

ANTENA MIKROSTRIP MULTIBAND PATCH PERSEGI BERCELAH UNTUK SEL KECIL 4G-5G-Wi-Fi SUB-6 GHZ

MULTIBAND RECTANGULAR SLOTTED PATCH MICROSTRIP ANTENNA FOR SMALL CELL 4G-5G-Wi-Fi SUB-6 GHZ

Faraz Sonia Handrianti¹, Heore Wijanto², Budi Prasetya³

^{1,2,3}Prodi S1 Teknik Telekomunikasi, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom

¹farazsonia@telkomuniversity.ac.id, ²heroe@telkomuniversity.ac.id, ³budiprast_bpy@yahoo.co.id

Abstrak

Di era 5G, sel kecil dimanfaatkan untuk menggelar berbagai layanan nirkabel dalam satu area cakupan yang kecil. Untuk mendukung infrastruktur ini dibutuhkan antenna multiband, sehingga pemeliharaan perangkat lebih efisien dan ekonomis. Antena mikrostrip merupakan jenis antenna yang banyak dikembangkan karena bentuk dimensi dan sifat karakteristik mikrostrip yang memiliki bentuk fisik kecil dan mudah difabrikasi.

Tugas Akhir ini dirancang dan direalisasikan antenna mikrostrip multiband patch persegi bercealah yang bekerja pada 1,8 GHz, 2,1 GHz, 2,4 GHz, dan 3,5 GHz dalam satu perangkat. Perancangan dilakukan dengan CST Studio Suite 2017 dan desain antenna berdasarkan penelitian sebelumnya terkait antenna mikrostrip multiband, namun dilakukan modifikasi penambahan slot pada elemen patch. Parameter yang dicapai yaitu return loss ≤ -10 dB, VSWR ≤ 2 , bandwidth ≤ 100 MHz untuk 2,4 GHz dan ≥ 100 MHz untuk 1,8 GHz, 2,1 GHz, dan 3,5 GHz. Gain > 1 dBi, pola radiasi omnidireksional dan polarisasi jenis elips. Bahan yang digunakan untuk substrat adalah FR-4 epoxy dengan permitivitas relatif 4.6 dan ketebalan 1.6 mm.

Hasil pengukuran menunjukkan antenna menghasilkan return loss pada masing-masing frekuensi kerja sebesar -13,874, -17,527, -15,462, dan 22,720. VSWR 1,508, 1,307, 1,411, dan 1,157. Bandwidth sebesar 585 MHz, 206 MHz, 55 MHz, 837 MHz. Impedansi sebesar 34,158 Ω , 55,636 Ω , 36,378 Ω , dan 51,027 Ω . Gain sebesar 1,35 dBi, 1,51 dBi, 2,26 dBi, 2,33 dBi dengan pola radiasi omnidireksional dan polarisasi elips.

Kata kunci : Sel Kecil, Antena Mikrostrip, Multiband, Patch Persegi Panjang Bercealah, Sub-6 GHz.

Abstract

In the 5G era, small cells will be used to deploy various wireless services in one small coverage area. To support this infrastructure, multiband antennas are needed, so the device maintenance is more efficient and economical. Microstrip antenna is a type of antenna which is usually developed because of the characteristics of microstrip that have a small physical form and easily fabricated.

This Final Project is designed and realized a rectangular slotted patch multiband microstrip antenna that works at 1.8 GHz, 2.1 GHz, 2.4 GHz, and 3.5 GHz in one device. The design was done with CST Studio Suite 2017 then the prototype was design based on previous research that related to multiband microstrip antennas, but there was modification with the addition of slots on patch element. The parameters were achieved are return loss ≤ -10 dB, VSWR ≤ 2 , bandwidth ≤ 100 MHz for 2.4 GHz and ≥ 100 MHz for 1.8 GHz, 2.1 GHz, and 3.5 GHz. Gain > 1 dBi, omnidirectional radiation pattern and elliptical type polarization. The material was used for the substrate is FR-4 epoxy with a relative permittivity of 4.6 and a thickness of 1.6 mm.

The measurement results show the antenna works on 1,8 GHz, 2,1 GHz, 2,4 GHz, and 3,5 GHz, return loss -13,874, -17,527, -15,462, and 22,720. VSWR 1,508, 1,307, 1,411 and 1,157. Bandwidth of each frequency 585 MHz, 206 MHz, 55 MHz, 837 MHz. Impedance at 34,158 Ω , 55,636 Ω , 36,378 Ω , and 51,027 Ω . Gain 1.35 dBi, 1.51 dBi, 2.26 dBi, 2.33 dBi with omnidirectional radiation patterns and elliptical polarization.

