

Pencapaian Lebar-Pita Antena Mikrostrip dengan Tingkap Tergandeng untuk Frekuensi 2,4 GHz

Ali Hanafiah Rambe¹, Muhammad Zulfin¹, Riswan Dinzi¹

Abstract— Aperture coupled technique is designed to increase microstrip antenna bandwidth. This paper discusses bandwidth enhancement of the aperture coupled rectangular patch microstrip antenna for working on 2.4 GHz. The optimal design is determined by using the AWR simulator. The fabricated antenna is then analyzed using a vector network analyzer (Anritsu MS2034B). The results show that the antenna is able to achieve 110 MHz bandwidth with return loss is less than -9.54 dB. The bandwidth increment is approximately 77.13% higher than the directly fed antenna.

Intisari— Teknik tingkap terdang (aperture coupled) merupakan sebuah teknik pencatutan yang dirancang untuk meningkatkan lebar-pita (bandwidth) dari antena mikrostrip. Pada tulisan ini dibahas tentang pencapaian lebar-pita dari antena mikrostrip patch segi empat dengan pencatu tingkap terdang yang dirancang untuk frekuensi 2,4 GHz. Dengan bantuan simulator AWR, rancangan antena yang optimal telah dihasilkan dan difabrikasi. Berdasarkan hasil pengukuran menggunakan vector network analyzer Anritsu MS2034B, antena tersebut mampu memberikan lebar-pita sebesar 110 MHz dengan return loss kurang dari $-9,54$ dB. Pencapaian lebar-pita tersebut lebih lebar 77,13% dibandingkan dengan pencatutan langsung.

Kata Kunci— antena, mikrostrip, tingkap terdang, return loss, VSWR, lebar-pita.

I. PENDAHULUAN

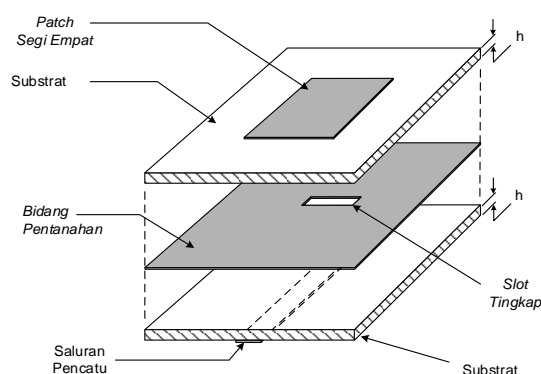
Pencatu (*feeder*) pada antena mikrostrip merupakan sebuah saluran yang menghubungkan antara *patch* dan sistem radio. Berbagai teknik pencatutan telah banyak dihasilkan dan dikembangkan untuk mendapatkan unjuk kerja yang lebih baik dari sebuah antena mikrostrip. Secara umum teknik pencatutan tersebut dapat dikelompokkan menjadi dua bagian, yaitu pencatu langsung (*direct feed*) dan tidak-langsung (*indirect feed*). Teknik pencatu langsung yang umum digunakan adalah *microstrip line* dan *probe coaxial*. Adapun teknik pencatutan yang tidak langsung antara lain tingkap terdang (*aperture coupled*), *electromagnetically coupled*, dan *coplanar waveguide* [1] - [3]. Pengembangan dari setiap teknik pencatu langsung dan tidak-langsung masih terus diupayakan untuk meningkatkan unjuk kerja antena. Pada teknik pencatu langsung peningkatan tersebut dilakukan dengan pembuatan *single stub* [4] dan metode *inset* [5]. Adapun pada teknik pencatu tidak-langsung di antaranya modifikasi bentuk *slot* pada teknik *aperture coupled* [6].

¹ Dosen, Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Sumatera Utara (USU), Jl. Almamater Kampus USU Medan 20155 INDONESIA (telp: 061-8213246; fax: 061-8213250; e-mail: ali3@usu.ac.id)

Tulisan ini membahas tentang pencapaian lebar-pita dari rancangan antena mikrostrip *patch* segi empat dengan pencatu tingkap terdang untuk frekuensi resonansi 2,4 GHz. Pencapaian yang diperoleh merupakan hasil rancangan yang paling optimum dari sebuah antena mikrostrip dengan pencatu tingkap terdang yang dibahas. Hasil pencapaian tersebut juga akan digunakan sebagai pembandingan dengan rancangan lain untuk frekuensi yang sama, yaitu 2,4 GHz, yang telah dipublikasikan [7]. Pembahasan yang dilakukan berupa perancangan secara teoretis, simulasi, dan pengukuran. Simulasi bertujuan untuk mendapatkan rancangan yang optimal menggunakan simulator AWR. Adapun jenis substrat yang digunakan adalah FR4 ($\epsilon_r = 4,4$ and $h = 1,6$ mm) dengan frekuensi resonansi 2,4 GHz.

