

Evaluasi *Mutual Coupling* pada Antena Vivaldi Antipodal untuk Aplikasi *Ground Penetrating Radar* (GPR)

Novalia Pertiwi^{1*}, Rifqi D. Candra¹, Septiya Ardilla¹, Muhammad Ramadhan¹, Sitronella N. Hasyim¹, Aji P. T. Nurchayo¹, Anggrit D. Y. Pinangkis¹, Muhammad R. Hikmatullah¹, N. Nurhayati²

¹Program Studi Teknik Telekomunikasi, Fakultas Teknologi Industri, Institut teknologi Sumatera, Lampung Selatan 35365

²Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya, Surabaya 60231

^{1*}novalia.pertiwi@tt.itera.ac.id

¹rifqi.120400012@student.itera.ac.id

¹muhammad.120400022@student.itera.ac.id

¹septiya.120400044@student.itera.ac.id

¹sitronella.hasim@tt.itera.ac.id

¹aji.nurchayo@tt.itera.ac.id

¹anggrit.pinangkis@tt.itera.ac.id

¹muhammad.hikmatullah@tt.itera.ac.id

²nurhayati@unesa.ac.id

Intisari — Makalah ini melaporkan evaluasi *mutual coupling* pada susunan Antena Vivaldi Antipodal (AVA) untuk aplikasi GPR. Konfigurasi antena yang digunakan adalah array 3 elemen dengan model *H-Plane*. Tujuan dari penelitian ini adalah mengurangi efek *mutual coupling* dengan teknik *corrugation* dan *parasitic* yang terdiri atas 4 variasi percobaan. Masing-masing dari 4 variasi percobaan melibatkan peletakan *corrugation* serta kombinasi *corrugation* dan *parasitic*. Percobaan ke II adalah hasil terbaik dari kombinasi *corrugation* dan *parasitic* dalam meminimalkan *mutual coupling*. Selanjutnya difabrikasi serta dilakukan pengukuran. Hasil *mutual coupling* yang diperoleh antara simulasi dan pengukuran tidak jauh berbeda yaitu -24,129 dB dan -23,211 dB, dimana mampu mengurangi nilai *mutual coupling* sekitar 3 dB terhadap desain awal. Nilai *Bandwidth* yang dihasilkan cukup lebar sekitar 306 MHz dari target awal 60 MHz, namun nilai ini mengalami penurunan terhadap desain awal. Sedangkan nilai *Gain* yang diperoleh adalah 6,38 dBi dan pola radiasi yang dihasilkan adalah direksional pada $\phi = 90^\circ$ sudah memenuhi spesifikasi yang diinginkan. Oleh karena itu, desain antena ini dapat diterapkan untuk aplikasi GPR.

Kata kunci — *Ground Penetrating Radar* (GPR), *Mutual coupling*, *Corrugations*, *Parasitic*, Antena Vivaldi Antipodal (AVA)

Abstract — The evaluation of mutual coupling in an Antipodal Vivaldi Antenna (AVA) array for Ground Penetrating Radar (GPR) applications is reported in this paper. The antenna configuration used is a 3-element array with an H-Plane model. The objective of this research was set to reduce the mutual coupling effect using corrugation and parasitic techniques, which were divided into 4 experimental variations. Each of the 4 experimental variations involved the placement of corrugation and the combination of corrugation and parasitic elements. Experiment II was identified as the best result from the combination of corrugation and parasitic elements, which was further fabricated and measured. The mutual coupling results obtained from simulations and measurements were found to be relatively similar, with values of -24.129 dB and -23.211 dB, respectively, achieving a reduction of approximately 3 dB compared to the initial design. The bandwidth value obtained was measured at approximately 306 MHz, exceeding the initial target of 60 MHz, but was observed to decrease compared to the initial design. Meanwhile, the gain value was measured at 6.38 dBi, and the radiation pattern produced was directional at $\phi = 90^\circ$, fulfilling the desired specifications. Therefore, this antenna design can be applied to GPR applications.

Keywords — *Ground Penetrating Radar* (GPR), *Mutual coupling*, *Corrugations*, *Parasitic*, Antipodal Vivaldi Antenna (AVA)

I. PENDAHULUAN

Teknologi radar telah mengalami perkembangan signifikan dan diaplikasikan dalam berbagai bidang, termasuk *Ground Penetrating Radar* (GPR). GPR merupakan jenis radar untuk mendeteksi suatu objek di bawah tanah dengan memanfaatkan pantulan dari gelombang elektromagnetik. GPR telah banyak digunakan untuk berbagai aplikasi penting seperti survei dasar gletser [1], deteksi objek linear [2], deteksi ranjau [3], dan lain-lain. Dalam bidang telekomunikasi, GPR berperan penting dalam pemetaan dan identifikasi jaringan utilitas bawah tanah, seperti kabel serat optik dan saluran komunikasi lainnya [4,5]. Dengan menggunakan GPR, perusahaan telekomunikasi dapat mengidentifikasi lokasi infrastruktur bawah tanah dengan akurasi tinggi, sehingga meminimalkan risiko kerusakan saat melakukan penggalian atau perbaikan. Antena dengan efisiensi dan penguatan yang tinggi diperlukan untuk mengatasi tantangan ini. Antena yang cocok untuk aplikasi GPR ini diantaranya adalah jenis Vivaldi, log-periodik, sinuous, dan *bow-tie*. Diantara jenis antena tersebut, Vivaldi sering digunakan karena memiliki *bandwidth* yang lebar dan direktivitas yang tinggi. Keunggulan lainnya adalah mampu dalam mewujudkan *gain*, *beamwidth*, dan *beam scanning* yang diinginkan, serta praktis jika dibuat dalam bentuk array.

