

Rancang Bangun Antena Mikrostrip Patch Segi Empat *Multiband* Pada Frekuensi 2,1 , 2,6 , 2,8 dan 3,3 GHz

Sri Indah Rezkika

Universitas Al-Azhar, Jl. Pintu Air IV No 214, Kwala Bekala, Medan, Sumatera Utara, Indonesia
E-Mail: sriindahrezkika@gmail.com

ABSTRACT

Multiband antenna is a type of antenna that can work simultaneously at four different frequency ranges without the need for four physically different antennas. This paper describes the design of multiband rectangular patch microstrip antennas for various applications, namely 3G, LTE, RFID and WIMAX. The antenna measurement results show that at a frequency of 1.945 GHz - 2.394 GHz, a bandwidth of 449 MHz is obtained. The second frequency works from 2.635 GHz – 2.706 GHz to obtain a wide bandwidth of 71 MHz. The third frequency works from 2.768 GHz – 2.862 GHz to obtain a wide bandwidth of 94 MHz. The fourth frequency works from 3.249 GHz – 3.480 GHz to obtain a wide bandwidth of 231 MHz with each frequency obtaining a VSWR value ≤ 2 .

Keyword : microstrip antenna, rectangular patch, multiband

PENDAHULUAN

Komunikasi nirkabel adalah segmen yang mendominasi di bidang komunikasi. Antena patch mikrostrip memainkan peran penting dalam komunikasi nirkabel seperti mobile komunikasi, komunikasi radio. GSM, WiMAX dan WLAN adalah fitur utama komunikasi nirkabel. Ada banyak desain antena yang tersedia dalam literatur dengan kinerja yang sangat baik meskipun banyak dari mereka memiliki keterbatasan utama seperti ukurannya yang besar, terutama untuk portabel perangkat. Karena antena mikrostrip berukuran kecil dan ringan antena dengan karakteristik kinerja tinggi, sangat cocok untuk perangkat komunikasi portabel. Desain patch Microstrip antena dengan geometri sederhana pasti memiliki kelebihan pada antena konvensional lainnya. Antena mikrostrip mampu memberikan polarisasi linier dan sirkular. Dengan menggunakan teknologi papan sirkuit tercetak modern, tidak mahal untuk membuat antena mikrostrip. Mereka juga kompatibel dengan rangkaian gelombang mikro dan MMIC. Ada berbagai teknik feeding untuk antena seperti feed CPW, feed coaxial, umpan berpasangan dan umpan bukaan [1].

Pada tulisan ini, antena yang diusulkan memiliki feeding CPW teknik [2][3]. Antena yang diusulkan memiliki struktur yang sangat sederhana. Beberapa slot tergores pada feedline dan patch. Ini antena memenuhi protokol GSM, WiMAX dan WLAN teknologi [4][5]. Antena yang diusulkan memiliki bentuk

baru patch yang bertanggung jawab untuk frekuensi resonansi [6][7].

Ada empat frekuensi resonansi antena yang diusulkan, adalah 2,1 GHz, 2,6 GHz, 2,8 GHz dan 3,3 GHz. *Return loss* antena yang diusulkan memuaskan (<10 dB) [8]. Direktivitas dan penguatan antena adalah cukup baik untuk operasi. Di sini frekuensi resonansi bisa divariasikan dengan memvariasikan nilai komponen geometri. VSWR antena antara 1-2 dB yang menandakan pencocokan impedansi antena yang diusulkan sangat baik. Sehingga antena yang diusulkan memenuhi semua syarat desain dan antena mikrostrip yang efisien dan optimal [9].

Antena (*antenna* atau *area*) adalah perangkat yang berfungsi untuk memindahkan energi gelombang elektromagnetik dari media kabel ke udara atau sebaliknya dari udara ke media kabel. Karena merupakan perangkat perantara antara media kabel dan udara, maka antena harus mempunyai sifat yang sesuai (*match*) dengan media kabel pencatunya. Prinsip ini telah diterangkan dalam saluran transmisi.

Dalam perancangan suatu antena, beberapa hal yang harus diperhatikan adalah :

1. bentuk dan arah radiasi yang diinginkan
2. polarisasi yang dimiliki
3. frekuensi kerja
4. lebar band (*bandwidth*), dan
5. impedansi input yang dimiliki.

