

Antena Planar UWB dengan Pencatuan *Tapered-CPW* dan *Spline-Curved Ground Plane*

Agus Dwi Prasetyo¹, Edwar²

Abstract—The use of radio spectrum in L-to-X bands is currently very diverse, with various types of devices. Therefore, an antenna with good response on very wide spectrum is expected to be a solution for diverse devices. By widening the antenna bandwidth that is applied to the ultra-wideband (UWB) communication, it is expected to be able to meet wireless communication needs on other bands or frequencies. The UWB antenna has the fractional bandwidth of at least 20% of its center frequency. This paper proposes an attempt to widen the bandwidth of planar UWB antenna with a circular patch (resonator) using coplanar waveguide (CPW). The study was conducted by the phased modification scenario using tapered line and spline-curved ground plane method. This method achieved a UWB antenna with fractional bandwidth of 145.57% (with a testing limit up to 12 GHz frequency) in the size of 40×50 mm². At the testing bandwidth (L-X band), the basic form antenna (Model A) has a total bandwidth achievement of 39.36% (triple-band); the first antenna modification using tapered line at the feed line (Model B) has total bandwidth achievement of 83.09% (dual-band); and the last antenna modification using the tapered line (from the first modification) with the spline-curved ground plane addition (Model C) has total bandwidth achievement of 91.91% (single-band).

Intisari—Pemanfaatan spektrum radio pada pita L hingga X saat ini sangat beragam, dengan jenis perangkat yang beragam pula. Oleh karena itu, antena dengan respons yang baik pada spektrum yang sangat lebar diharapkan menjadi solusi untuk perangkat yang beragam. Dengan memperlebar rentang *bandwidth* antena yang diaplikasikan untuk komunikasi *ultra-wideband* (UWB), diharapkan kebutuhan komunikasi nirkabel pada pita atau frekuensi yang lainnya dapat terpenuhi. Antena UWB memiliki karakteristik di antaranya lebar *fractional bandwidth* paling tidak sebesar 20% terhadap frekuensi tengahnya. Dalam makalah ini, upaya untuk melebarkan *bandwidth* pada antena UWB berjenis *planar* dengan *patch* (resonator) sirkular bercatuan *coplanar waveguide* (CPW) telah dilakukan. Pengujian dilakukan melalui skenario modifikasi secara bertahap menggunakan metode *tapered line* dan *spline-curved ground plane*. Metode ini berhasil mendapatkan antena UWB dengan *fractional bandwidth* sebesar 145,57% (dengan batasan pengujian hingga frekuensi 12 GHz) dalam ukuran 40×50 mm². Antena bentuk dasar (Model A) memiliki total ketercapaian terhadap *bandwidth* pengujian (pita L–X) sebesar 39,36% (*triple-band*); antena modifikasi pertama pada catuan berupa *tapered line* (Model B) sebesar 83,09% (*dual-band*); serta

antena dengan catuan berupa *tapered line* (dari modifikasi pertama) dengan penambahan metode *spline-curved ground plane* (Model C) sebesar 91,91% (*single-band*).

Kata Kunci—antena, *planar*, UWB, *coplanar waveguide*, *tapered-CPW*, *spline-curved ground plane*.

I. PENDAHULUAN

Penggunaan spektrum frekuensi radio untuk layanan komunikasi nirkabel saat ini semakin luas dengan perangkat yang beragam. Hal ini ditunjukkan dengan tersebarnya berbagai layanan, mulai dari komunikasi selular (3G, 4G, hingga 5G), WLAN, radio navigasi penerbangan (pita L), radio eksplorasi bumi (pita L, S, C, dan X), serta komunikasi satelit dan terestrial mode amatir (pita S, C, dan X) [1]. Selain itu, terdapat jenis komunikasi yang menuntut penggunaan pita ultra lebar atau *ultra-wideband* (UWB) yang digunakan untuk radar, medis, atau *spectrum sensing* yang paling tidak bekerja pada frekuensi 3,1–10,6 GHz atau memiliki *fractional bandwidth* minimal 20% terhadap frekuensi tengahnya [2].

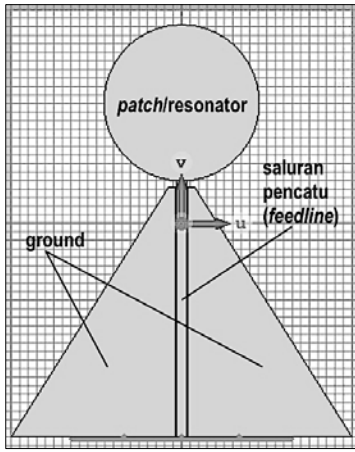
Antena dengan respons yang baik pada spektrum yang sangat lebar diharapkan menjadi salah satu solusi bagi jenis perangkat komunikasi yang beragam. Dengan memperlebar rentang *bandwidth* antena yang diaplikasikan untuk komunikasi UWB, diharapkan kebutuhan komunikasi nirkabel pada pita atau frekuensi yang lainnya dapat terpenuhi. Salah satu jenis antena yang dapat digunakan untuk kebutuhan ini adalah antena *planar* dengan catuan *coplanar waveguide* (CPW), yaitu bagian *ground plane* yang terletak bersebelahan dengan *feed* (saluran pencatuan) antena [3].

Pada beberapa penelitian sebelumnya, studi terhadap beberapa bentuk *ground plane* untuk mendapatkan karakter UWB telah dilakukan [3], [4]. Pada [5]–[8], teknik penambahan slot dan modifikasi bentuk *ground plane* dilakukan pada antena *planar* dengan catuan CPW untuk mendapatkan jangkauan respons UWB. Kombinasi dari metode penggunaan slot dan penggunaan resonator bentuk elips telah dikarakterisasi pada [9].