Antena Vivaldi pertama kali di usulkan oleh Gibson [7]. Seperti yang diketahui, antenna Vivaldi dapat berupa koplanar atau antipodal [7,8]. Antena Vivaldi, dengan desain *slot tapered*, telah menjadi komponen kritis dalam sistem komunikasi nirkabel modern karena kemampuannya bekerja pada rentang frekuensi ultra-lebar (*ultra-wideband*). Pada konfigurasi koplanar, kedua elemen konduktif (*slot*) dirancang pada sisi yang sama dari substrat dielektrik, dengan *feed* menggunakan *coplanar waveguide* (CPW). Struktur ini memudahkan fabrikasi karena hanya melibatkan satu lapisan cetak, namun berpotensi menimbulkan *mutual coupling* antar-*slot*. Sementara itu, desain antipodal menempatkan konduktor pada dua sisi berlawanan substrat dengan pola *taper*

eksponensial yang simetris. Meski memerlukan presisi tinggi dalam penyelarasan lapisan, konfigurasi antipodal mampu menghasilkan transisi impedansi yang lebih halus, sehingga cenderung memiliki *bandwidth* lebih lebar dan polarisasi silang (*cross-polarization*) yang lebih rendah dibandingkan koplanar. Fokus utama pada penelitian ini adalah Antena Vivaldi Antipodal untuk aplikasi GPR.

Upaya realisasi antena Vivaldi dengan *bandwidth* yang lebar dan dimensi diminimalkan telah dilakukan melalui beberapa studi [9]-[11]. Namun, efisiensi antena ditemukan dapat berkurang pada antena berukuran kecil, sementara nilai *return loss* di atas 10 dB hampir tidak tercapai pada frekuensi terendah. Meskipun penggunaan elemen berkurang lebih kecil dalam susunan antena mampu menekan *grating lobes* pada frekuensi tinggi, jarak antar-elemen yang kurang dari setengah panjang gelombang frekuensi terendah dapat menyebabkan peningkatan *mutual coupling*. Kondisi ini kemudian berpotensi menurunkan kualitas pola radiasi dan nilai *return loss* secara signifikan.

Mutual coupling merupakan sebuah interaksi elektromagnetik yang terjadi pada antena yang disebabkan oleh pencatu antar elemen antena yang saling berdekatan. Efek dari *mutual coupling* ini akan mempengaruhi kinerja dan parameter antena seperti merubah pola radiasi, *gain*, dan *return loss*. Hal ini menyebabkan penurunan efisiensi dan performansi dari antena [12]. Berbagai teknik reduksi *mutual coupling* telah dieksplorasi untuk menyempurnakan kinerja AVA. Teknik-teknik ini mencakup fitur seperti *corrugations*, lensa dielektrik, AVA fraktal, *parasitic patch*, metamaterial, *array*, serta integrasinya dalam sistem GPR [13]-[15]. Dalam literatur, beragam bentuk *parasitic patch*, termasuk *elips*, segitiga, berlian, trapesium, dan lingkaran, telah diteliti [16,17]. Meskipun analisis *mutual coupling* pada *array* AVA telah dilakukan dalam [18], parameter seperti *return loss* untuk tiap elemen serta *mutual coupling* belum dikaji secara komprehensif.

Dengan demikian, kontribusi utama dari penelitian ini difokuskan pada kajian *mutual coupling* serta upaya pengurangannya melalui penerapan teknik *corrugations* dan *parasitic* pada AVA berjumlah terbatas. Penggunaan metode *corrugation* pada AVA pada struktur *H-Plane* yang dikombinasi dengan teknik *parasitic* guna untuk membantu evaluasi *mutual coupling* karena penggunaan *parasitic* telah terbukti dapat meningkatkan parameter *gain* dan *directivity*.

II. MUTUAL COUPLING PADA ANTENA VIVALDI ANTIPODAL (AVA)

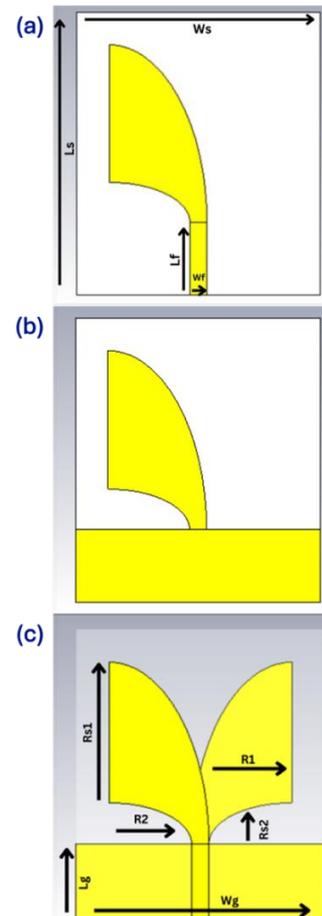
Elemen AVA didesain menggunakan *FR4 Epoxy*, konstanta dielektrik 4,4, ketebalan substrat 1,6 mm, dan ketebalan *patch* 0,035 mm. Spesifikasi desain antenna AVA yang diinginkan untuk aplikasi GPR adalah *gain* ≥ 4 *dBi* dan *Bandwidth* adalah 60 MHz. Kemudian dilakukan perhitungan dimensi antenna dengan nilai parameter seperti ditunjukkan pada Tabel 1, selanjutnya dilakukan simulasi menggunakan *software*, dan dihasilkan desain AVA elemen tunggal seperti yang ditunjukkan pada gambar 1.

Selanjutnya, AVA dibuat array 3 elemen, dengan konfigurasi *H-Plane* dengan jarak antar elemen masing-masing sebesar 53,57 mm agar memenuhi target parameter antenna yang diinginkan untuk aplikasi GPR seperti yang ditunjukkan pada gambar 2. Hasil optimasi nilai *mutual coupling* adalah -21.99 dB sebelum dilakukan analisis pengurangan *mutual coupling* seperti yang ditunjukkan pada gambar 3. Terlihat bahwa nilai *mutual coupling* belum cukup optimal pada frekuensi kerja 2,8 GHz, maka perlu dilakukan evaluasi. Sedangkan nilai *Return loss* yang dihasilkan pada desain awal adalah *S11* sebesar -14.96 dB, dimana interferensi masih cukup tinggi. Namun, nilai tersebut sudah memenuhi parameter target yang diinginkan yaitu ≤ -10 dB. Hasil simulasi *return loss* dari desain awal dapat dilihat pada gambar 4.