Untuk antena yang bekerja pada band VLF, LF, HF, VHF dan UHF bawah, jenis antena kawat (*wire antenna*) dalam prakteknya sering digunakan, seperti halnya antena dipole $1/2\lambda$, antena monopole dengan *ground plane*, antena loop, antena Yagi-Uda array, antena log periodik dan sebagainya. Antena-antena jenis ini, dimensi fisiknya disesuaikan dengan panjang gelombang dimana sistem bekerja. Semakin tinggi frekuensi kerja, maka semakin pendek panjang gelombangnya, sehingga semakin pendek panjang fisik suatu antena. Untuk antena gelombang mikro (*microwave*), terutama SHF ke atas, penggunaan antena luasan (*aperture antenna*) seperti antena horn, antena parabola, akan lebih efektif dibanding dengan antena kawat pada umumnya. Karena antena yang demikian mempunyai sifat pengarahan yang baik untuk memancarkan gelombang elektromagnetik [10].

Teknologi komunikasi nirkabel salah satu teknologi yang banyak digunakan dalam dunia telekomunikasi. Sebagai teknologi yang tidak memerlukan sarana fisik dalam *interface*-nya, teknologi komunikasi nirkabel menuntut sistem antena bekerja meskipun terdapat penghalang antar pengirim dan penerima. Salah satu jenis antena yang sesuai untuk teknologi komunikasi nirkabel adalah antena mikrostrip, karena memiliki karakteristik dimensi kecil, ringan, ekonomis dan mudah dalam instalasinya [11]. Antena mikrostrip tidak hanya dapat digunakan untuk satu *band* frekuensi, tetapi juga dapat digunakan untuk lebih dari satu *band* frekuensi. Sehingga, sistem radio menjadi lebih efisien.

PENGETIAN ANTENA

Dalam sejarah komunikasi, perkembangan teknik informasi tanpa menggunakan kabel ditetapkan dengan nama antena. Antena berasal dari bahasa latin 'antena' yang berarti tiang kapal layar. Dalam pengertian sederhana kata latin ini berarti juga 'penyentuh atau peraba' sehingga kalau dihubungkan dengan teknik komunikasi berarti bahwa antena mempunyai tugas menyelusuri jejak gelombang elektromagnetik, hal ini jika antena berfungsi sebagai penerima. Sedangkan jika sebagai pemancar maka tugas antena tersebut adalah menghasilkan sinyal gelombang elektromagnetik. Antena dapat juga didefinisikan sebagai sebuah atau sekelompok konduktor yang digunakan untuk memancarkan atau meneruskan gelombang elektromagnetik menuju ruang bebas atau menangkap gelombang elektromagnetik dari ruang bebas. Energi listrik dari pemancar dikonversi menjadi gelombang elektromagnetik dan oleh sebuah antena yang

kemudian gelombang tersebut dipancarkan menuju udara bebas. Pada penerima akhir gelombang elektromagnetik dikonversi menjadi energi listrik dengan menggunakan antena.

Ada beberapa karakter penting antena yang perlu dipertimbangkan dalam memilih jenis antena untuk suatu aplikasi yaitu pola radiasi, direktivitas, gain, dan polarisasi. Karakter-karakter ini umumnya sama pada sebuah antena, baik ketika antena tersebut menjadi peradiasi atau menjadi penerima, untuk suatu frekuensi, polarisasi, dan bidang irisan tertentu.



Gambar 1. Antena sebagai Transmitter dan Receiver. [12]

GELOMBANG ELEKTROMAGNETIK

Gelombang elektromagnetik adalah gelombang yang mempunyai sifat listrik dan sifat magnet secara bersamaan. Gelombang radio merupakan bagian dari gelombang elektromagnetik pada spektrum frekuensi radio. Gelombang dikarakteristikan oleh panjang gelombang dan frekuensi. Panjang gelombang (λ) memiliki hubungan dengan frekuensi (f) dan kecepatan (v) yang ditunjukkan pada Persamaan berikut : [12]

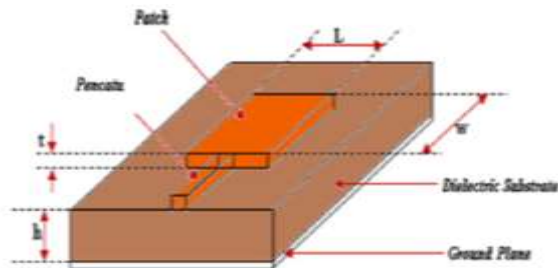
$$\lambda = \frac{v}{f} \tag{1}$$

Kecepatan (v) bergantung pada medium. Ketika medium rambat adalah hampa udara (*free space*), maka : [13]

$$v=c=3 \times 10^8 \text{ m/s} \tag{2}$$

ANTENA MIKROSTRIP

Antena mikrostrip merupakan salah satu antena komunikasi nirkabel gelombang mikro yang digunakan sebagai radiator pada sejumlah sistem telekomunikasi modern seperti *Radio Detection and Ranging* (Radar) dan *Global Positioning System* (GPS). Antena mikrostrip merupakan sebuah antena yang tersusun atas tiga elemen, yaitu: elemen peradiasi (*patch*), elemen *dielectric substrate* dan elemen pentanahan (*ground plane*). Bentuk antena mikrostrip dapat dilihat pada Gambar 1 [13].