II. PERANCANGAN ANTENA

Sebuah antena mikrostrip *patch* segi empat dengan pencatu tingkap terdang diperlihatkan pada Gbr. 1. Antena ini memiliki saluran pencatu dan *patch* yang dipisahkan oleh dua lapisan substrat dan bidang pentanahan (*ground plane*). Parameter yang dibutuhkan untuk perancangan antena ini adalah panjang dan lebar *patch*, ukuran *slot* tingkap, serta panjang dan lebar saluran pencatu.



Gbr. 1 Antena mikrostrip *patch* segi empat dengan pencatu tingkap terdang.

A. Perancangan Patch Segi Empat

Ukuran *patch* berbentuk segi empat berupa lebar (W) dan panjang (L) dapat diperoleh dengan [1] - [3].

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

$$L = L_{\text{eff}} - 2\Delta L \quad (2)$$

$$L_{\text{eff}} = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}} \quad (3)$$

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{\text{reff}} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{\text{reff}} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad (4)$$

$$\epsilon_{\text{reff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{1 + 12h/W}} \right) \quad (5)$$

dengan,

- c = kecepatan rambat medan elektromagnetik (3×10^8 m/s)
- ϵ_r = konstanta dielektrik substrat
- f_r = frekuensi resonansi
- h = ketebalan substrat
- L_{eff} = panjang efektif *patch*
- ΔL = pertambahan panjang *patch*
- ϵ_{reff} = konstanta dielektri efektif substrat

Untuk frekuensi resonansi 2,4 GHz dan substrat yang digunakan jenis FR4, maka panjang dan lebar *patch* yang dihasilkan dengan menggunakan (1) hingga (5) tersebut adalah $W = 38,04$ mm dan $L = 28,44$ mm. Untuk penyederhanaan ukuran dan memudahkan dalam fabrikasi, dilakukan pembulatan menjadi $W = 38$ mm dan $L = 28$ mm. Dimensi ini dinyatakan sebagai $38 \times 28 \text{ mm}^2$ ($W \times L$).

B. Perancangan Slot Tingkap

Dimensi *slot* tingkap, berupa panjang (L_a) dan lebar (W_a), dapat dirancang dengan menggunakan [8].

panjang *slot* tingkap:

$$L_a = 0,2 \lambda_0 \quad (6)$$

lebar *slot* tingkap :

$$W_a = 0,1 L_a \quad (7)$$

dengan λ_0 adalah panjang gelombang dan *slot* tingkap berada tepat di tengah *ground plane*. Untuk frekuensi resonansi 2,4 GHz, maka panjang gelombang λ_0 dapat dihitung.

$$\lambda_0 = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{2,4 \text{ GHz}} = 125 \text{ mm} .$$

Berdasarkan perhitungan menggunakan (6) dan (7), panjang *slot* tingkap adalah $L_a = 25$ mm dan lebar *slot* tingkap $W_a = 2,5$ mm ≈ 3 mm. Dimensi ini dinyatakan sebagai $3 \times 25 \text{ mm}^2$ ($W_a \times L_a$).

C. Perancangan Saluran Pencatu

Saluran pencatu yang digunakan pada antenna mikrostrip tingkap terdangeng adalah saluran mikrostrip. Saluran ini dirancang berdasarkan nilai impedans karakteristik saluran (Z_0) yang dibutuhkan. Untuk saluran yang sempit dengan $w/h \leq 2$, impedans karakteristik diberikan oleh (8) [9].

$$Z_0 = \frac{119,9}{\sqrt{2(\epsilon_r + 1)}} \left[\ln \left\{ \frac{4h}{w} + \left\{ \left(\frac{4h}{w} \right)^2 + 2 \right\}^{\frac{1}{2}} \right\} - \frac{(\epsilon_r - 1)}{2(\epsilon_r + 1)} \left(0.4516 + \frac{0.2416}{\epsilon_r} \right) \right] \quad (8)$$

dengan

- ϵ_r = konstanta dielektrik substrat
- h = ketebalan substrat
- w = lebar saluran pencatu.

Pada (8) dapat dilihat bahwa sangat rumit untuk mendapatkan nilai w secara eksplisit. Untuk impedans $Z_0 = 50 \Omega$ dan jenis substrat FR4 ($\epsilon_r = 4,4$ dan $h = 1,6$ mm), maka nilai w hasil iterasi diperlihatkan pada Tabel I.