Studi penggunaan kurva *spline* pada antena *planar* sebelumnya telah dilakukan, baik pada bagian resonator antena ataupun pada bagian *ground plane* [10]–[12]. Dalam penggunaan kurva *spline* tersebut dilakukan langkah lain untuk mendapatkan antena *planar* dengan respons UWB. Hasil dari penelitian tersebut adalah antena berkarakter UWB dengan dimensi penampang 163 mm² dan *bandwidth* dari 3,1–10,6 GHz dengan dua titik frekuensi yang masih mendekati ambang *return loss*, yaitu ≤ -10 dB [12].

Pada makalah ini, *spline-curved* pada bagian sisi miring *ground plane* ditambahkan sebagai kombinasi lain dari penelitian sebelumnya. Makalah ini bertujuan untuk

^{1,2} Program Studi SI Teknik Telekomunikasi, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom, Jl. Telekomunikasi Terusan Buah Batu, Bandung, 40257 INDONESIA (telp: 022-7564108; e-mail: adprasetyo@telkomuniversity.ac.id, edwarm@telkomuniversity.ac.id)



Gbr. 1 Bagian-bagian pada antenna planar bercatutan coplanar waveguide.

mendapatkan antenna planar dengan bandwidth (berfokus pada respons return loss) yang mencakup pita L, S, C, dan X (1–12 GHz) dengan membandingkan tiga buah model antenna planar, yang dalam makalah ini kemudian disebut sebagai Model A, Model B, dan Model C. Ketiga model yang diamati merupakan rangkaian modifikasi dari bentuk dasar (Model A, yang menggunakan patch berbentuk sirkular dan catuan CPW). Antena Model B merupakan modifikasi dari Model A, dengan mengubah bentuk saluran pencatutan menjadi tapered line (saluran yang menyempit saat mendekati patch/resonator antenna). Selanjutnya, antenna Model C merupakan modifikasi dari Model B, yaitu menggunakan spline-curved pada bagian sisi miring ground plane.

II. ANTENA COPLANAR DAN INTERPOLASI SPLINE

A. Antena Coplanar Waveguide

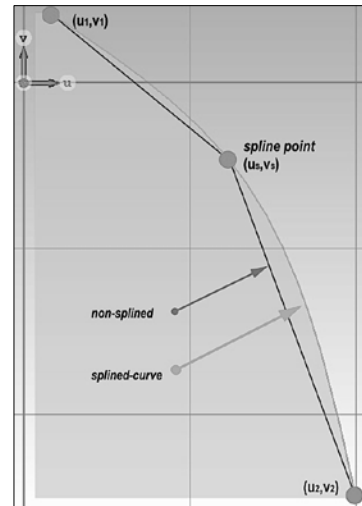
Antena planar dengan catuan CPW merupakan antenna yang secara geometri sebagaimana ditampilkan pada Gbr. 1. Antena ini berada di atas lempengan substrat dengan permitivitas relatif tertentu. Antena ini terdiri atas bagian utama, yaitu patch/resonator yang terhubung langsung dengan feedline, serta ground plane yang mengapit feedline dengan jarak tertentu.

B. Formula Perancangan Antena Coplanar Waveguide

Dalam perancangannya, beberapa persamaan dasar perlu digunakan untuk menentukan nilai beberapa variabel, seperti impedans karakteristik dan konstanta permitivitas efektif dari antenna. Nilai yang didapatkan ini nantinya digunakan sebagai nilai inisialisasi dalam perancangan antenna. Dalam perancangan antenna coplanar waveguide, nilai impedans karakteristik (Z_0) dapat ditentukan menggunakan (1) [13].

$$Z_0 = \frac{60\pi}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \frac{1}{\frac{K(k)}{K(k')} + \frac{K(kl)}{K(kl')}} \tag{1}$$

Dalam (1), diperlukan nilai k , k' , kl , dan kl' yang didapatkan nilainya dari (2) sampai (5) [13] secara berturut-turut dan diproses dengan menggunakan integral elliptical recursive $K(k)$.



Gbr. 2 Penggunaan interpolasi spline pada pembentukan lengkungan.

$$k = \frac{a}{b} \tag{2}$$

$$k' = \sqrt{k^2} \tag{3}$$

$$kl = \frac{\tanh\left(\frac{\pi a}{4h}\right)}{\tanh\left(\frac{\pi b}{4h}\right)} \tag{4}$$

$$kl' = \sqrt{kl^2} \tag{5}$$

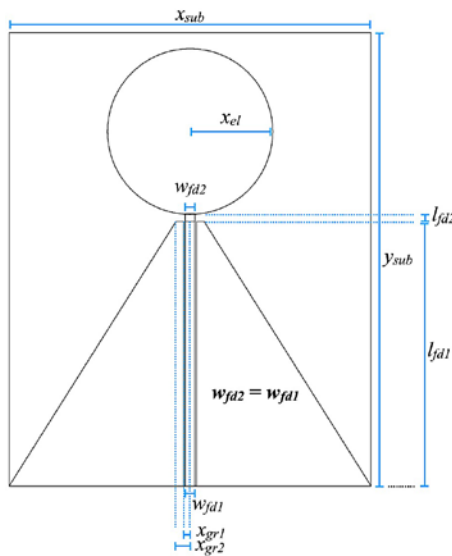
Variabel a merupakan lebar catuan (feedline) antenna, sedangkan b adalah panjang total feedline antenna dengan lebar gap di sisi kiri dan kanannya. Variabel h adalah ketebalan dielektrik yang digunakan oleh antenna. Selain itu, ϵ_{eff} juga perlu diketahui untuk menentukan nilai karakteristik impedans antenna. Nilai tersebut dapat diperoleh melalui (6) [13] dengan mengetahui permitivitas relatif bahan (ϵ_r).