Gambar 2. Struktur Antena Mikrostrip [13].

Hal yang harus dipertimbangkan dalam merancang *patch* yaitu pertimbangan memilih substrat. Elemen ini ada beberapa jenis yang dapat digolongkan berdasarkan nilai konstanta dielektrik dan ketebalannya. Dalam pemilihan jenis substrat sangat dibutuhkan pengenalan tentang spesifikasi umum dari substrat tersebut yaitu kualitasnya [14]. Tabel 1 menunjukkan spesifikasi substrat yang digunakan.

Tabel 1. Spesifikasi Substrat

Jenis Substrat	FR-4 epoxy
Konstanta Dielektrik relative (ϵ_r)	4,4
Dielektrik Loss Tangent ($\tan \delta$)	0,02
Ketebalan substrat (h)	1,6

PARAMETER-PARAMETER ANTENA

Parameter-parameter antena digunakan untuk menguji atau mengukur performa antena yang digunakan, yaitu frekuensi antena, VSWR, *bandwidth*, *gain* antena, dan polarisasi [13].

1. VSWR (Voltage Standing Wave Ratio)

Gelombang berdiri memiliki tegangan maksimum dan minimum dalam saluran yang besarnya tergantung pada tegangan maupun arus pantul. Koefisien refleksi tegangan memiliki nilai kompleks, untuk beberapa kasus yang sederhana, ketika bagian *imaginer* dari Γ adalah nol, maka:

$\Gamma = -1$: refleksi negatif maksimum, ketika saluran terhubung singkat.

$\Gamma = 0$: tidak ada refleksi, ketika saluran dalam keadaan *matched* sempurna.

$\Gamma = +1$: refleksi positif maksimum, ketika saluran dalam rangkaian terbuka.

Secara sederhana rumus untuk menentukan VSWR [13].

$$VSWR = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{1+|\Gamma(z)|}{1-|\Gamma(z)|} \quad (3)$$

2. Frekuensi Resonansi

Frekuensi resonansi adalah frekuensi dimana antena mikrostrip memiliki impedansi resistif dimana, nilai reaktansi impedansi sama dengan nol [13].

3. Bandwidth

Bandwidth suatu antena didefinisikan sebagai rentang frekuensi yang berhubungan dengan beberapa karakteristik antena lain seperti, impedansi masukan, *bandwidth*, polarisasi dan *gain*. *Bandwidth* suatu antena ditentukan oleh parameter yang digunakan. Dimana, menentukan *bandwidth* adalah frekuensi atas kurang frekuensi bawah dibagi dengan frekuensi *carrier*, dirumuskan sebagai berikut [14]:

$$BW(\%) = \frac{f_{upper}-f_{lower}}{f_0} \times 100\% \quad (4)$$

4. Gain

Gain adalah karakter antena yang terkait dengan kemampuan antena mengarahkan radiasi sinyalnya atau penerima sinyal dari arah tertentu [13].

5. Pola Radiasi

Pola radiasi adalah fungsi matematika dari sifat radiasi antena sebagai fungsi ruang, biasanya terdiri dari [12]:

- a) Lobe utama (*main lobe*)
- b) *Side lobe* (cuping)
- c) *Back lobe*

6. Return Loss

Return loss adalah perbandingan antara *amplitude* dari gelombang yang direfleksikan terhadap *amplitude* gelombang yang dikirim. Besarnya *return loss* bervariasi tergantung pada frekuensi [13].

7. Impedansi Masukan

Impedansi masukan dari suatu antena dapat dilihat sebagai impedansi dari antena tersebut pada terminalnya. Impedansi masukan adalah impedansi yang dipresentasikan oleh antena pada terminalnya [13].

Parameter – parameter antena yang telah disebutkan di atas tidak luput dengan dimensi antena yang harus diketahui terlebih dahulu untuk digunakan dalam perhitungan rancangan antena yang akan dirancang nanti. Untuk itu perlulah kita memahami dan mengetahui dimensi dan rumus rumus nya. Tabel 2 menunjukkan dimensi antena beserta rumusnya.