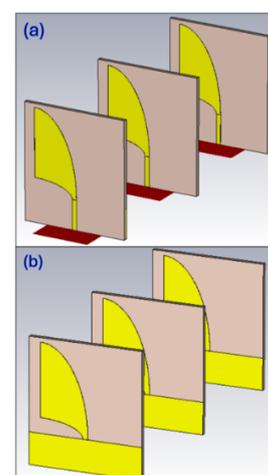
Maka atas dasar tersebut, untuk mengurangi *mutual coupling* pada elemen antenna maka diterapkan teknik *corrugation* dan *parasitic* yang akan dijelaskan lebih detail pada bagian ke III dari jurnal ini.

Tabel 1. Spesifikasi Dimensi AVA

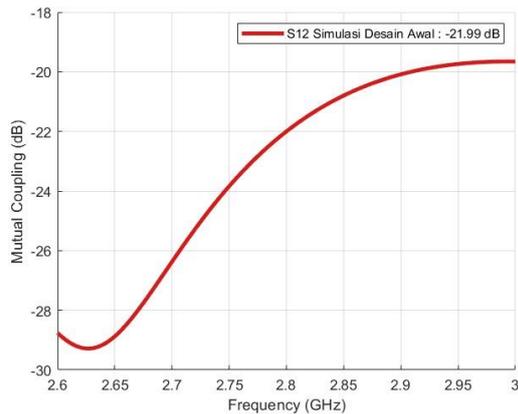
Parameter	Nilai (mm)	Parameter	Nilai (mm)
W_g	42.203	h_s	1.6
L_g	12	h_p	0.035
W_s	42.203	W_p	17.739
L_s	46.9	L_p	34.85
W_f	1.8	R2	15.939
L_f	12	Rs2	5.8



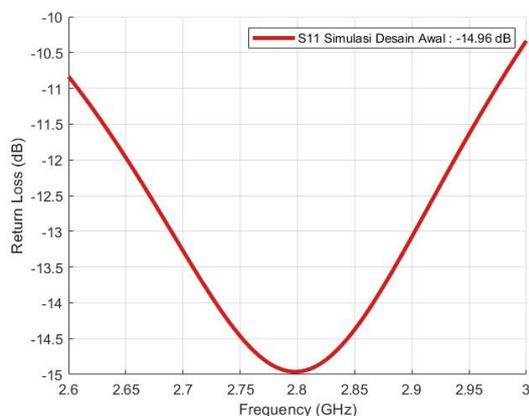
Gbr. 1 Desain AVA elemen tunggal (a) tampak depan, (b) tampak belakang, dan (c) tampak keseluruhan



Gbr. 2 Desain awal AVA Array 3 elemen (a) tampak depan dan (b) tampak belakang



Gbr. 3 Simulasi *Mutual coupling* Desain Awal 3 elemen AVA

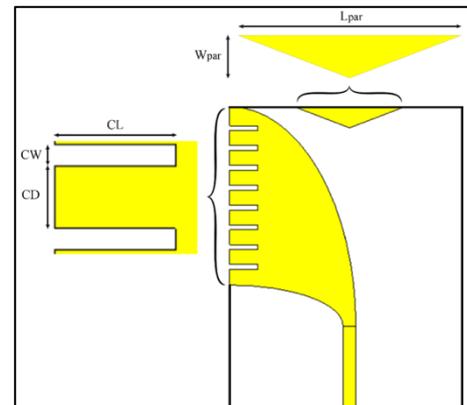


Gbr. 4 Simulasi *Return Loss* Desain Awal 3 elemen AVA

III. PENGURANGAN MUTUAL COUPLING PADA ANTENA VIVALDI ANTIPODAL (AVA)

Pada penelitian ini, kombinasi kedua metode (*corrugation* dan *parasitic*) diuji untuk menganalisis efek sinergisnya terhadap reduksi *mutual coupling*. Namun, sebelum penggabungan, percobaan diawali dengan penerapan *corrugation* secara terpisah. Setelah hasil *corrugation* dievaluasi, *parasitic* kemudian ditambahkan ke desain untuk melihat peningkatan isolasi antar-elemen. Dapat dilihat pada Gambar 5 merupakan struktur dimensi dari *corrugation* dan *parasitic* yang digunakan. Dimana CL adalah panjang *corrugation*, CW adalah lebar *corrugation*, dan untuk jarak antar *corrugation* adalah CD. Lalu untuk *parasitic*, L_{par} adalah panjang *parasitic*, dan W_{par} adalah lebar *parasitic*.

Nilai dimensi *corrugation* dan *parasitic* yang digunakan pada penelitian kali ini dapat dilihat pada Tabel 2 berikut.



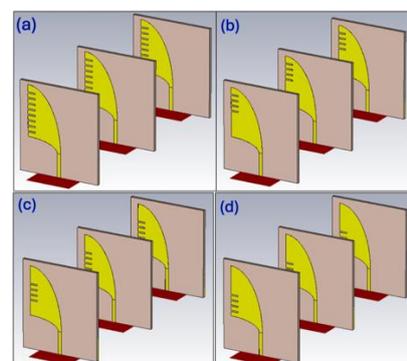
Gbr. 5 Struktur dimensi *corrugation* dan *parasitic*

Tabel 2. Dimensi *Corrugation* dan *Parasitic*

Parameter	Nilai (mm)
Panjang <i>Corrugation</i> (CL)	4
Lebar <i>Corrugation</i> (CW)	0.7
Jarak antar <i>Corrugation</i> (CD)	2.1
Panjang <i>Parasitic</i> (L_{par})	15.6
Lebar <i>Parasitic</i> (W_{par})	3

A. Desain AVA dengan penambahan *Corrugation*

Corrugation atau kerutan berarti *slot* berulang, berjarak sama, dan berbentuk sama sengaja ditambahkan di sepanjang tepi antena Vivaldi antipodal, biasanya pada bagian *slot* eksponensial atau di tepi substrat [19]. Kerutan tersebut meningkatkan *gain* dan *return loss* pada AVA. Kerutan persegi panjang bersama dengan *patch* berbentuk *elips* dapat meningkatkan direktivitas dan mengurangi nilai *sidelobe* [20].