$$\epsilon_{eff} = \frac{1 + \epsilon_r \frac{K(k')}{K(k)} \frac{K(kl)}{K(kl')}}{1 + \frac{K(k')}{K(k)} \frac{K(kl)}{K(kl')}} \tag{6}$$

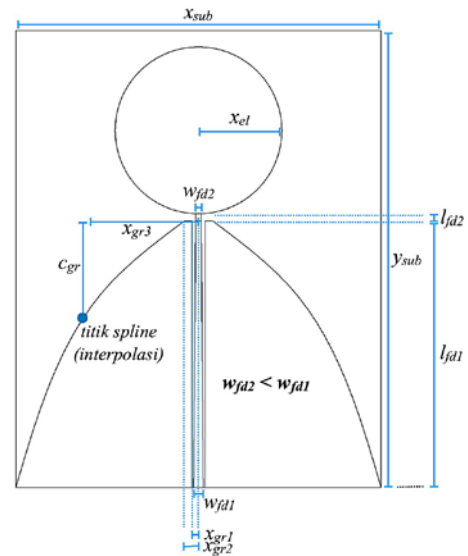
C. Metode Interpolasi Spline

Dalam bidang matematika analisis numerik, interpolasi spline adalah bentuk interpolasi yang interpolant-nya adalah jenis khusus dari polinomial sambungan yang disebut spline. Interpolasi spline sering lebih disukai daripada interpolasi polinomial karena kesalahan interpolasi dapat dibuat kecil, bahkan ketika menggunakan polinomial derajat rendah untuk spline [14].

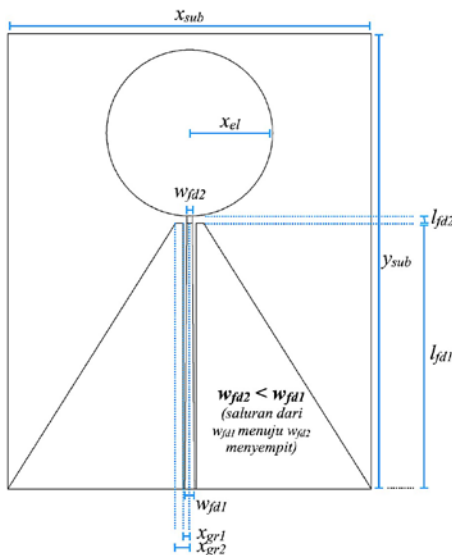
Metode interpolasi spline dalam desain geometri antenna dapat diterapkan sebagaimana pada penelitian-penelitian sebelumnya [10]–[12]. Gbr. 2 menunjukkan bahwa kurva spline melalui titik (u_s, v_s) menghubungkan dua titik, yaitu (u_1, v_1) dan (u_2, v_2) . Dari gambar tersebut tampak perbedaan kurva/garis antara yang tidak menggunakan dan setelah menggunakan interpolasi spline.



Gbr. 3 Antena Model A.



Gbr. 5 Antena Model C.



Gbr. 4 Antena Model B.

TABEL I
TARGET DAN SPESIFIKASI ANTENA

Parameter	Spesifikasi
Frekuensi Pengujian	Pita L – X (1 – 12 GHz)
Return Loss	≤ -10 dB
Gain	≤ 0 dBi
Impedans Antena	50 Ω
Dimensi Penampang	40×50 mm ²