Tabel 2. Dimensi Antena

Dimensi Antena (mm)	Rumus
Lebar Patch (W)	$W = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\frac{(\epsilon_r + 1)}{2}}}$
Panjang Patch (L)	$L = L_{eff} - 2\Delta L$
Panjang Patch Efektif (L_{eff})	$L_{eff} = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\epsilon_{reff}}}$
Konstanta dielektrik relatif (ϵ_{reff})	$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{1 + \frac{12h}{W}}} \right)$
Pertambahan panjang dari L (ΔL)	$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{reff} + 0,3) \left(\frac{W}{h} + 0,264\right)}{(\epsilon_{reff} - 0,258) \left(\frac{W}{h} + 0,8\right)}$
Panjang ground plane (L_g)	$L_g = 6h + L$
Lebar ground plane (W_g)	$W_g = 6h + W$
Lebar saluran pencatu (W_f)	$W = \frac{2h}{\pi} \left\{ B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} [\ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r}] \right\}$
Panjang saluran pencatu (L_f)	$L = \frac{1}{4} \times \lambda_g$

ANTENA MULTIBAND

Multiband antena adalah antena yang memiliki kemampuan untuk bekerja pada beberapa frekuensi secara efektif. Multiband antena digunakan agar dapat memenuhi kebutuhan akan beberapa jenis antena yang memiliki frekuensi berbeda sehingga mengurangi penggunaan antena dan pembiayaannya. Ada beberapa cara yang dapat digunakan untuk menghasilkan antena multiband. Salah satunya adalah dengan memberikan slot pada patch antenna [15].

Antena mikrostrip dengan *patch* bercelah adalah salah satu teknik yang dapat digunakan untuk memberi efek hambatan dalam perambatan gelombang, sehingga energi dapat terkonsentrasi disekitar slot. Selain itu jenis slot dapat mempengaruhi frekuensi yang akan

terbentuk dan parameter yang dicapai. Slot dapat diletakkan pada bagian *patch* maupun pada bagian *ground plane*. Ukuran slot didapatkan menggunakan persamaan berikut : [15]

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} \tag{5}$$

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_r} \tag{6}$$

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{reff}}} \tag{7}$$

$$L = \frac{\lambda_g}{4} \tag{8}$$

PENGARUH PANJANG GROUND PLANE

Groundplane memiliki fungsi sebagai reflektor, yaitu pengumpul gelombang elektromagnetik yang akan mengarahkan gelombang ke udara bebas melalui permukaan patch. Bila dimensi groundplane diubah, maka sifat radiasi gelombang juga berubah karena perubahan struktur permukaan pada reflektor antena, akibatnya muncul radiasi ke arah lain dengan intensitas radiasi tertentu [4]. Perubahan luas permukaan groundplane juga mempengaruhi nilai kapasitansi antena. Persamaan kapasitansi antena adalah [10] :

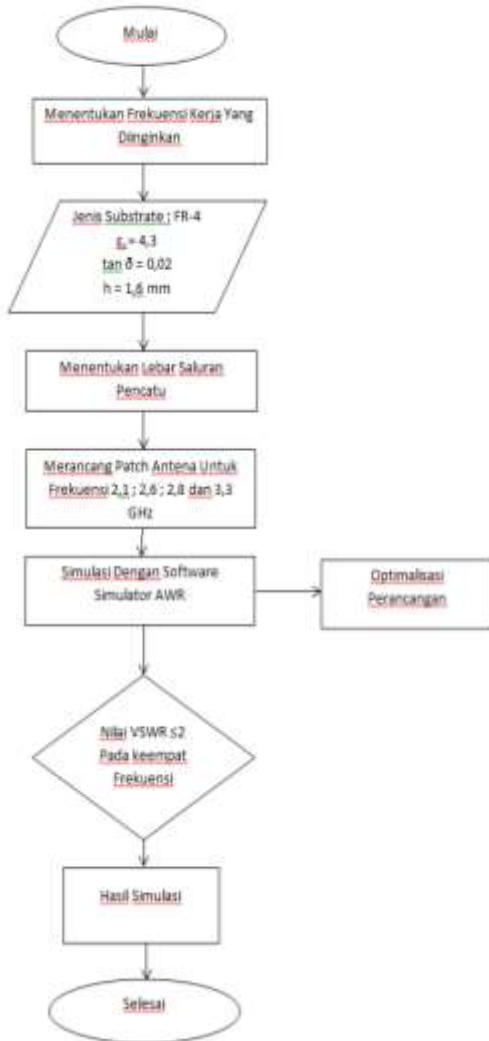
$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d} \tag{9}$$

Dengan ϵ_0 adalah permitivitas ruang hampa, ϵ_r adalah permitivitas relative bahan, A adalah luas groundplane dan d adalah jarak konduktor.