Keywords: Small Cell, Microstrip Antena, Multiband, Slotted Rectangular Patch, Sub-6 GHz

1. Pendahuluan

Saat ini teknologi nirkabel beralih dari data paket kecil (suara, gambar, penelusuran *web*, *e-mail*, dsb) menjadi data paket yang lebih besar (*video*, *gaming*, *live streaming*, dll), dimana ini membutuhkan jaringan yang memiliki kemampuan *handover* dan transfer data yang cepat. Densifikasi menggunakan sel kecil memberikan solusi yang efisien dan ekonomis dari segi infrastruktur telekomunikasi menuju era 5G (Nordrum, Amy; Clark, Kristen; , IEEE Spectrum Staff, 2017) (Jatmiko, 2019). Pada umumnya infrastruktur sel kecil ditargetkan untuk penggunaan luar ruangan, sementara untuk dalam ruangan, sel kecil memungkinkan adanya integrasi antara jaringan 4G dan *Wi-Fi* (Qorvo, Inc., 2007).

Dari sisi perangkat, saat ini pembangunan infrastruktur sel kecil mulai mengembangkan antenna *multiband* atau bekerja pada lebih dari satu frekuensi, karena antenna *multiband* sangat baik untuk layanan nirkabel yang membutuhkan sifat adaptif terhadap kenanekaragaman layanan disekitarnya sehingga lebih efisien dibandingkan melakukan migrasi

total, menambah atau mengganti perangkat. Untuk merancang antenna *multiband* dipilih jenis mikrostrip karena karakteristik fisiknya tipis, kecil, ringan, proses fabrikasi yang mudah dan materialnya cukup banyak dipasaran sehingga kerap digunakan sebagai penelitian tentang antenna. Pada referensi jurnal penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, didapatkan tiga frekuensi kerja berbeda namun antenna ini digunakan untuk aplikasi *Wi-Fi* (Nezhad & Hamid, 2010). Maka dari itu pada Tugas Akhir dilakukan perancangan dan realisasi sebuah antenna mikrostrip untuk aplikasi teknologi sel kecil.

Antena akan dirancang berdasarkan desain pada referensi jurnal penelitian sebelumnya, akan tetapi dilakukan modifikasi berupa pemberian *slot* (celah) terhadap bidang elemen *patch* sehingga diharapkan akan berpengaruh pada frekuensi kerja yang ditargetkan, yaitu pada 1,8 GHz, 2,1 GHz, 2,4 GHz dan 3,5 GHz, dimana termasuk kedalam spektrum Sub-6 GHz yang mendukung banyak layanan komunikasi nirkabel seperti *Wi-Fi*, komunikasi selular dan data seperti 4G dan 5G.

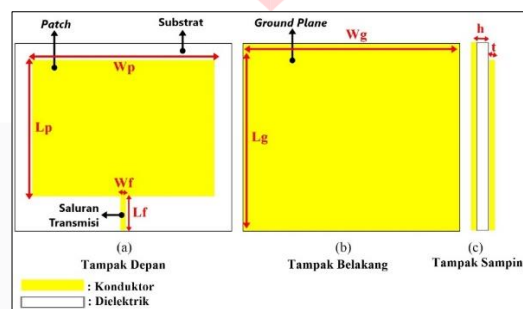
2. Konsep Dasar

2.1 Sel Kecil

Sel kecil merupakan miniatur infrastruktur jaringan telekomunikasi dari jaringan sel makro yang memiliki tujuan untuk meningkatkan kapasitas jaringan dan kecepatan transfer data dari sel makro. Era 5G mendatang, sel kecil menjadi solusi untuk menggelar infrastruktur telekomunikasi, karena dengan sel kecil, operator diharapkan tidak perlu melakukan migrasi infrastruktur yang sudah ada, melainkan memasang perangkat yang dapat digunakan secara paralel dengan layanan nirkabel yang sudah ada seperti 4G atau *Wi-Fi* (Qualcomm Technologies, Inc., 2019).

2.2 Antena Mikrostrip

Antena merupakan perangkat transformator yang mengubah energi listrik dari gelombang *wave guide* menjadi gelombang elektromagnetik. Antena mikrostrip merupakan antenna dengan jenis mikrostrip, yaitu *micro* (mikro/kecil) dan *strip* (bilah).



Gambar 2. 1 Struktur antenna mikrostrip.