Gbr. 6 Variasi desain AVA dengan penambahan *Corrugation*

Pada penelitian ini, teknik *corrugation* persegi panjang dengan *patch* berbentuk *elips* diterapkan pada AVA array 3 elemen dengan

memvariasikan posisi pelatakan dan jumlah *slot* di sepanjang tepi *patch*. Ada 4 variasi percobaan yaitu *corrugation* terletak di sepanjang *patch*, atas, tengah, dan bawah *patch*.

Variasi ini dilakukan untuk mencari hasil yang paling optimal terhadap evaluasi *mutual coupling* yang dilakukan pada penelitian ini. Pada variasi desain *corrugation* percobaan I dilakukan variasi percobaan dengan meletakkan *corrugation* sebanyak 8 *slot* di bagian pinggir sepanjang *patch* AVA array 3 elemen seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6 a). Variasi desain *corrugation* Percobaan II dilakukan dengan meletakkan *corrugation* di bagian pinggir atas *patch*. Pada percobaan ini jumlah *corrugation* yang digunakan hanya berjumlah 4 *slot* saja seperti yang ditunjukkan pada gambar 6 b). Pada variasi desain *corrugation* percobaan III ini dilakukan peletakkan *corrugation* pada bagian pinggir tengah *patch*.

Jumlah *corrugation* yang digunakan pada percobaan III ini sama seperti percobaan II, yaitu berjumlah 4 *slot* ditunjukkan pada gambar 6 c). Percobaan terakhir atau pada variasi desain *corrugation* percobaan IV ini dilakukan variasi peletakkan *corrugation* di bagian pinggir bawah *patch*. Jumlah *corrugation* yang digunakan sama seperti percobaan II dan III, yaitu berjumlah 4 *slot* ditunjukkan pada gambar 6 d).

B. Hasil Simulasi AVA dengan penambahan Corugation

1) Mutual coupling

Gambar 7 menunjukkan hasil simulasi *mutual coupling* dari desain AVA array 3 elemen dengan penambahan *corrugation*. Pada percobaan 1 diperoleh *mutual coupling* -21,28 dB, percobaan 2 diperoleh -21,89 dB, percobaan 3 diperoleh -21,73, dan percobaan 4 diperoleh -21,75. Sedangkan hasil simulasi desain awal -21,99 dB. Terlihat dari ke 4 percobaan nilai *mutual coupling* belum mengalami perubahan yang signifikan ketika dibandingkan dengan desain awal pada frekuensi kerja 2,8 GHz. Namun hasil yang diperoleh dari AVA array 3 elemen dengan penambahan *corrugation* masih sesuai dengan target parameter yang diinginkan ($\leq -20\text{dB}$).

2) Return Loss

Gambar 8 menunjukkan hasil simulasi *Return Loss* dengan penambahan *corrugation*. Terlihat dari ke 4 percobaan nilai *return loss* belum mengalami perubahan yang signifikan terhadap desain awal. Perbandingan hasil parameter antara desain awal dengan variasi desain *corrugation*. Parameter *mutual coupling*, *gain* dan *return loss* belum menunjukkan perubahan yang signifikan pada frekuensi kerja 2,8 GHz. Oleh karena itu, penelitian ini dilanjutkan dengan menambahkan metode *parasitic* pada desain agar mendapatkan hasil peningkatan parameter yang lebih optimal. Hasil perbandingan antara desain awal dengan desain variasi percobaan menggunakan *corrugation* dan *parasitic* dapat dilihat pada Tabel 3.

3) Gain dan Pola Radiasi

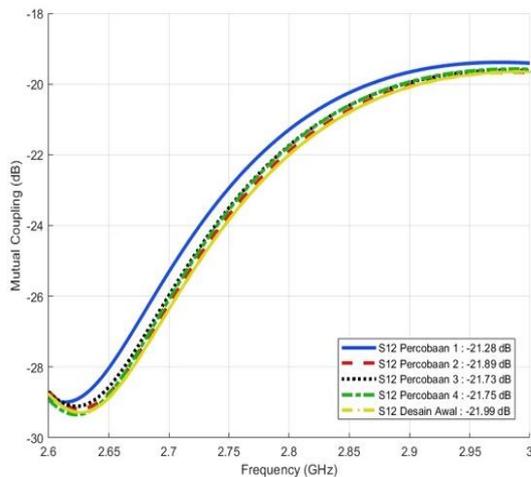
Untuk parameter lainnya yaitu *gain* diperoleh 6,27 dB pada desain AVA dengan *corrugation* seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3. Hasil ini belum menunjukkan perubahan yang signifikan terhadap desain awal. Sedangkan untuk *pola radiasi* dari semua percobaan sudah memenuhi target yaitu direksional kearah phi 90°.

C. Desain AVA dengan penambahan Corugation dan Parasitic

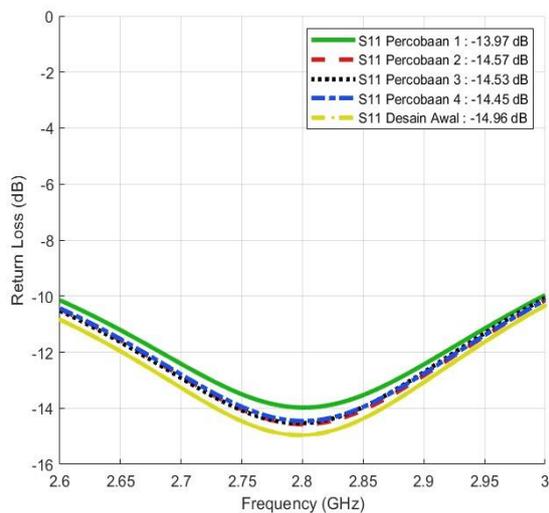
Parasitic patch dirancang di antara dua area AVA. *Parasitic patch* ini berpasangan dengan area radiasi utama untuk memfokuskan berkas radiasi pada arah ujung. Ini memaksimalkan direktivitas dan *gain* AVA [21]. *Parasitic patch* dapat berbentuk berbeda seperti *elips*, *berlian*, *lingkaran*, dll. *Parasitic* berbentuk segitiga sama kaki merupakan bentuk yang baik untuk memusatkan gelombang ke pusat *aperture* antena yang mengakibatkan refleksi yang dihasilkan dari ujung antena berkurang dan membuat direktivitas menjadi meningkat [22].