TABEL I
ITERASI MENCARI LEBAR SALURAN PENCATU

| Lebar saluran pencatu w (mm) | Impedansi saluran Z_0 (Ω) |
|--------------------------------|--------------------------------------|
| 4 | 42,2636 |
| 3 | 50,5887 |
| 3,5 | 50,5887 |
| 3,05 | 50,0872 |
| 3,058 | 50,0081 |
| 3,0588 | 50,0002 |
| 3,05881 | 50,0001 |

Dari Tabel I dapat dilihat bahwa nilai w yang menghasilkan impedans $Z_0 = 50 \Omega$ dengan tepat memiliki angka desimal yang sangat panjang. Untuk kemudahan dalam simulasi dan fabrikasi, maka nilai w yang digunakan adalah 3 mm. Nilai ini dapat digunakan karena selisih sekitar $0,5887 \Omega$ relatif lebih kecil dan dapat ditoleransi. Adapun panjang saluran disesuaikan hingga melewati *slot* tingkap dan dapat diatur untuk kesesuaian impedans (*matching impedance*). Panjang tersebut dapat diperoleh dari iterasi yang dilakukan dengan bantuan simulator. Dengan nilai panjang yang sesuai akan diperoleh nilai VSWR yang paling optimal.

III. PARAMETER ANTENA

Unjuk kerja suatu antenna mikrostrip dapat diamati dari parameternya. Beberapa parameter utama dari sebuah antenna mikrostrip akan dijelaskan sebagai berikut.

A. VSWR

Voltage standing wave ratio (VSWR) adalah perbandingan amplitude tegangan antara gelombang berdiri (*standing wave*) maksimum ($|V|_{\text{max}}$) dan minimum ($|V|_{\text{min}}$). Secara khusus, VSWR dapat dinyatakan dengan persamaan [2], [10].

$$VSWR = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} \quad (9)$$

dengan Γ = koefisien refleksi tegangan.

Refleksi tegangan terjadi akibat tidak sesuainya impedans saluran transmisi dan impedans beban terminasi, dan dinyatakan sebagai (10) [2], [3], [10].

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (10)$$

dengan

- Z_L = impedans beban terminasi
- Z_0 = impedans saluran transmisi.

Kondisi terbaik adalah ketika tidak ada refleksi gelombang tegangan, yang berarti saluran dalam keadaan sesuai sempurna (*perfect match*), sehingga VSWR = 1. Namun, kondisi ini

pada praktiknya sulit didapatkan. Pada umumnya nilai VSWR yang masih memungkinkan untuk digunakan adalah ≤ 2 yaitu pada saat $|\Gamma|$ bernilai $1/3$ atau pada saat $Z_L = 2 Z_0$ [10].

B. Return Loss

Return loss (S11) terjadi akibat adanya diskontinuitas antara impedans saluran transmisi dan impedans masukan beban. Return loss merupakan koefisien refleksi dalam bentuk logaritmik yang dinyatakan sebagai (11) [3].

$$return\ loss = -20\log_{10}(|\Gamma|). \tag{11}$$

Untuk nilai VSWR < 2 , dengan menggunakan (9) - (11) di atas akan didapatkan nilai return loss lebih kecil dari $-9,54$ dB [3], [10].

C. Lebar-Pita

Lebar-pita didefinisikan sebagai rentang frekuensi kerja dari suatu antenna. Nilai lebar pita dapat diketahui apabila nilai frekuensi bawah dan frekuensi atas sudah diketahui. Frekuensi bawah (f_b) adalah nilai frekuensi awal dari frekuensi kerja antenna, sedangkan frekuensi atas (f_a) merupakan nilai frekuensi akhir dari frekuensi kerja antenna. Lebar-pita secara umum dapat dinyatakan sebagai berikut [10].

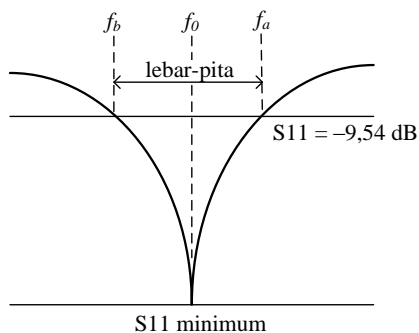
$$Lebar-pita = f_a - f_b. \tag{12}$$

Lebar-pita dapat juga dinyatakan dalam bentuk persentase, yang dirumuskan sebagai berikut [10].

$$\% Lebar-pita = \frac{f_a - f_b}{f_0} \times 100\% \tag{13}$$

dengan f_0 = frekuensi tengah

Sebuah ilustrasi dari lebar-pita yang diperoleh berdasarkan grafik return loss (S11) terhadap frekuensi dari nilai return loss $\leq -9,54$ dB diperlihatkan pada Gbr. 2.