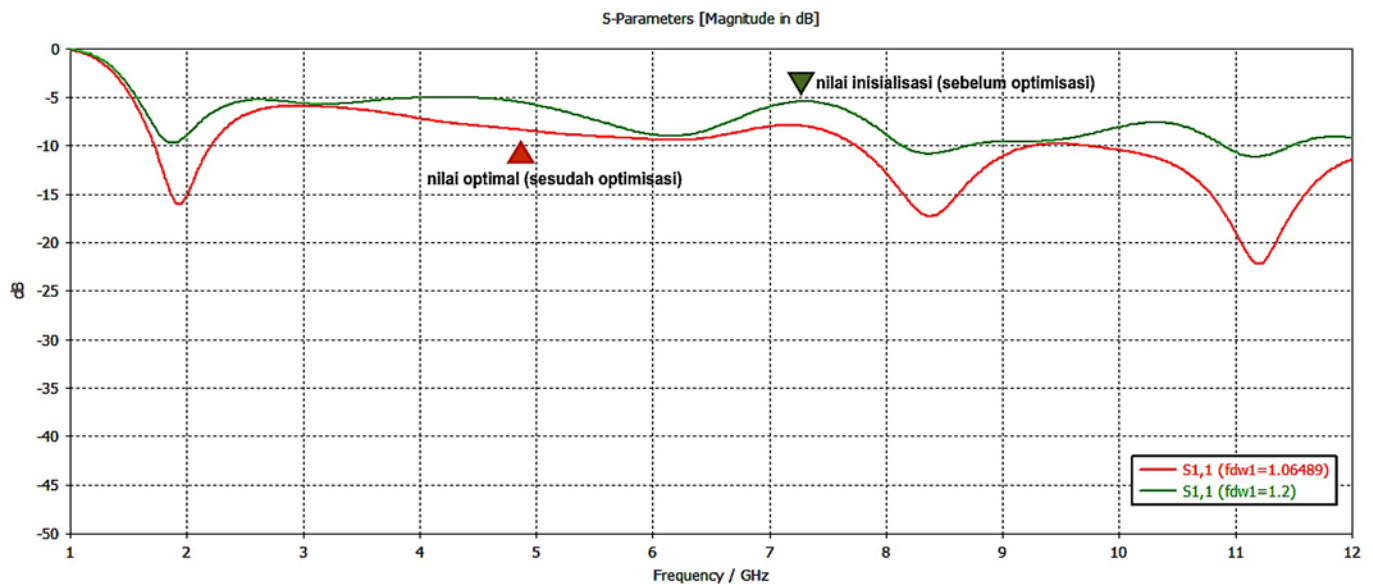
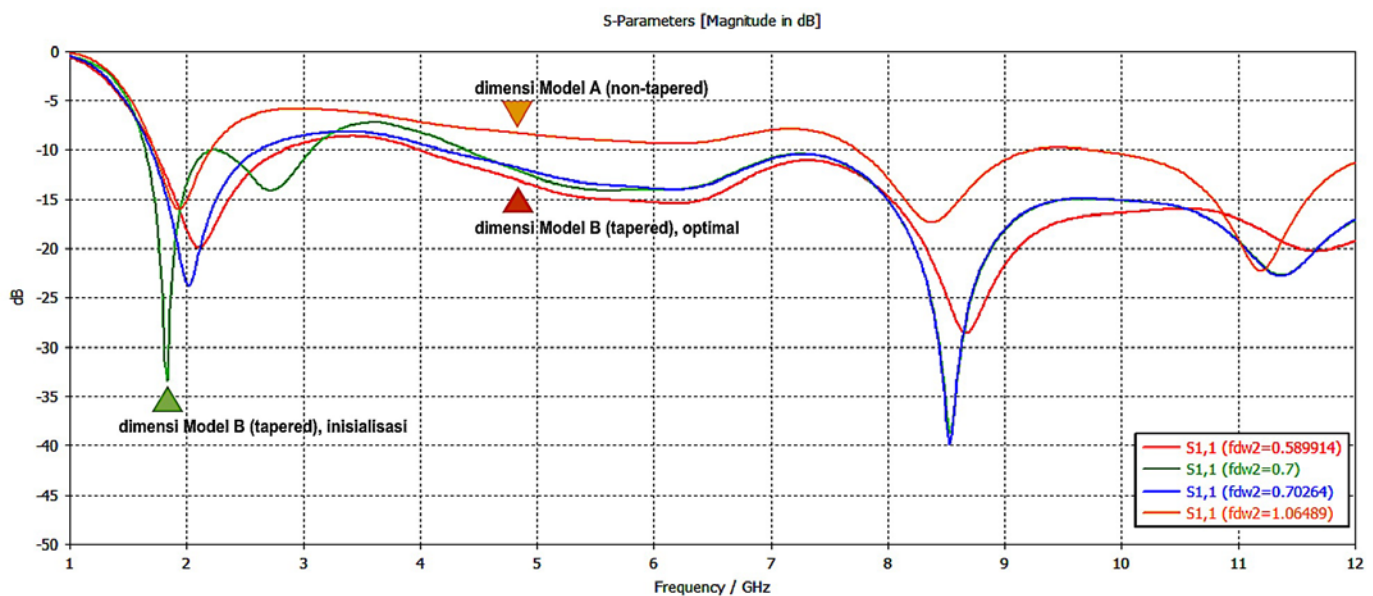
III. PERANCANGAN DAN SIMULASI

Penelitian yang dilakukan bertujuan untuk mendapatkan antena planar dengan bandwidth yang mencakup pita L, S, C, dan X (Tabel I) dengan membandingkan tiga buah model antena planar, yaitu Model A, Model B, dan Model C. Ketiga model yang diamati merupakan rangkaian modifikasi dari bentuk dasar (Model A, Gbr. 3), yang menggunakan patch berbentuk sirkular dan catuan CPW.

TABEL II
DIMENSI ANTENA

Variabel	Deskripsi	Ukuran (mm)
x_{sub}	panjang total dimensi antena (ukuran substrat) pada sumbu-x (koordinat perancangan global); lebar substrat	40
y_{sub}	panjang total dimensi antena (ukuran substrat) pada sumbu-y (koordinat perancangan global); panjang substrat	50
z_{sub}	panjang total dimensi antena (ukuran substrat) pada sumbu-z (koordinat perancangan global); ketebalan substrat	1,60
x_{el}	jari-jari patch sirkular antena	9,1341
l_{fd1}	panjang ground plane pada sumbu-y	29,1774
l_{fd2}	panjang ekstensi pencatu antara ground plane dengan patch sirkular pada sumbu-y	0,784
w_{fd1}	lebar saluran pencatu pada bagian tepian substrat	1,2 (inisialisasi)
w_{fd2}	lebar saluran pencatu pada bagian terdekat dengan patch sirkular	1,2 (inisialisasi)
x_{gr1}	jarak antara pertengahan w_{fd} dengan tepi ground plane terdekat dengan saluran pencatu	0,7
x_{gr2}	jarak antara pertengahan w_{fd} dengan pemotongan “puncak” ground plane	1,55
x_{gr3}	jarak antara pertengahan w_{fd} titik kurva spline pada ground plane (pada sumbu-x)	(hanya ada pada Model C)
c_{gr}	jarak antara “puncak” ground plane dengan titik kurva spline pada ground plane (pada sumbu-y)	(hanya ada pada Model C)

Antena Model B (Gbr. 4) merupakan modifikasi dari Model A, dengan mengubah bentuk saluran pencatuan menjadi tapered, dengan saluran yang menyempit saat mendekati patch antena. Selanjutnya, antena Model C (Gbr. 5) merupakan modifikasi dari Model B, yaitu menggunakan spline-curved pada bagian sisi miring ground plane.

Gbr. 6 Grafik *return loss* antenna sebelum dan sesudah optimisasi w_{fd1} .Gbr. 7 Grafik *return loss* antenna sebelum dan sesudah optimisasi w_{fd2} .