Gambar 9 merupakan variasi AVA dengan *corrugation* dan *parasitic*. Terdiri atas 4 percobaan dan variasi peletakkan *corrugation* yang sama seperti dengan desain sebelumnya pada gambar 6. Hal yang membedakan variasi ini adalah dengan menambahkan *parasitic* pada bagian atas substrat yang memiliki

ukuran dimensi seperti yang terdapat pada Tabel 5.



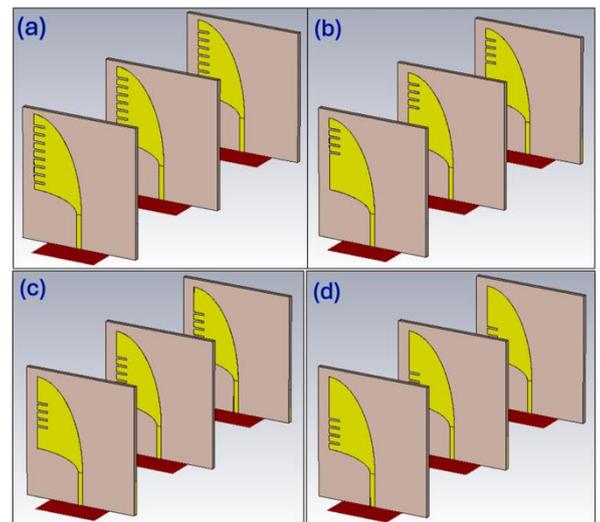
Gbr. 7 Simulasi *Mutual coupling* Desain AVA array 3 elemen dengan *Corrugation*



Gbr. 8 Simulasi *Return loss* Desain AVA array 3 elemen dengan *Corrugation*

Tabel 3 Hasil Perbandingan Antara Desain Awal Dengan Desain Variasi Percobaan Menggunakan *Corrugation*

Par	D. Awal	P. I	P. II	P. III	P. IV
S12 (dB)	-	-21.292	-21.896	-21.737	-21.759
Gain (dBi)	6,21	6.23	6,27	6.25	6.24
S11 (dB)	-	-13.976	-14.569	-14.532	-14.454
Pola Radiasi	<i>Directional</i>	<i>Directional</i>	<i>Directional</i>	<i>Directional</i>	<i>Directional</i>

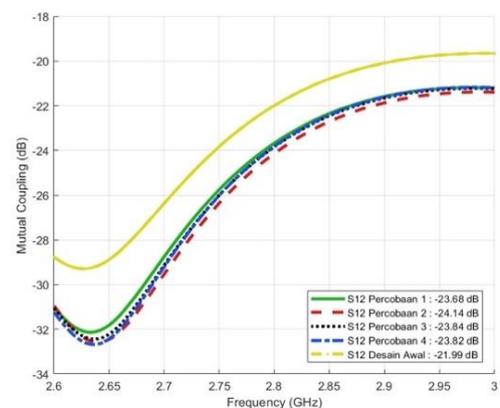


Gbr. 9 Variasi desain AVA array dengan penambahan *Corrugation* dan *Parasitic*

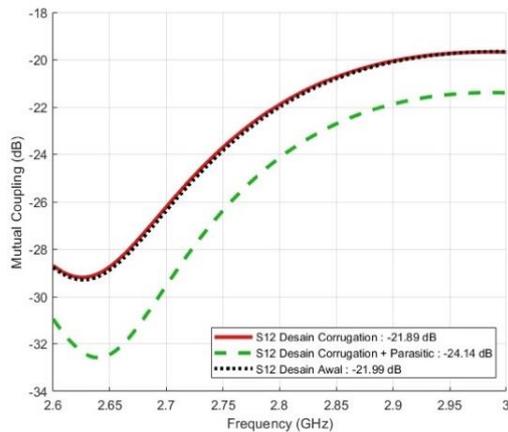
D. Hasil Simulasi AVA dengan penambahan *Corugation* dan *Parasitic*

1) *Mutual coupling*

Pada gambar 10 menunjukkan hasil simulasi *mutual coupling* pada AVA array dengan penambahan *corrugation* dan *parasitic*. Terlihat dari ke 4 percobaan nilai *mutual coupling* cukup baik pada **percobaan ke 2** jika dibandingkan dengan percobaan 1, 3, dan 4 terhadap desain awal pada frekuensi kerja 2,8 GHz seperti yang ditunjukkan pada tabel 4. Hasil simulasi terbaik (percobaan 2) dalam meminimalkan *mutual coupling* sekitar 2,1 dB pada frekuensi kerja 2,8 GHz jika dibandingkan dengan desain awal (tanpa *corrugation* dan *parasitic*) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 11.