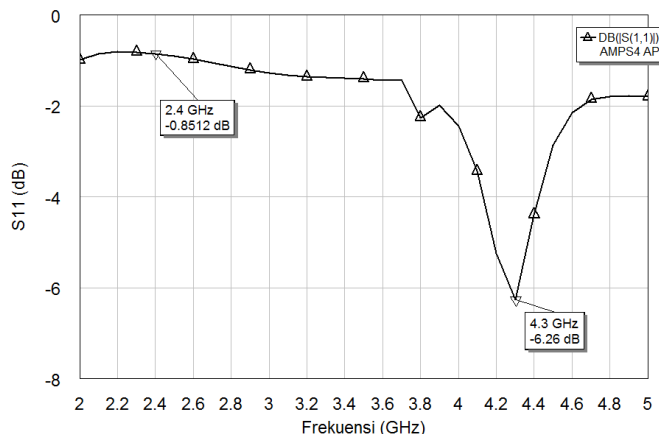


Gbr. 2 Rentang frekuensi yang menjadi lebar-pita.

IV. SIMULASI DAN OPTIMALISASI

Berdasarkan rancangan yang diperoleh dari perhitungan, selanjutnya dilakukan simulasi. Gbr. 3 memperlihatkan grafik return loss (S11) hasil simulasi rancangan awal tersebut. Dari simulasi rancangan awal tersebut, dapat dilihat bahwa antenna yang dihasilkan cenderung beresonansi pada frekuensi 4,3 GHz dengan nilai S11 sebesar $-6,26$ dB. Pada frekuensi resonansi yang diharapkan, yaitu 2,4 GHz, hanya diperoleh nilai S11 sebesar $-0,8512$ dB. Hasil ini sangat tidak tepat jika

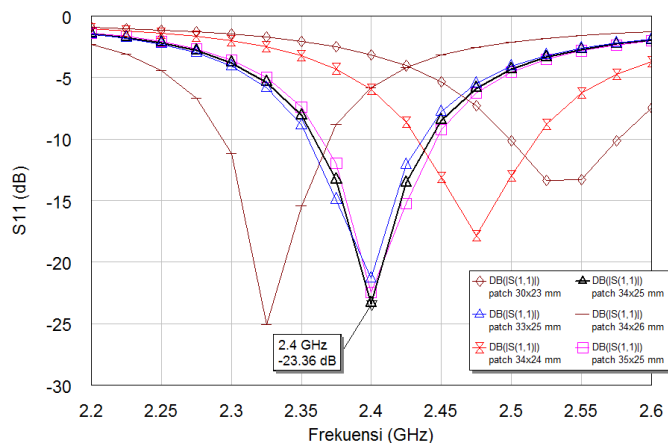
dikaitkan dengan masalah pembulatan yang dilakukan pada perancangan. Akan tetapi, hal ini lebih disebabkan pada pencatu tingkap terganggu, yaitu dimensi slot tingkap, yang dapat mempengaruhi frekuensi resonansi.



Gbr. 3 Grafik return loss (S11) hasil simulasi rancangan awal.

Untuk mendapatkan hasil yang optimal, dapat dilakukan iterasi terhadap dimensi patch, slot tingkap, dan panjang saluran pencatu. Namun, ketiga komponen ini memiliki kombinasi yang sangat banyak untuk memberikan hasil yang optimal. Oleh karena itu, perlu dianalisis perubahan pada sebuah komponen, sedangkan komponen yang lainnya tetap, seperti diperlihatkan pada Gbr. 4 sampai Gbr. 6.