Struktur fisik antenna mikrostrip terdiri bagian-bagian yang diilustrasikan pada Gambar 2.1. *Patch* adalah elemen yang terbentuk atas penggambaran suatu panjang gelombang yang membentuk luas, berfungsi sebagai peradiasi gelombang elektromagnetik, dimana gelombang ini bergerak menyusuri tepian sisi *patch* lalu kedalam substrat. *Patch* dan *groundplane* memiliki sifat konduktif sehingga umumnya terbuat dari konduktor. *Groundplane* berfungsi sebagai elemen petanahan atau reflektor agar gelombang elektromagnetik tetap terdistribusi kembali melalui substrat menuju *patch* dan ke udara bebas. Substrat berfungsi sebagai media yang membatasi antara *patch* dan *groundplane* agar gelombang elektromagnetik tetap berjalan secara simultan. Substrat dapat digunakan berasal dari udara atau bahan dielektrik dengan nilai permitivitas relatif (ϵ_r) berkisar $2,2 \leq \epsilon_r \leq 12$ dan ketebalan (h). Karakteristik substrat berpengaruh terhadap performa *bandwidth* yg dihasilkan (Balanis, 2016).

2.3 Rumus Perhitungan Dimensi Mikrostrip Patch Rectangular

Umumnya untuk mencari dimensi patch dibutuhkan panjang gelombang di udara (λ_0) dan panjang gelombang karakteristik bahan (λ_g) dari frekuensi kerja (f_r), ketebalan dielektrik (h), konstanta dielektrik substrat (ϵ_r), dan ketebalan konduktor (t) [9]:

$$W = \frac{c}{2f_r \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}}; c = 3 \times 10^8 \text{ m/s} \quad (2.1)$$

dengan:

W : Lebar konduktor *patch* (mm).

$$\epsilon_{r \text{ eff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1/2} \quad (2.2)$$

dengan:

h : ketinggian substrat (mm).

$$\Delta L = 0,412h \frac{(\epsilon_{r \text{ eff}} + 0,3) \left(\frac{W}{h} + 0,264 \right)}{(\epsilon_{r \text{ eff}} - 0,258) \left(\frac{W}{h} + 0,8 \right)} \quad (2.3)$$

$$L_{eff} = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_r eff}} \quad (2.4)$$

$$L = L_{eff} - 2\Delta L \quad (2.5)$$

Untuk mendapatkan dimensi dari elemen substrat dan *groundplane* secara matematis.

$$W_g = 6h + W \quad (2.6)$$

$$L_g = 6h + L \quad (2.7)$$

Menghitung dimensi teknik pencatutan *microstrip line*, diawali dengan mencari nilai impedansi karakteristik saluran (B) yang dapat dicari dengan persamaan (2.8) sebagai berikut:

$$B = \frac{60\pi^2}{Z_0 \sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.8)$$

$$W_f = \frac{2h}{\pi} \left\{ B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left[\ln(B - 1) + 0,39 - \frac{0,61}{\epsilon_r} \right] \right\} \quad (2.9)$$

dengan:

Z_0 : Impedansi saluran awal (Ω).

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_r \sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.10)$$

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r eff}} \quad (2.11)$$

$$L_f = \frac{\lambda_g}{4} \quad (2.12)$$

2.3 Antena Mikrostrip Patch Bercelah

Ketika *radiating patch* atau *groundplane* diberi *slot* (celah), *slot* memberikan efek penghambatan terhadap perambatan gelombang elektromagnetik pada permukaan kedua konduktor, sebagian energi terkonsentrasi di sekitar *slot* sehingga mode radiasi yang beresonansi menjadi terganggu. Akibatnya dapat membentuk rentang pita (*notch band*) frekuensi resonansi baru. Karakteristik dari celah yaitu memiliki panjang (L_s) mendekati setengah dari panjang gelombang terpandu (λ_g) dan lebarnya $W_s \ll \lambda_g$ (Nezhad & Hamid, 2010), didapatkan melalui persamaan sebagai berikut (V., 2017):

$$\epsilon_r eff = \frac{\epsilon_r + 1}{2} \quad (2.13)$$

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_c} \quad (2.14)$$

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r eff}} \quad (2.15)$$

dengan:

$\epsilon_r eff$: Konstanta dielektrik efektif.

ϵ_r : Konstanta dielektrik.

λ_0 : Panjang gelombang di udara (m).

λ_g : Panjang gelombang karakteristik bahan (m).

c : Kecepatan cahaya di udara (3×10^8 m/s).

f_r : Frekuensi tengah (Hz).

Sementara rasio frekuensi kerja antena dipengaruhi oleh jumlah, letak, dan dimensi celah juga mempengaruhi rasio frekuensi kerja antena[8].