METODE PERANCANGAN ANTENA MULTIBAND

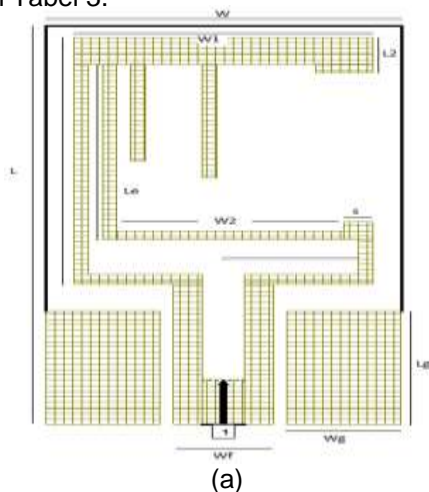
Pada tulisan ini telah dirancang antena mikrostrip yang mampu bekerja pada empat *band* frekuensi. Bentuk *patch* yang digunakan adalah berbentuk persegi empat dengan menggunakan impedansi input sebesar 50 Ω dan bahan substrat FR4 dengan konstanta dielektrik 4,3 dan ketebalan 1,6 mm. [2]

Langkah – langkah dalam merancang antena multiband ini dapat dilihat pada Gambar 3 berikut.

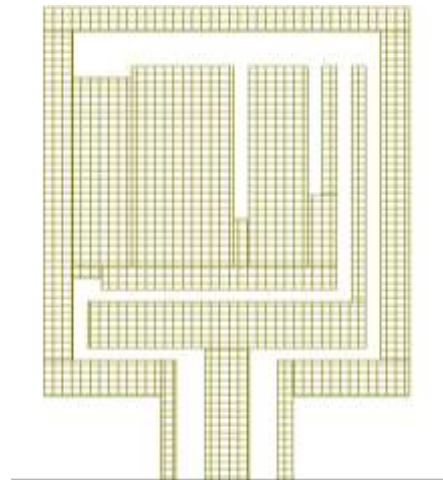


Gambar 3. Diagram Alir Perancangan

Antena mikrostrip *multiband* ini didesain dengan menggunakan simulator AWR 2004 dan telah dipabrikasi dengan ukuran *patch* 25 mm x 46.32 mm. Desain dan ukuran dimensi antena mikrostrip *multiband* dapat dilihat pada Gambar 4 dan Tabel 3.



(a)



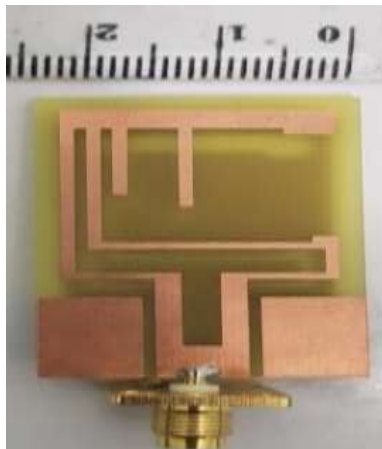
(b)

Gambar 4. Desain Antena Mikrostrip *Multiband*
(a) Tampak Depan (b) Tampak Belakang

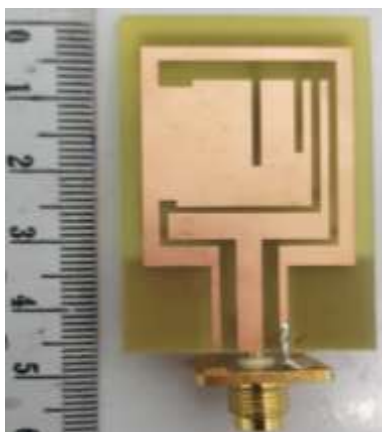
Tabel 3. Parameter Ukuran Dimensi Antena Mikrostrip *Multiband*

Parameter	Nilai (mm)	Keterangan
H	1.6	Ketebalan substrat
L	46.32	Panjang substrat
L1	28.19	Panjang sebagian patch
L2	4.03	Panjang porsi tambahan
Le	20.14	Panjang slot vertikal
Lg	13.09	Panjang patch persegi panjang yang lebih kecil
S	2	Lebar strip
W	25	Lebar substrat
W1	21	Lebar strip atas patch
W2	16	Lebar strip bawah patch
Wg	8	Lebar patch persegi panjang yang lebih kecil
Ws	10	Setengah lebar dari slot horizontal
Wf	7	Lebar garis strip

Hasil Pabrikasi antena mikrostrip *multiband* dapat dilihat pada Gambar 5.