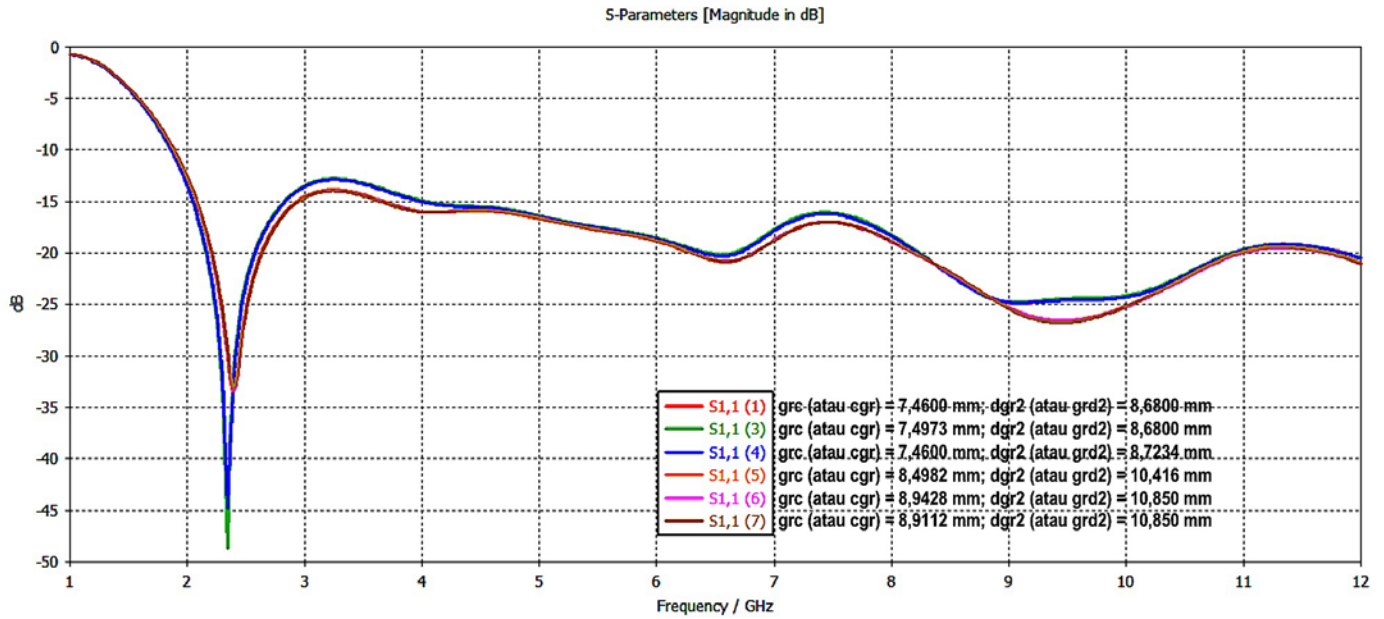
A. Antena Model A

Antena *planar* dirancang menggunakan substrat FR-4 dengan permitivitas relatif (ϵ_r) sebesar 4,3 dan ketebalan substrat 1,6 mm (lapisan tembaga *single-sided*). Dimensi penampang pada antenna yang dirancang yaitu 40×50 mm². Menggunakan (1) sampai (6), dimensi inisialisasi untuk lebar saluran pencatuan (w_{fd1}) yang mendekati impedans spesifikasi (Tabel I) yaitu 1,2 mm. Secara mendetail, dimensi-dimensi pada antenna yang dirancang diperlihatkan pada Tabel II.

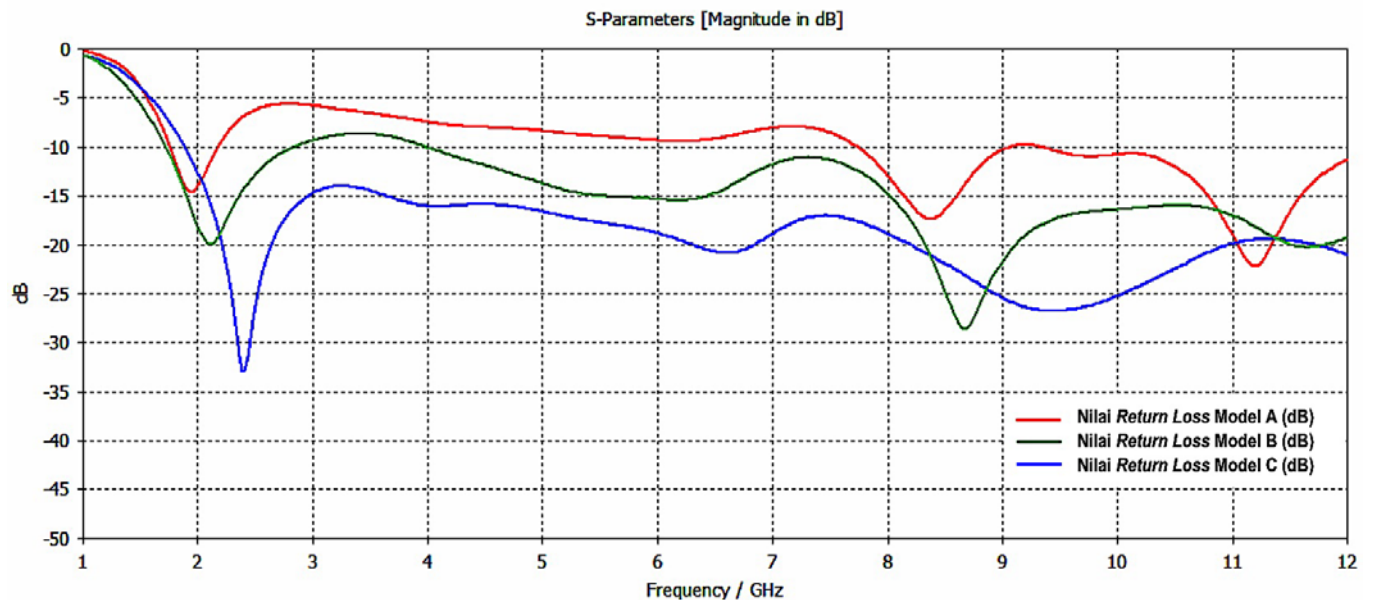
Seperti telah dibahas sebelumnya, target dari perancangan antenna ini adalah memperoleh antenna dengan nilai *return loss* di bawah -10 dB untuk seluruh rentang pita L, S, C, dan X (1–12 GHz). Grafik perbandingan *return loss* antara sebelum dan sesudah optimisasi ditunjukkan pada Gbr. 6. Dari grafik tersebut, tampak bahwa nilai respons antenna (*return loss*) dari