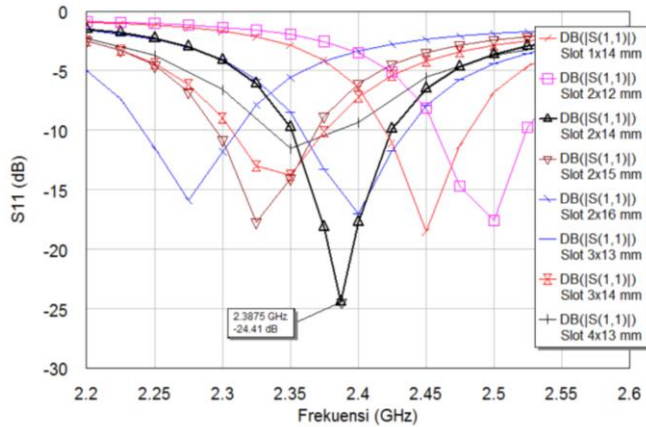
Pada Gbr. 4 diperlihatkan grafik S11 dari perubahan dimensi patch dengan dimensi slot tingkap (2×14) mm dan panjang saluran pencatu 32 mm. Gbr. 5 memperlihatkan grafik S11 dari perubahan dimensi slot tingkap dengan dimensi patch (34×25) mm² dan panjang saluran pencatu 41 mm. Adapun nilai S11 dari iterasi terhadap perubahan panjang saluran pencatu dengan dimensi patch (34×25) mm² dan slot tingkap (2×14) mm² diperlihatkan pada Gbr. 6. Secara umum, urutan optimalisasi dilakukan pertama kali terhadap dimensi patch, karena mampu menghasilkan pengarahannya frekuensi yang lebih signifikan.



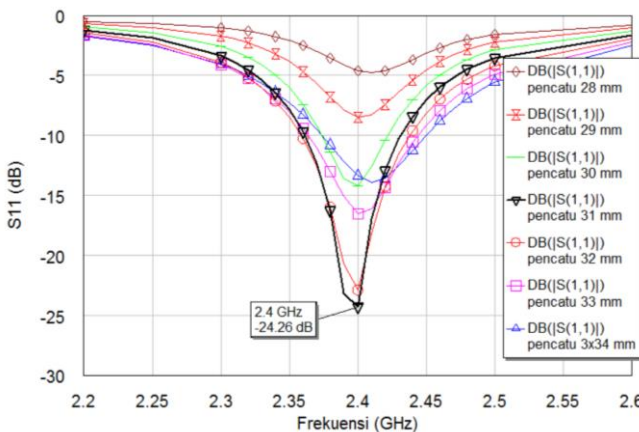
Gbr. 4 Grafik S11 hasil iterasi dengan dimensi patch yang berbeda.

Adanya karakterisasi perubahan yang dihasilkan dari masing-masing iterasi akan membantu untuk lebih cepat

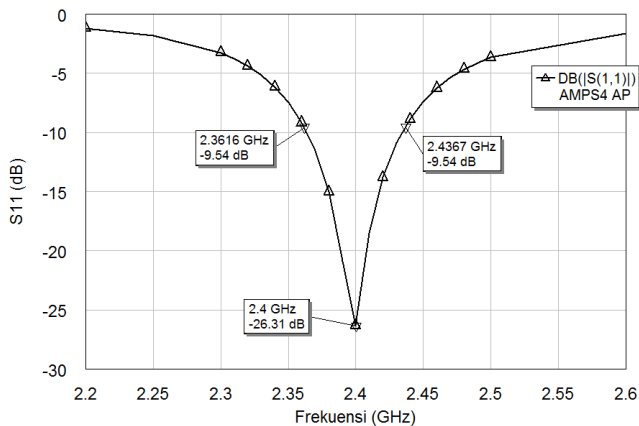
mendapatkan hasil yang optimal, karena tidak dilakukan iterasi yang tidak perlu. Optimalisasi rancangan dilakukan dengan mengatur dimensi *patch*, *slot* tingkap, dan panjang saluran pencatu. Adapun *ground plane* mengikuti perubahan dimensi *patch*. Rancangan yang dianggap optimal adalah rancangan yang menghasilkan nilai S11 terendah pada frekuensi 2,4 GHz. Hasil simulasi S11 dari rancangan antenna mikrostrip *patch* segi empat pencatu tingkat terdang yang optimal diperlihatkan pada Gbr. 7.



Gbr. 5 Grafik S11 hasil iterasi dengan dimensi *slot* tingkap yang berbeda.

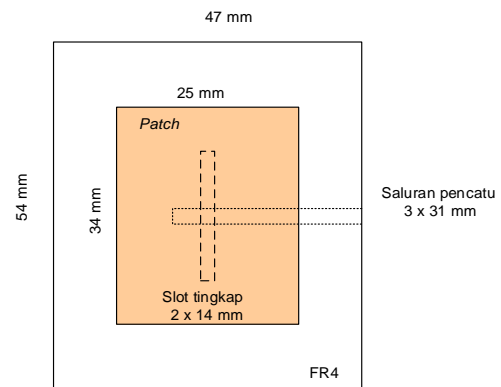


Gbr. 6 Grafik S11 hasil iterasi dengan panjang pencatu yang berbeda.