(a)



(b)

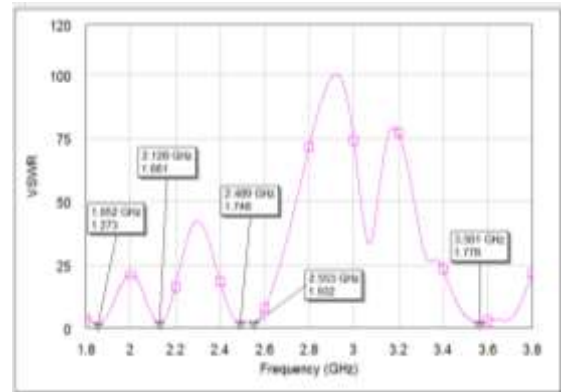
Gambar 5. Hasil Pabrikasi Antena Mikrostrip Multiband (a) Tampak Depan (b) Tampak Belakang

HASIL DAN PEMBAHASAN

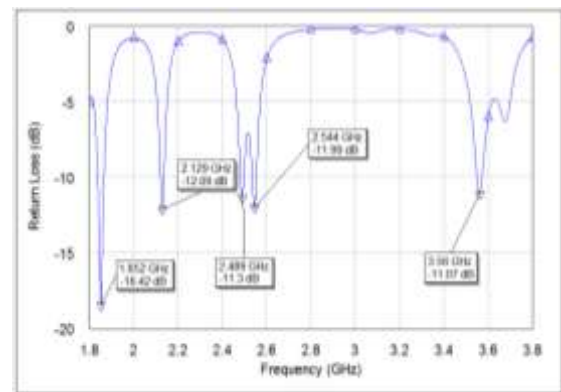
1. Hasil VSWR dan Return Loss Berdasarkan Simulasi

Berdasarkan hasil simulasi, VSWR dan Return Loss dari rancangan antena diperlihatkan pada Gambar 6. Dalam Gambar 6(a) diperoleh hasil VSWR = 1,273 dengan frekuensi kerja 1,852 GHz, VSWR = 1,661 dengan frekuensi kerja 2,128 GHz, VSWR = 1,748 dengan frekuensi kerja 2,489 GHz, VSWR = 1,932 dengan frekuensi kerja 2,553, dan VSWR = 1,778 dengan frekuensi kerja 3,561 GHz.

Dalam Gambar 6(b) diperoleh hasil Return Loss = -18,42 dB dengan frekuensi kerja 1,852 GHz, Return Loss = -12,09 dB dengan frekuensi kerja 2,129 GHz, Return Loss = -11,3 dB dengan frekuensi kerja 2,489 GHz, Return Loss = -11,99 dB dengan frekuensi kerja 2,544, dan Return Loss = -11,07 dengan frekuensi kerja 3,56 GHz.



(a)



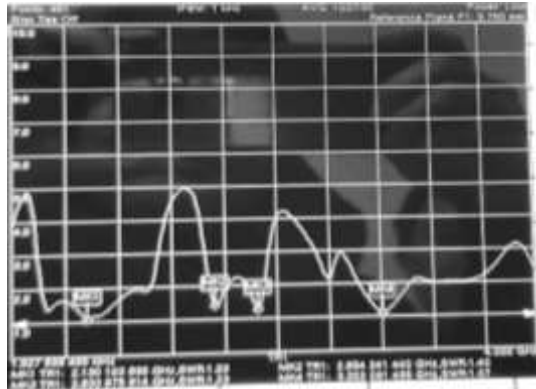
(b)

Gambar 6. (a) Hasil VSWR (b) Return Loss Berdasarkan Simulasi

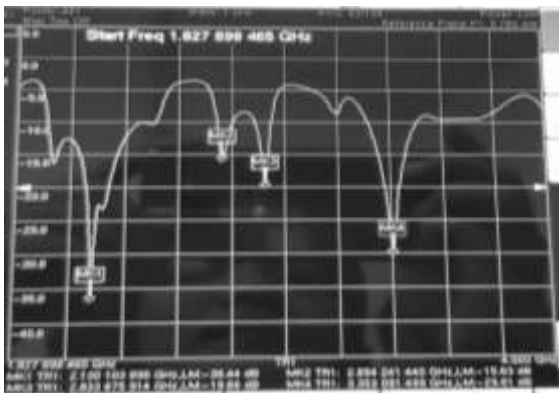
2. Hasil VSWR dan Return Loss Berdasarkan Pengukuran

Berdasarkan hasil pengukuran, VSWR dan Return Loss dari rancangan antena diperlihatkan pada Gambar 7. Dalam Gambar 7(a) diperoleh hasil VSWR = 1,03 dengan frekuensi kerja 2,13 GHz, VSWR = 1,4 dengan frekuensi kerja 2,65 GHz, VSWR = 1,23 dengan frekuensi kerja 2,83 GHz, dan VSWR = 1,07 dengan frekuensi kerja 3,35 GHz.