dimensi inisialisasi masih didominasi oleh nilai > -10 dB. Oleh karena itu, dimensi saluran pencatuan masih harus dioptimisasi. Dengan menggunakan algoritme optimisasi *CMA Evolution Strategy*, dengan nilai sigma untuk optimisasi sebesar 0,5 dan nilai *random seed* = 1, didapatkan nilai optimal w_{fd1} sebesar 1,0649 (nilai target optimisasi adalah $w_{fd1} > 1$ mm, dengan pertimbangan ukuran konektor SMA jika nantinya dilakukan fabrikasi).

Dari hasil optimisasi nilai w_{fd1} , terdapat ceruk/minima respons antenna pada tiga frekuensi, yaitu 1,93 GHz, 8,38 GHz, dan 11,19 GHz, yang ketiganya membawa nilai *bandwidth* masing-masing pada *return loss* kurang dari -10 dB. Kesimpulan dari hasil optimisasi ini adalah antenna bersifat *triple-band* dan belum mampu bekerja pada rentang pita L, S, C, dan X secara menyeluruh.



Gbr. 8 Optimisasi c_{gr} dan d_{gr2} pada antenna Model C.



Gbr. 9 Perbandingan kurva *return loss* pada antenna Model A, Model B, dan Model C.

B. Antena Model B

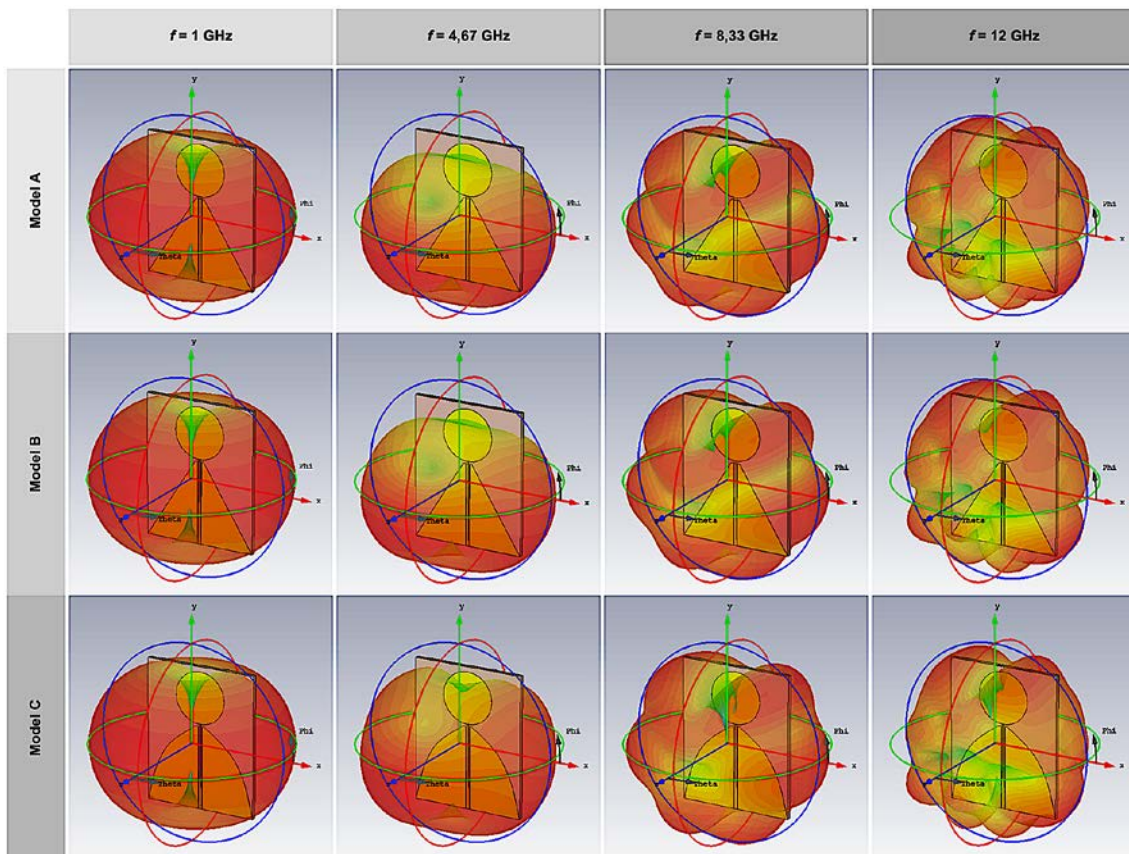
Pada antenna Model B, modifikasi dari antenna Model A dilakukan. Modifikasi berupa penyempitan (*taper*) saluran pencatu (*stripline*). Pada tahap ini, optimisasi dilakukan pada dimensi w_{fd2} . Grafik perbandingan *return loss* antara antenna Model A dengan setelah proses modifikasi (inisialisasi, $w_{fd2} = 0,7$ mm) dan setelah proses optimisasi ($w_{fd2} = 0,5899$ mm) ditunjukkan pada Gbr. 7. Proses optimisasi dilakukan dengan menggunakan algoritme *Trust Region Framework* (dengan nilai sigma untuk optimisasi sebesar 0,2).