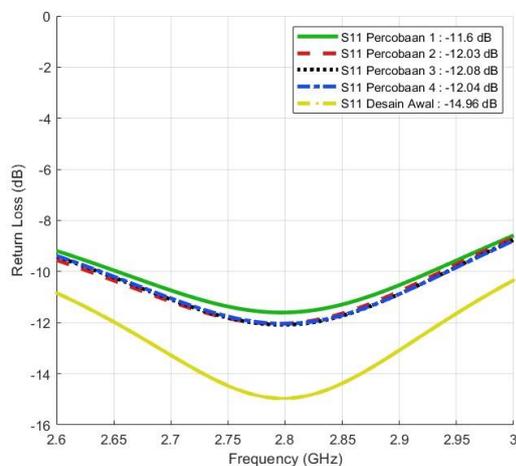
Gbr. 10 Simulasi *Mutual coupling* Desain *Corrugation* dan *Parasitic*



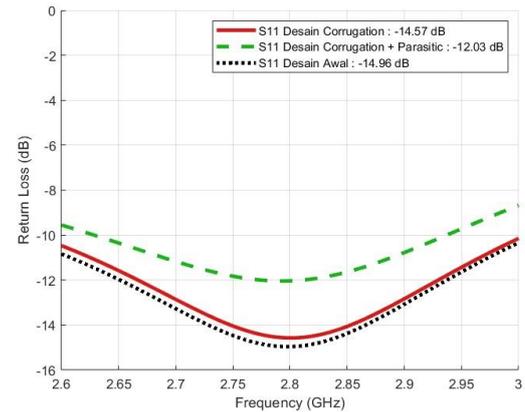
Gbr. 11 Simulasi *Mutual coupling* dari percobaan 2 (terbaik)

2) Return Loss

Pada gambar 12 menunjukkan hasil simulasi *return loss* pada AVA array dengan penambahan *corrugation* dan *parasitic*. Jika dibandingkan dengan hasil *mutual coupling*, *Return loss* menunjukkan tren memburuk (nilai lebih tinggi), tetapi masih dalam batas toleransi (< -10 dB). Pada frekuensi 2,8 GHz, selisih nilai *return loss* S11 percobaan 1 menurun -3,354 dB, percobaan 2 sekitar -2,925 dB, percobaan 3 sekitar -2,877dB, dan percobaan 4 sekitar -2,918 dB terhadap desain awal. Begitu juga untuk nilai S22 dan S23 rata-rata mengalami penurunan nilai sekitar -3 dB. Namun, hasil ini masih memenuhi syarat untuk aplikasi *Ground Penetrating Radar* (GPR), dimana nilai *return loss* ≤ -10 dB pada frekuensi 2,5-3,1 GHz. Untuk hasil simulasi *return loss* dari percobaan 2 dengan nilai *mutual coupling* terbaik, ditampilkan pada gambar 13.



Gbr. 12 Simulasi *Return Loss* Desain *Corrugation* dan *Parasitic* dari 4 percobaan



Gbr.13 Simulasi *return loss* desain percobaan 2 (terbaik)

3) Pola Radiasi

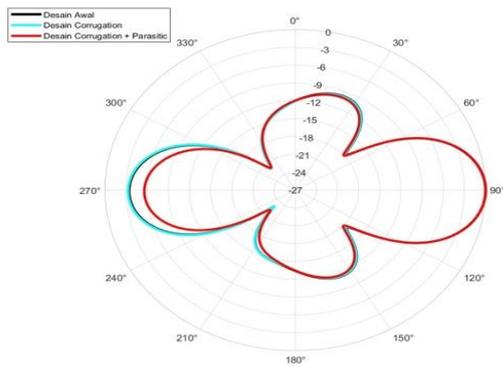
Gambar 14 merupakan hasil plot pola radiasi AVA dengan *corrugation* dan *parasitic* di frekuensi 2,8 GHz untuk semua percobaan yang dibandingkan terhadap percobaan awal (tanpa metode). Hasil pola radiasi yang diperoleh semua direksional di $\phi 90^\circ$.

4) Gain

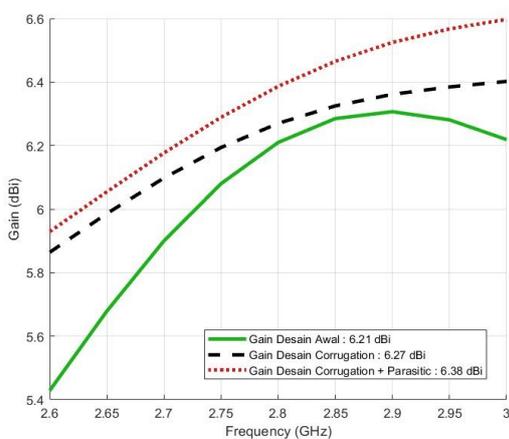
Dari Gambar 15 merupakan hasil plot *Gain* dari simulasi AVA array desain awal, desain *corrugation* serta desain *corrugation* dan *parasitic*. Terlihat bahwa hasil gain terbaik pada percobaan ke 2 dengan nilai gain 6,38 dBi. Selisihnya tidak terlalu signifikan terhadap desain awal dan desain *corrugation*.

5) Bandwidth

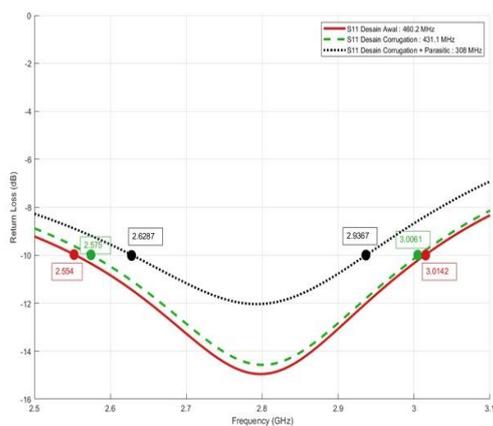
Dari gambar 16 merupakan hasil simulasi *bandwidth* dari AVA array desain awal, desain *corrugation* serta desain *corrugation* dan *parasitic*. Terlihat bahwa hasil *bandwidth* terbaik pada desain awal 460,32 MHz sedangkan dengan penambahan *corrugation* dan *parasitic* menghasilkan nilai 308 MHz. Penurunannya cukup signifikan sekitar 160 MHz terhadap desain awal dan desain *corrugation*. Salah satu penyebabnya adalah rentang frekuensi kerja yang terlalu pendek yaitu antara 2,5 – 3,1 GHz. Namun, nilai tersebut sudah sangat memenuhi target awal yang diinginkan yaitu 60 MHz.



Gbr. 14 Simulasi Pola Radiasi di frekuensi 2,8 GHz, Phi 90° untuk variasi percobaan AVA array dengan *corrugations* dan *parasitic*



Gbr. 15 Simulasi *gain* dari simulasi AVA array desain *corrugation* dan *parasitic*.