Dalam Gambar 7(b) diperoleh hasil Return Loss = -36,44 dB dengan frekuensi kerja 2,13 GHz, Return Loss = -15,63 dB dengan frekuensi kerja 2,65 GHz, Return Loss = -19,66 dB dengan frekuensi kerja 2,83 GHz, dan Return Loss = -29,81 dB dengan frekuensi kerja 3,35 GHz.



(a)

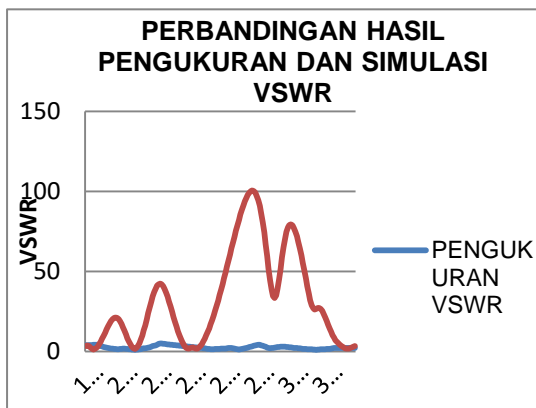


(b)

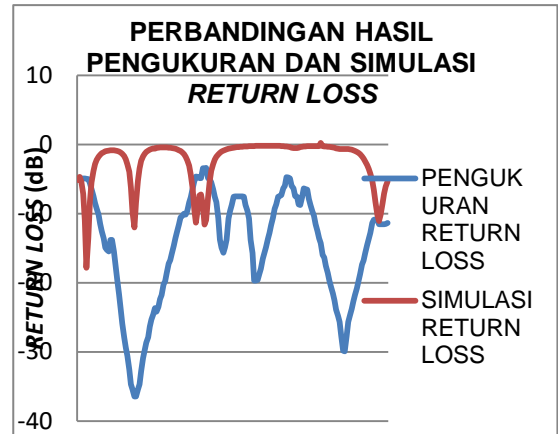
Gambar 7. (a) Hasil VSWR (b) Return Loss Berdasarkan Pengukuran

3. Perbandingan Hasil VSWR dan Return Loss Berdasarkan Simulasi dan Pengukuran

Pengukuran hasil VSWR diukur dengan alat ukur VNA Anritsu MS2034B dan menggunakan simulator AWR 2004. Keduanya lalu dibandingkan. Gambar 8 dan Gambar 9 menunjukkan grafik perbandingan hasil VSWR dan Return Loss antara pengukuran menggunakan alat ukur VNA Anritsu MS2034B dan simulator AWR 2004.



Gambar 8. Perbandingan Hasil Pengukuran dan Simulasi VSWR



Gambar 9. Perbandingan Hasil Pengukuran dan Simulasi Return Loss

Dalam Gambar 8 dan Gambar 9 menunjukkan bahwa hasil simulasi dan pengukuran antara VSWR dan Return Loss memiliki perbedaan secara signifikan. Perbedaan keduanya terletak pada frekuensi yang digunakan. Pada frekuensi pengukuran = 2,13 GHz sedangkan frekuensi simulasi = 2,128 GHz, frekuensi pengukuran = 2,65 GHz sedangkan frekuensi simulasi = 2,489 GHz, frekuensi pengukuran = 2,83 GHz sedangkan frekuensi simulasi = 2,553 GHz dan frekuensi pengukuran = 3,35 GHz sedangkan frekuensi simulasi = 3,561 GHz. Keempat frekuensi tersebut memiliki nilai VSWR ≤ 2 dan Return Loss ≤ -10 dB. Akan tetapi hasil pengukuran VSWR dan Return Loss yang digunakan dalam tulisan ini. Adapun perbedaan terjadi secara signifikan disebabkan oleh beberapa faktor yaitu [16] :

1. Pada simulator AWR tidak memperhitungkan kelembapan udara dan temperatur, namun pada saat pengukuran kelembapan udara dan temperatur berpengaruh terhadap propagasi gelombang dan resistansi udara.
2. Terdapat rugi – rugi pada port SMA yang disambungkan ke antena, Adapter dari n - connector ke konektor SMA, dan konektor pada VNA Anritsu MS2034B.