Gbr. 7 Grafik S11 hasil simulasi rancangan yang optimal.

Geometri antenna yang memberikan hasil optimal tersebut diperlihatkan pada Gbr. 8 dan perbandingan antara rancangan awal dan rancangan optimal diperlihatkan pada Tabel II.



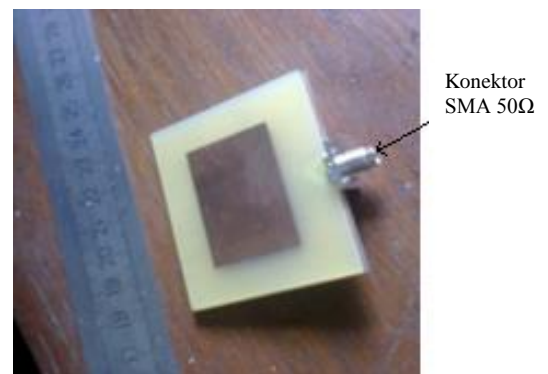
Gbr. 8 Geometri rancangan antenna yang optimal.

TABEL II
PERBANDINGAN RANCANGAN

| Parameter | Rancangan Awal | Rancangan Optimal | Keterangan |
|------------------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------------|
| Ukuran <i>patch</i> (Luas) | 38×28 (1064 mm ²) | 34×25 (850 mm ²) | Reduksi <i>patch</i> sebesar 25,2 % |
| <i>Slot</i> tingkap | 3×25 | 2×14 | Reduksi <i>slot</i> tingkap |
| S11 pada 2,4 GHz | -0,8512 dB | -26,31 dB | Peningkatan sangat signifikan |
| Ukuran panjang <i>feeder</i> | 34 mm | 31 mm | Reduksi panjang <i>feeder</i> |
| Ukuran <i>ground plane</i> | 59×49 mm ² | 54×47 mm ² | Reduksi dimensi <i>ground plane</i> |

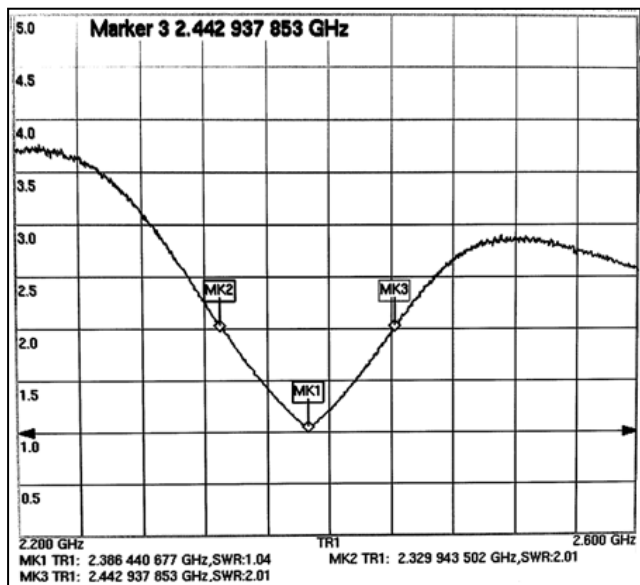
V. PENGUKURAN DAN PEMBAHASAN

Rancangan yang optimal dari hasil simulasi dan iterasi selanjutnya difabrikasi. Hasil fabrikasi antenna yang optimal tersebut diperlihatkan pada Gbr. 9. Untuk mendapatkan spesifikasi hasilnya, dilakukan pengukuran menggunakan *vector network analyzer*. Sebagai penghubung antenna dan alat ukur digunakan konektor SMA 50Ω.



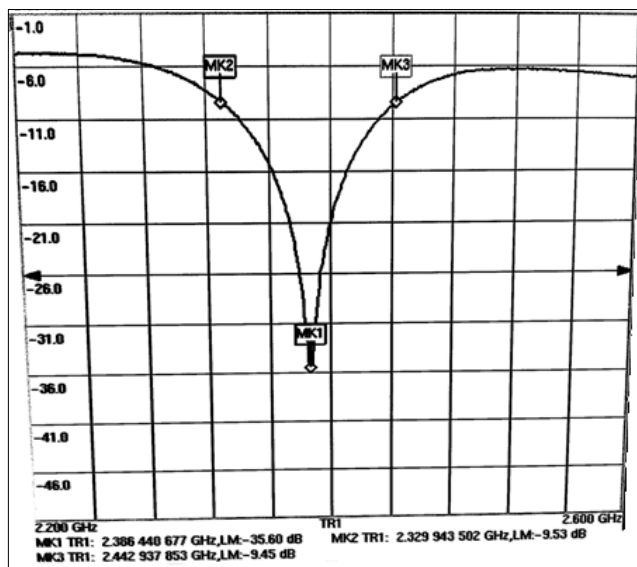
Gbr. 9 Fabrikasi antenna.