Dari grafik *return loss* yang terdapat pada Gbr. 8, tampak bahwa antenna Model B hasil modifikasi dan optimisasi

memiliki rentang frekuensi kerja yang lebih lebar dibandingkan dengan antenna Model A jika menggunakan nilai *return loss* ≤ -10 dB, meskipun tidak semua rentang frekuensi dari pita L sampai X terpenuhi. Dapat disimpulkan bahwa metode modifikasi dengan menggunakan saluran *tapered* mampu menurunkan nilai *return loss* antenna, atau dengan kata lain, metode ini mampu melebarkan *bandwidth* antenna.

C. Antena Model C

Antena Model C memodifikasi yang telah dilakukan pada Model B. Modifikasi yang dilakukan berupa pelengkungan sisi miring *ground plane*. Variabel x_{gr3} dan c_{gr} masing-masing



Gbr. 10 Pola radiasi antenna Model A, B, dan C untuk dalam beberapa sampel frekuensi ($f = 1$ GHz, 4,67 GHz, 8,33 GHz, dan 12 GHz).

TABEL III
PERBANDINGAN PEROLEHAN BANDWIDTH SETIAP MODEL ANTENA

Model	Pita Pass	Pita Stop
A	1,72 – 2,21 GHz 7,74 – 9,28 GHz 9,70 – 12 GHz (masih berlanjut)	1 – 1,72 GHz 2,21 – 7,74 GHz 9,28 – 9,70 GHz
B	1,72 – 2,83 GHz 3,97 – 12 GHz (masih berlanjut)	1 – 1,72 GHz 2,83 – 3,97 GHz
C	1,89 – 12 GHz (masih berlanjut)	1 – 1,89 GHz

mewakili koordinat x dan y titik pelengkungan pada metode *spline*, menggunakan interpolasi. Berdasarkan Gbr. 5 dan Tabel II, ada beberapa variabel yang perlu ditambahkan, yaitu d_{gr1} dan d_{gr2} . Kedua variabel tersebut digunakan berdasarkan (7) dan (8).

$$x_{gr2} = x_{gr1} + d_{gr1} \tag{7}$$

$$x_{gr3} = x_{gr2} + d_{gr2} \tag{8}$$

Nilai c_{gr} dan d_{gr2} inialisasi dipilih secara acak: $c_{gr} = 7,46$ mm dan $d_{gr2} = 8,68$ mm. Selanjutnya, dengan menggunakan algoritme *Trust Region Framework* (dengan nilai sigma untuk optimisasi sebesar 0,2), diperoleh nilai optimal yaitu $c_{gr} = 8,9112$ mm dan $d_{gr2} = 10,85$ mm (Gbr. 8).

TABEL IV
PERBANDINGAN PEROLEHAN GAIN SETIAP MODEL ANTENA

Model	Gain Antena (pada arah mainbeam)
A	$f = 1$ GHz ; 6,094 dBi $f = 4,67$ GHz ; 3,701 dBi $f = 8,33$ GHz ; 3,537 dBi $f = 12$ GHz ; 5,056 dBi
B	$f = 1$ GHz ; 3,867 dBi $f = 4,67$ GHz ; 3,709 dBi $f = 8,33$ GHz ; 3,517 dBi $f = 12$ GHz ; 4,983 dBi
C	$f = 1$ GHz ; 2,590 dBi $f = 4,67$ GHz ; 3,220 dBi $f = 8,33$ GHz ; 3,562 dBi $f = 12$ GHz ; 5,301 dBi

Modifikasi antenna pada Model C menggunakan *spline-curved ground plane* berhasil mendapatkan respons *return loss* yang signifikan (terjadi pelebaran *bandwidth*). *Bandwidth* pada pita S–X berhasil dicakup, sedangkan pada pita L hanya sebagian saja yang tercakup. Dengan menggunakan nilai *return loss* ≤ -10 dB, antenna bekerja pada 1,89–12 GHz.

IV. HASIL DAN ANALISIS

Pada bagian ini, hasil respons *return loss* dari modifikasi antenna mulai Model A hingga Model C dianalisis. Perbandingan perolehan *bandwidth* dari setiap model antenna dapat disimak melalui Gbr. 9 dan Tabel III. Setiap tahap

modifikasi menunjukkan antenna memiliki *bandwidth* yang semakin lebar. Semua pita *pass* dari hasil penelitian memiliki rentang yang masih berlanjut setelah frekuensi maksimum pengujian (12 GHz). Ketiga model yang diuji memiliki kesamaan, yaitu kendala pencapaian pada pita L (1–2 GHz). Hal ini disebabkan oleh kecilnya batasan dimensi penampang total antenna yang telah ditargetkan, yaitu sebesar $40 \times 50 \text{ mm}^2$.

Dari seluruh rentang frekuensi pengujian (pita L–X), antenna Model A memiliki total ketercapaian terhadap *bandwidth* pengujian sebesar 39,36% (*triple-band*); antenna Model B sebesar 83,09% (*dual-band*); serta antenna model C sebesar 91,91% (*single-band*). Jika karakter antenna UWB yaitu memiliki *fractional bandwidth* paling tidak sebesar 20%, maka hingga pada tahap akhir modifikasi (Model C) antenna CPW yang menggunakan metode *tapered line* dan *spline-curved ground plane* telah mampu menghasilkan *fractional bandwidth* sebesar 145,57% (dengan angka yang masih memungkinkan untuk meningkat karena pengujian hanya dilakukan hingga frekuensi 12 GHz).