Gbr. 16 Simulasi *Bandwidth* dari simulasi AVA

Dari tabel 4, terlihat percobaan 2 adalah desain yang terbaik dari AVA array 3 elemen dengan penambahan *corrugation* dan *parasitic* untuk meminimalkan *mutual coupling*. Oleh karena itu, selanjutnya desain tersebut akan di lakukan fabrikasi dan dilakukan pengukuran, serta diimplementasikan untuk aplikasi GPR.

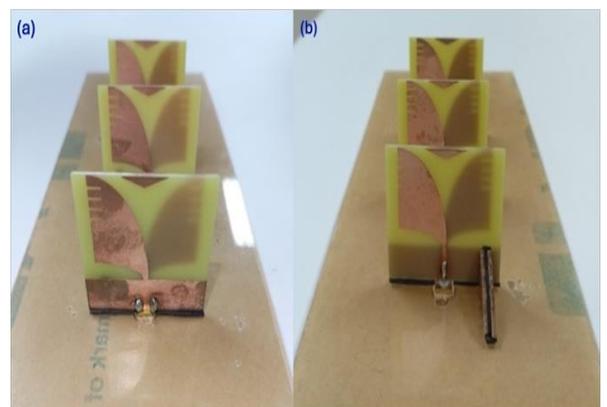
Tabel 4 Hasil Perbandingan Antara Desain Awal Dengan Desain Variasi Percobaan Menggunakan *Corrugation* dan *Parasitic*

Par	D. awal	P. I	P.II	P. III	P.IV
S12 (dB)	-21.99	-23.671	-24.129	-23.83	-23.811
Gain (dBi)	6,21	6.23	6,27	6.25	6.24
S11 (dB)	-14.953	-11.6	-12.028	-12.076	-12.035
Pola Radiasi	<i>Directio</i> <i>nal</i>	<i>Directio</i> <i>nal</i>	<i>Directio</i> <i>nal</i>	<i>Directio</i> <i>nal</i>	<i>Directio</i> <i>nal</i>

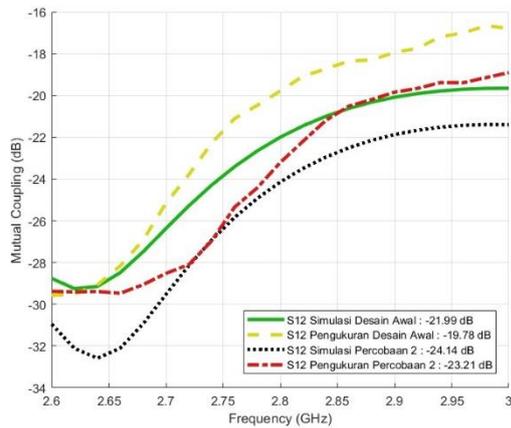
E. Hasil Fabrikasi dan Pengukuran

Hasil fabrikasi AVA ditunjukkan pada gambar 17, dimana ukuran dari substrat 42x43 dan *patch* 17,739x15,939 tidak jauh berbeda dibandingkan dengan hasil simulasi. Pengukuran dilakukan diruangan lab menggunakan *Spectrum Analyzer* dan *Vector Network Analyzer*. Pada gambar 18 menunjukkan perbandingan hasil simulasi dan pengukuran antenna Vivaldi antipodal (AVA) dari desain terbaik (percobaan 2) untuk meminimalkan *mutual coupling*. Dari Tabel 5 menunjukkan perbandingan keseluruhan parameter yang dihasilkan. Selisih nilai S12 antara simulasi dan pengukuran tidak jauh berbeda sekitar 0,9-1,04 dB, sedangkan hasil *return loss* untuk pengukuran lebih baik dibandingkan simulasi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 19.

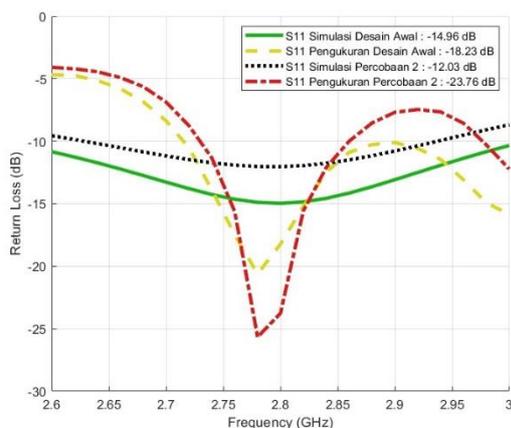
Selisih simulasi dan pengukuran untuk nilai *return loss* cukup jauh dari 9,877-12,521 dB. Sedangkan untuk parameter gain selisihnya sekitar 1,157 dB. Keseluruhan dari hasil ini sudah memenuhi target dari parameter yang diinginkan untuk GPR.



Gbr. 17 (a) Realisasi AVA tampak depan dan (b) Realisasi AVA tampak belakang



Gbr. 18 simulasi dan pengukuran *mutual coupling* percobaan 2 (desain terbaik)



Gbr. 19 Simulasi dan pengukuran *return loss* percobaan 2 (desain terbaik)

Tabel 5 Hasil Pengukuran dan Simulasi percobaan terbaik Menggunakan Metode *Corrugation* dan *Parasitic*

Parameter	Simulasi	Pengukuran	Selisih
S12	-24.129	-23.211 (dB)	0.918 (dB)
Gain	12.073	13.23 (dBi)	1.157dBi)
S11	-12.028	-23.769 (dB)	11.741 (dB)
Pola Radiasi	<i>Directional</i>	<i>Directional</i>	-

IV. KESIMPULAN

Evaluasi *mutual coupling* pada AVA dengan menggunakan teknik *corrugations* dan *parasitic*. Secara umum, pengurangan *mutual coupling* dicapai dengan memvariasikan peletakan *corrugation* atau kerutan disepanjang tepi *patch* antenna. Kemudian diambil hasil simulasi terbaik untuk minimalisasi *mutual coupling*,

kemudian selanjutnya di fabrikasi dan hasilnya dibandingkan. Diperoleh hasil simulasi *mutual coupling* -24,129 dB dan pengukuran -23,211 dB, selisih nilai tersebut terhadap desain awal tidak terlalu signifikan sekitar 2-3 dB. Nilai *Bandwidth* yang dihasilkan cukup lebar sekitar 306 MHz dari target awal 60 MHz, namun nilai ini mengalami penurunan terhadap desain awal sekitar 160 MHz. Sedangkan nilai *Gain* yang diperoleh adalah 6,38 dBi dan pola radiasi yang dihasilkan adalah direksional pada phi 90⁰ sudah memenuhi spesifikasi yang diinginkan. Oleh karena itu, dapat diterapkan untuk aplikasi *Ground Penetrating Radar*.