KESIMPULAN

Pada tulisan ini telah dibahas sebuah rancangan antena mikrostrip patch segi empat yang mampu bekerja pada empat daerah frekuensi (multiband).

Berdasarkan hasil pengukuran antena menunjukkan bahwa :

- (1) Frekuensi 1,945 GHz - 2,394 GHz diperoleh lebar bandwidth 449 MHz.
- (2) Frekuensi kedua bekerja dari 2,635 GHz – 2,706 GHz diperoleh lebar bandwidth 71

MHz. Frekuensi ketiga bekerja dari 2,768 GHz – 2,862 GHz diperoleh lebar *bandwidth* 94 MHz.

- (3) Frekuensi keempat bekerja dari 3,249 GHz – 3,480 GHz diperoleh lebar *bandwidth* 231 MHz dengan masing-masing frekuensi memperoleh nilai VSWR ≤ 2 .
- (4) Dengan frekuensi tersebut, rancangan antenna dapat digunakan untuk berbagai aplikasi, yaitu sistem 3G, LTE, RFID dan WIMAX.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Balanis, C. A. 2010. *Antenna theory: analysis and design*. John Wiley & sons.
- [2] Zhang, L., Jiao, Y. C., Zhao, G., Song, Y., Wang, X. M., & Zhang, F. S. 2008. A novel CPW-FED monopole antenna for multiband operation. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 22(5-6), 741-747.
- [3] Liu, W. C., & Liu, H. J. 2007. Miniaturized asymmetrical CPW-FED meandered strip antenna for triple-band operation. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 21(8), 1089-1097.
- [4] Eberspächer, J., Bettstetter, C., Vögel, H. J., & Hartmann, C. 2009. *GSM-architecture, protocols and services*. John Wiley & Sons.
- [5] Rahman, T. 2007. *GSM technology & its application in Bangladesh* (Doctoral dissertation, BRAC University).
- [6] Islam, M. T., Shakib, M. N., & Misran, N. 2009. Broadband EH shaped microstrip patch antenna for wireless systems. *Progress In Electromagnetics Research*, 98, 163-173.
- [7] Lai, H. W., Mak, K. M., & Chan, K. F. 2014. Novel aperture-coupled microstrip-line feed for circularly polarized patch antenna. *Progress In Electromagnetics Research*, 144, 1-9.
- [8] Rahim, A. 2013. Definition of Return Loss. What is Return Loss and Why Measure It, [Online]. Available: <http://lunainc.com/return-loss-measure-it/>
- [9] Garg, R., Bhartia, P., Bahl, I. J., & Ittipiboon, A. (2001). *Microstrip antenna design handbook*. Artech house.
- [10] Alam, S. 2015. Perancang dan Realisasi Antena Mikrostrip Segiempat Array Triple Band untuk Aplikasi Wimax. *Jurnal Teknik dan Ilmu Komputer*.
- [11] Amin, M. A., Mohammad, S., Raihan, M. R., & Khan, A. A. (2016, May). Design and performance analysis of a multiband microstrip patch antenna for GSM, WiMAX, WLAN, Walkie-Talkie and ATC application. In *2016 5th International Conference on Informatics, Electronics and Vision (ICIEV)* (pp. 241-244). IEEE.
- [12] Fahmi, M. 2017. Rancang Bangun Antena Mikrostrip Array Frekuensi 2100 MHz untuk RF Energy Harvesting, *Jurnal Skripsi, Universitas Sumatera Utara*.
- [13] Indra, S. 2010. Antena mikrostrip: konsep dan aplikasinya. *Universitas Trisakti*.
- [14] Fahrazal, M. 2008. *Rancang bangun antena mikrostrip triple-band linear array 4 elmen untuk aplikasi wimax* (Doctoral dissertation, Universitas Indonesia. Fakultas Teknik).
- [15] Alaydrus, M. 2011. *Antena: Prinsip & Aplikasi*. Graha Ilmu Yogyakarta.
- [16] Rambe, A. H. 2008. *Rancang bangunan antena mikrostrip patch segiempat planar ary 4 elemen dengan pencatuan aperture-coupled untuk aplikasi CPE pada wimax* (Doctoral dissertation, Universitas Indonesia. Fakultas Teknik).