) Antena Sebelum dan Setelah Optimalisasi

Gambar 8. VSWR Antena Sebelum dan Setelah Optimalisasi

Gambar 9(a) menampilkan informasi pola radiasi rancangan antenna setelah optimalisasi pada frekuensi 2.5 GHz. Gambar 9(b) menampilkan informasi pola radiasi rancangan antenna pada frekuensi 8.1 GHz. Pola radiasi pada frekuensi 2.5 GHz bersifat *directional* dengan *half power beamwidth* (HPWB) sebesar  $377^\circ$ . Pola radiasi pada frekuensi 8.1 GHz bersifat *bidirectional* dengan HPBW sebesar  $58.1^\circ$ . Pola radiasi sesuai untuk sistem DF. HPBW yang lebih sempit menjadikan antenna memiliki *gain* yang lebih tinggi sehingga bisa memancarkan sinyal lebih jauh. Antenna setelah optimalisasi memiliki *gain* maksimum sebesar 8.17 dB pada frekuensi 8.1 GHz dan *gain* minimum sebesar 1.3 dB pada frekuensi 2.5 GHz.



**Gambar 9. Pola Radiasi Antena Vivaldi Antipodal Setelah Optimalisasi pada Frekuensi (a) 2.5 GHz; (b) 8.1 GHz**



**Gambar 10. Gain Antena Vivaldi Antipodal Setelah Optimalisasi**

Gambar 10 menampilkan informasi *gain* antenna setelah optimalisasi pada frekuensi 2 GHz- 18 GHz. *Gain* rata-rata antenna setelah optimalisasi adalah sebesar 5.1558 dB. Nilai ini melebihi nilai spesifikasi (4 dB).

#### 4. Kesimpulan

Rancangan antenna vivaldi antipodal merupakan hasil optimalisasi ground, lebar lengan, dan panjang saluran transmisi. Penambahan lebar ground menurunkan nilai parameter  $S_{11}$  pada frekuensi 4-18 GHz. Penambahan lebar lengan menurunkan nilai parameter  $S_{11}$  pada frekuensi bawah 2-4 GHz. Penambahan panjang saluran transmisi menggeser grafik  $S_{11}$  ke frekuensi bawah sehingga rancangan antenna memenuhi spesifikasi  $S_{11}$  pada frekuensi kerja 2-18 GHz.

Rancangan antenna vivaldi antipodal telah memenuhi spesifikasi *direction finder* pada frekuensi 2-18 GHz. Parameter  $S_{11}$  memiliki rentang -49.95378 dB hingga -10.022357 dB. Parameter VSWR memiliki rentang 1.0066947 hingga 1.9248251. Parameter *bandwidth* sebesar 16 GHz, 17.78 kali lebih lebar dari pada *bandwidth* sebelum optimalisasi (0.9 GHz). Pola radiasi bersifat *directional* pada frekuensi bawah (2.5 GHz) dan *bidirectional* pada frekuensi atas (8.1 GHz). HPBW *bidirectional* ( $58.1^\circ$ ) lebih sempit dibanding *directional* ( $377^\circ$ ). Parameter *gain* rata-rata sebesar 5.1558 dB dengan *gain* minimum 1.3 dB pada 2.5 GHz dan *gain* maksimum 8.17 dB pada 8.1 GHz.

#### Daftar Acuan

- [1] R. T. Krishnamachari, Dawn of the E-Bomb: High-Power Microwave Technology and Military Implications for India, South Asia Analysis Group, New York, 2004.

- [2] S. K, "Method of Design Microstrip Antennas for Modern Applications," Aristotle University of Thessaloniki, Thessaloniki, 2011.
- [3] G. Ehd, "Improved Design of Vivaldi Antenna," *IEEE Proceedings H (Microwaves, Antennas and Propagation)*, vol. 135, no. 2, pp. 89-92, April 1988.
- [4] N. Verma, P. Dalal dan N. Pratul, "Design of Compact Antipodal Vivaldi Antenna on 250  $\mu\text{m}$  and 500  $\mu\text{m}$  Polycarbonate over Wide Frequency Range," dalam *2019 6th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN)*, Noida, 2019.
- [5] M. Kahar, J. Mandal dan M. K. Mandal, "A Compact Vivaldi Antenna with Microstrip Feed Line for the 2-18 GHz Ultra-Wideband Applications," dalam *2015 IEEE Applied Electromagnetics Conference (AEMC)*, Guwahati, 2015.
- [6] M. Tayebi, A. A. Dastranj dan A. Alighanbari, "Ultra Wide Band Antipodal Vivaldi Antenna with Tapered Triangular Corrugated Edges," dalam *27th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE2019)*, Yazd, 2019.
- [7] S. Tangwachirapan, W. Thaiwirot dan P. Akkaraekthalin, "Design of Ultra-Wideband Antipodal Vivaldi Antenna with Square Dielectric Lens for Microwave Imaging Applications," dalam *2019 7th International Electrical Engineering Congress (iEECON)*, Hua Hin, 2019.
- [8] X. Li dan Y. Zhang, "Modified Antipodal Vivaldi Antenna with Elliptical and Sinusoidal-Shaped Loads," dalam *2018 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT)*, Chengdu, 2018.
- [9] J. Tamura dan H. Arai, "A Planar Direction-Finding Antenna with Reconfigurable Circuit for Scan Range Extension," dalam *2021 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*, Taipei, 2021.
- [10] K. N. J. Purwanto, A. Yahya dan N. H. H. Khamis, "Development of Radio Direction Finder using 6 Log Periodic Dipole Array Antennas," dalam *2018 5th International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering (ICITACEE)*, Semarang, 2018.
- [11] F. Jolani dan G. R. Dadashzadeh, "Design and Optimization of Compact Balanced Antipodal Vivaldi Antenna," *Progress in Electromagnetic Research (PIER) C*, vol. 9, pp. 183-192, 2009.
- [12] C. A. Balanis, *Antenna Theory : Analysis and Design* Third Edition, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2005.