REFERENSI

- [1] Langhammer, Lisbeth, et al. "Glacier Bed Surveying with Helicopter- Borne Dual-Polarization Ground-Penetrating Radar." *Journal of Glaciology*, vol. 65, no. 249, 2019, pp. 123–135., doi:10.1017/jog.2018.99.
- [2] H. Liu, J. Zhao and M. Sato, "A Hybrid Dual-Polarization GPR System for Detection of Linear Objects," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 14, pp. 317-320, 2015, doi: 10.1109/LAWP.2014.2363826.
- [3] S. L. Earp, E. S. Hughes, T. J. Elkins and R. Vickers, "Ultra-wideband ground-penetrating radar for the detection of buried metallic mines," in *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 11, no. 9, pp.0-39, Sept. 1996.
- [4] S. Aurel. "Using georadar systems for mapping underground utility networks." *Procedia Engineering* 209 (2017): 216-223.
- [5] G. Marta, and L. Ortyl. "Georeferencing of multi-channel GPR—Accuracy and efficiency of mapping of underground utility networks." *Remote Sensing* 12.18 (2020): 2945.
- [7] P. Gibson, The Vivaldi aerial, in: 9th European Microwave Conference, 1979, pp. 101–105.
- [8] Gibson, P. J., "The vivaldi aerial," in 1979 9th European Microwave Conference, 101–105, 1979. [6] Abbosh, A. M., "Directive antenna for ultrawideband medical imaging systems," *International Journal of Antennas and Propagation*, Vol. 2008, 854012, 2008.

- [9] D. Yang, S. Liu, and D. Geng, "A Miniaturized Ultra-wideband Vivaldi Antenna with Low Cross Polarization," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 23352- 23357, 2017.
- [10] G. Teni, N. Zhang, J. Qiu, and P. Zhang, "Research on a Novel Miniaturized Antipodal Vivaldi Antenna With Improved Radiation," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 12, pp. 417-420, 2013.
- [11] A. Z. Hood, T. Karocolak, and E. Topsakal, "A small Antipodal Vivaldi Antenna for Ultrawide-Band Applicattions," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 7, pp. 656-660, 2008.
- [12] Nurhayati, "Pengurangan *Mutual coupling* Antena Array Vivaldi Coplanar untuk Aplikasi Telekomunikasi S&C Band," *Universitas Negeri Surabaya*, pp. 1–31, Nov. 2018.
- [13] Rahmadiani, A. P., Nurhayati, N., Rakhmawati, L., & Rohman, M. (2022). Perancangan Antena Coplanar Vivaldi Menggunakan Metamaterial dan Corrugated Slot Pada Frekuensi Ultra-Wideband (UWB). *JURNAL TEKNIK ELEKTRO*, 11(2), 297–305. <https://doi.org/10.26740/jte.v11n2.p297-305>
- [14] H. s. Senapati, P. Chongder and S. Maiti, "Design and simulation of a Parasitic Patch loaded Novel Broadband Antipodal Vivaldi Antenna for GPR Applications," 2022 *IEEE Microwaves, Antennas, and Propagation Conference (MAPCON)*, Bangalore, India, 2022, pp. 886-890, doi: 10.1109/MAPCON56011.2022.10047084.
- [15] Mustafa A. Al-Janabi, Sema K. Kayhan, Flexible Vivaldi Antenna Based on a Fractal Design for RF-Energy Harvesting, *Progress In Electromagnetics Research M*, Vol. 97, 177-188, 2020, doi:10.2528/PIERM20073003
- [16] F. Abushakra *et al.*, "Ultra-Wideband Coplanar Vivaldi Antenna Array With Dielectric Patch Antenna for Grating Lobes Suppression," in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 54410-54420, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3175840.
- [17] Razib, Mohammad Habibur Rahman, et al. "A high gain microwave and millimeter-wave-based balanced antipodal Vivaldi antenna with a parasitic patch and a half-spherical shaped dielectric lens." *Heliyon* 10.21 (2024).
- [18] A. Oliveira, M. Perotoni, S. Kofuji, and J. Justo, "A Palm Tree Antipodal Vivaldi Antenna With Exponential Slot Edge for Improved Radiation Pattern," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol 14, pp. 1334 - 1337, 2015.
- [19] Dixit, Amruta S., and Sumit Kumar. "A survey of performance enhancement techniques of antipodal Vivaldi antenna." *IEEE Access* 8 (2020): 45774-45796.
- [20] J. Eichenberger, E. Yetisir, and N. Ghalichechian, "High-gain antipodal Vivaldi antenna with pseudoelement and notched tapered slot operating at (2.5 to 57) GHz," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 67, no. 7, pp. 4357 4366, Jul. 2019.
- [21] I. T. Nassar and T. M. Weller, "A novel method for improving antipodal Vivaldi antenna performance," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 63, no. 7, pp. 3321 3324, Jul. 2015.
- [22] F. Rafiqi, *Rancang Bangun Antena Antipodal Vivaldi untuk Aplikasi Ultra-Wide Band dengan Gain, Directivity, dan Efisiensi Tinggi Menggunakan Teknik Korugasi dan Elemen Parasitik*. Depok: Universitas Indonesia, 2022.