Gbr. 10 memperlihatkan hasil pengukuran VSWR antenna mikrostrip *patch* segi empat dengan pencatu tingkat terdang yang telah difabrikasi. Pada pengukuran tersebut diperoleh nilai VSWR minimum sebesar 1,04 pada frekuensi 2,386 GHz.



Gbr. 10 Hasil pengukuran VSWR.

Berdasarkan hasil pengukuran terhadap S11 diperoleh nilai S11 minimum sebesar -35,6 dB pada frekuensi 2,386 GHz, seperti diperlihatkan pada Gbr. 11. Adapun pada S11 ≤ -9,54 dB, perolehan frekuensi sekitar 2,44 GHz dan 2,33 GHz.



Gbr. 11 Hasil pengukuran S1.

Berdasarkan hasil pengukuran S11, pencapaian lebar-pita pada S11 ≤ -9,54 dB dihitung dengan menggunakan (12) dan (13), yaitu sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \text{Lebar-pita} &= f_{atas} - f_{bawah} \\ &= (2,44 - 2,33) \text{ GHz} \\ &= 110 \text{ MHz} \end{aligned}$$

dan

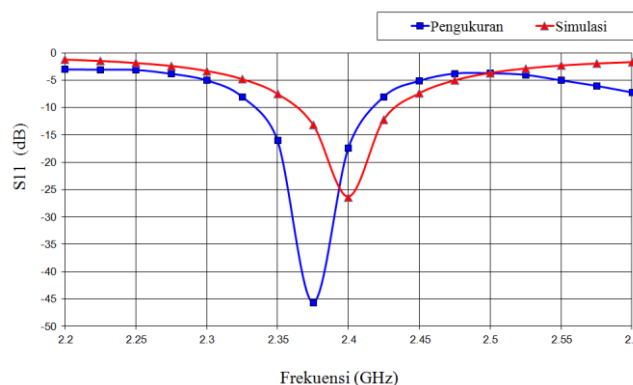
$$\begin{aligned} \% \text{ Lebar-pita} &= \frac{2,44 \text{ GHz} - 2,33 \text{ GHz}}{2,386 \text{ GHz}} \times 100\% \\ &= 4,61 \%. \end{aligned}$$

Dengan demikian, pencapaian lebar-pita antenna mikrostrip *patch* segi empat dengan pencatu tingkat terdang pada frekuensi 2,4 GHz adalah 110 MHz atau 4,61%. Adapun pencapaian lebar-pita dengan antenna yang sejenis dan frekuensi yang sama, yaitu antenna mikrostrip *patch* segi empat dengan pencatuan langsung (*feed line*), secara simulasi hanya 62,1 MHz [7]. Secara umum, perbandingan antara pencatuan langsung dan pencatu tingkat terdang untuk antenna mikrostrip *patch* segi empat pada frekuensi resonansi 2,4 GHz diperlihatkan pada Tabel III.

TABEL III
PERBANDINGAN HASIL CAPAIAN ANTENA MIKROSTRIP *PATCH* SEGI EMPAT PADA FREKUENSI 2,4 GHz

| Parameter | Pencatu tingkat terdang | Pencatu langsung [7] |
|-----------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| Dimensi <i>Patch</i> (Luas) | 34×25 (850 mm ²) | 40×29 (1160 mm ²) |
| VSWR minimum | 1,04 | 1,7187 |
| lebar-pita | 110 MHz | 62,1 MHz |

Berdasarkan perbandingan tersebut tampak bahwa pencatu tingkat terdang mampu meningkatkan lebar-pita sebesar 77,13 % dari pencatuan langsung. Dimensi *patch* mengalami reduksi sekitar 25 % dan VSWR minimum juga dapat ditingkatkan menjadi 1,04. Dengan lebar pita mencapai 110 MHz, rancangan antenna mikrostrip *patch* segi empat dengan pencatu tingkat terdang dapat diusulkan untuk aplikasi-aplikasi pita-lebar (*broadband*) dengan kapasitas lebar-pita sekitar 100 MHz, seperti WLAN (2,4 – 2,5 GHz) dan WiMax (2,3 – 2,4 GHz). Untuk penyesuaian frekuensi tengah yang dibutuhkan, dapat dilakukan optimasi dengan mengatur parameter rancangan antenna, yaitu *patch*, ukuran *slot* tingkat, dan panjang saluran pencatu.