Gain antenna (pada arah *mainbeam*) yang didapatkan dari pengujian pada empat frekuensi sampel dalam rentang pita L–X, yaitu 1 GHz, 4,67 GHz, 8,33 GHz, dan 12 GHz, pada setiap model antenna diperlihatkan pada Tabel IV. Dari tabel tersebut, antenna Model A pada beberapa frekuensi sampel yang telah dipilih secara berturut-turut memiliki *gain* sebesar 6,094 dBi, 3,701 dBi, 3,537 dBi, dan 5,056 dBi. Antenna Model B berturut-turut memiliki *gain* sebesar 3,867 dBi, 3,709 dBi, 3,517 dBi, dan 4,983 dBi. Sedangkan antenna Model C berturut-turut memiliki *gain* sebesar 2,590 dBi, 3,220 dBi, 3,562 dBi, dan 5,301 dBi.

Sebagai informasi tambahan terhadap karakter antenna, dilakukan simulasi pola radiasi pada setiap frekuensi sampel. Pada Gbr. 10, dapat diamati pola radiasi antenna Model A, Model B, maupun Model C pada frekuensi 1 GHz, 4,67 GHz, 8,33 GHz, dan 12 GHz. Dari gambar tersebut dapat ditarik kesimpulan bahwa modifikasi dari Model A hingga Model C pada frekuensi sampel yang sama tidak menyebabkan perubahan secara dramatis pada jenis pola radiasi antenna.

V. KESIMPULAN

Dari penelitian antenna bercatun *coplanar waveguide* (CPW) menggunakan metode *tapered line* dan *spline-curved ground plane*, metode ini berhasil mendapatkan antenna UWB dengan *fractional bandwidth* sebesar 145,57% (dengan batasan pengujian hingga frekuensi 12 GHz). Antenna Model A (bentuk dasar) memiliki total ketercapaian terhadap *bandwidth* pengujian sebesar 39,36% (*triple-band*); antenna Model B (modifikasi pada catun berupa *tapered line*) sebesar 83,09%

(*dual-band*); serta antenna Model C (dengan catun berupa *tapered line* dan *spline-curved ground plane*) sebesar 91,91% (*single-band*). Antenna pada tahap modifikasi terakhir (Model C) mampu bekerja pada 1,89–12 GHz dengan batas frekuensi atas yang masih berlanjut (karena batasan frekuensi pengujian antenna).

REFERENSI

- [1] "Tabel Alokasi Spektrum Frekuensi Radio Indonesia," Peraturan Menteri Komunikasi dan Informatika Republik Indonesia, No. 25, 2014.
- [2] *First Report and Order in the Matter of Revision of Part 15 of the Commission's Rules Regarding Ultra-Wideband Transmission Systems*, Federal Communication Commission ET-Docket 98–153, April, 2002.
- [3] A. Katuru dan A. Sudhakar, "Design and Analysis of Compact CPW Fed Elliptical Patch Antenna for UWB Applications," *International Journal of Control Theory and Applications*, Vol. 10, No. 35, hal. 353–360, 2017.
- [4] R.S. Beerasha, A.M. Khan, dan H.V. Manjunatha Reddy, "CPW to Microstrip Transition Using Different CPW Ground Plane Structures," *IEEE International Conference On Recent Trends In Electronics Information Communication Technology*, 2016, hal. 667–671.
- [5] M.A. Basit, G. Wen, O.G. Kwame, dan N. Rasool, "A Compact Wideband CPW-Fed Hybrid Slot Antenna," *IEEE - 3rd Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation*, 2014, hal. 57–60.
- [6] P. Moeikham, N. Tangthong, dan S. Akatimagool, "CPW-Fed Printed Slot Antenna for WLAN/WiMAX and UWB Applications," *Proceedings of IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*, 2014, hal. 227–228.
- [7] A. Verma, A. Yaduvanshi, dan L. Varshney, "Design and Analysis of UWB Microstrip Patch Antenna," *International Journal of Advanced Computer Research*, Vol. 2, No. 4, hal. 340–344, 2012.
- [8] E.S. Rameswarudu, M. Srinubabu, dan S.S.S.R. Rao, "A New 3-Shape Slot Microstrip Patch Antenna with Tapered Step Defected Ground Structures for Wireless Communication Applications," *IEEE International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET)*, 2016, hal. 2094–2097.
- [9] S. Mirzaee dan Y. Zehforoosh, "CPW-Fed Circularly Polarized Slot Antenna with Elliptical-Shaped Patch for UWB Applications," *Journal of Communication Engineering*, Vol. 6, No. 2, hal. 151–162, 2017.
- [10] L. Lizzi, F. Viani, R. Azaro, dan A. Massa, "Optimization of a Spline-Shaped UWB Antenna by PSO," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol. 6, hal. 182–185, 2007.
- [11] S. Koulouridis dan J.L. Volakis, "A Novel Planar Conformal Antenna Designed with Splines," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol. 8, hal. 34–36, 2009.
- [12] A. Bekasiewicz dan S. Koziel, "A Structure and Computationally-Efficient Design Closure of Compact Spline-Parameterized UWB Monopole Antenna," *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI)*, 2016, hal. 1759–1760.
- [13] B.C. Wadell, *Transmission Line Design Handbook*, Norwood, USA: Artech House Publishers, 1991.
- [14] C.A. Hall dan W.W. Meyer, "Optimal Error Bounds for Cubic Spline Interpolation," *Journal of Approximation Theory*, Vol. 16, No. 2, hal. 105–122, 1976.