Gbr. 12 Perbandingan S11 hasil simulasi dan pengukuran.

Perbandingan grafik S11 hasil simulasi dan pengukuran antenna mikrostrip *patch* segi empat dengan pencatu tingkat terdang diperlihatkan pada Gbr. 12.

Pada Gbr. 12 dapat dilihat bahwa terdapat pergeseran lebar-pita dan frekuensi tengah antara hasil simulasi dan hasil

pengukuran. Lebar-pita hasil simulasi adalah 2,4367 - 2,3616 GHz (75,1 MHz), sedangkan lebar-pita hasil pengukuran adalah 110 MHz. Frekuensi tengah pada simulasi adalah 2,4 GHz dengan nilai S11 minimum adalah -26,31 dB, sedangkan frekuensi tengah hasil pengukuran adalah 2,386 GHz dengan S11 minimum adalah -35,60 dB.

VI. KESIMPULAN

Pada tulisan ini telah dibahas tentang pencapaian lebar-pita dari rancangan antenna mikrostrip *patch* segi empat dengan pencatu tingkap terdangeng untuk frekuensi resonansi 2,4 GHz. Rancangan antenna yang optimal diperoleh dengan melakukan iterasi terhadap dimensi *patch*, *slot* tingkap, panjang saluran pencatu, dan dimensi *ground plane*. Berdasarkan hasil pengukuran terhadap antenna yang optimal, lebar-pita yang dihasilkan mencapai 110 MHz (2,33 GHz - 2,44 GHz). Pencapaian lebar-pita tersebut lebih lebar 77,13% dibandingkan dengan pencatuan langsung. Lebar-pita sebesar 110 MHz menjadikan rancangan antenna tersebut dapat diusulkan untuk aplikasi pita lebar seperti WLAN.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih diucapkan kepada Kepala dan Staf Laboratorium Telekomunikasi Departemen Teknik Elektro FT USU yang telah memberikan kesempatan dan membantu untuk melakukan pengukuran antenna menggunakan *vector network analyser Anritsu MS2034B*. Terima kasih juga diucapkan kepada tim reviewer JNTETI atas saran dan masukan-masukannya.

REFERENSI

- [1] Girish Kumar dan K.P. Ray, *Broadband Microstrip Antennas*, Artech House, London, 2003.
- [2] Constantine A. Balanis, *Antenna Theory : Analysis and Design*, Edisi ketiga, Jhon Wiley & Sons, Canada, 2005.
- [3] Yi Huang dan Kevin Boyle, *Antennas : From Theory to Practice*, Jhon Wiley & Sons, United Kingdom, 2008.
- [4] Ali Hanafiah Rambe, Eddy Marlianto, Nasruddin M. N., Fitri Arnia . "Optimizing Rectangular Patch Antenna with Microstrip Line Feed Using Single Stub", *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, Vol.2 - Issue 12, 2013, hal. 1599 – 1602.
- [5] Vinayak Samarthay, Swarna Pundir, Bansi Lal, "Designing and Optimization of Inset Fed Rectangular Microstrip Patch Antenna (RMPA) for Varying Inset Gap and Inset Length", *International Journal of Electronic and Electrical Engineering*, Volume 7, Number 9 (2014), hal. 1007-1013.
- [6] Amandeep Singh dan Surinder Singh, "Miniaturized Wideband Aperture Coupled Microstrip Patch Antenna by Using Inverted U-Slot", *International Journal of Antennas and Propagation*, Volume 2014, Hindawi Publishing Corporation.
- [7] Ali Hanafiah Rambe, "Perancangan Antena Mikrostrip Patch Segiempat dengan Pencatuan Langsung (Feed Line)", *JiTEKH*, Edisi: 2 Vol. 01 Maret 2013, hal. 6 – 10.
- [8] Adel Bedair Abdel-Mooty Abdel-Rahman, "Design and Development of High Gain Wideband Microstrip Antenna and DGS Filters Using Numerical Experimentation Approach", Dissertation, University of Magdeburg, Germany, 2005.
- [9] E.H. Focks dan R.A. Zakarevicius, *Microwave Engineering Using Microstrip Circuits*, Prentice Hall, Australia, 1990.
- [10] J.L.Volakis, *Antenna Engineering Handbook*, The McGraw-Hill Companies, United States of America, 2007.