2.4 Antena Mikrostrip Triband E-Shaped

Antena *Tri-band Monopole E shaped* merupakan antena referensi Tugas Akhir dengan rujukan dari *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol. 9, 2010* yang berjudul "A Novel Triband E-Shaped Printed Monopole Antenna for MIMO" oleh Sajad Mohammad Ali Nezhad dan Hamid Reza Hassani dari *Electrical and Electronic Engineering Departement, Shaded University, Tehran, Iran* (Nezhad & Hamid, 2010), tentang bagaimana merancang dan merealisasikan antena monopole dengan jenis mikrostrip yang dapat menghasilkan tiga band frekuensi menggunakan metoda penempatan dua slot pada patch persegi panjang yang dimodifikasi menjadi bentuk W dengan teknik pencatutan *microstrip line feed*. Adapun perubahan tinggi *groundplane* untuk menjadikan prinsip antena sebagai antena monopole sehingga antena referensi ini menghasilkan frekuensi kerja pada 2,4 GHz, 5,4 GHz, dan 5,8 GHz.

3. Perancangan Antena

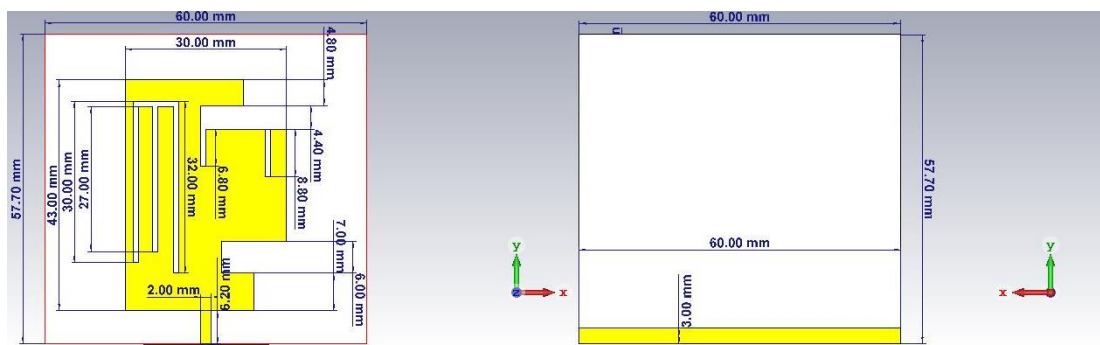
3.1 Penentuan Spesifikasi Antena

Prosedur perancangan antena mikrostrip *multiband patch* persegi bercelah untuk sel kecil 4G-5G-Wi-Fi Sub-6 GHz dimulai dari penentuan spesifikasi perangkat yang diinginkan. Adapun spesifikasi yang diperlukan dalam perancangan Antena pada tugas akhir ini sebagai berikut:

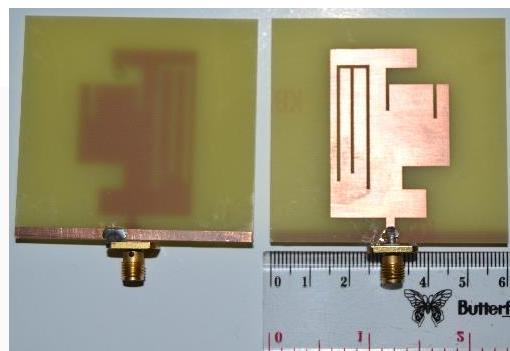
- Frekuensi kerja : 1,8 GHz & 2,1 GHz(4G), 3,5 GHz(5G), 2,4 GHz(Wi-Fi).
- Pita Frekuensi : 1,71 – 1,88 GHz (MENTERI KOMUNIKASI DAN INFORMATIKA, 2015); 1,92 – 2,17 GHz (MENTERI KOMUNIKASI DAN INFORMATIKA, 2017); 2,4 – 2,49 GHz (MENTERI KOMUNIKASI DAN INFORMATIKA REPUBLIK INDONESIA, 2015); dan 3,4-3,6 GHz (Third Generation Partnership Project (3GPP), 2018).

- c. Impedansi : 50Ω .
- d. *Return loss* : ≤ -10 dB.
- e. VSWR : ≤ 2 .
- f. *Gain* : ≤ 2 dBi.
- g. Pola radiasi : Omnidireksional.
- h. Polarisasi : Linear
- i. *Bandwidth* : ≤ 100 MHz pada 2,4 GHz dan ≥ 100 MHz pada 1,8-2,1-3,5 GHz.

Dalam pembuatan antenna ini dipilih antenna mikrostrip *multiband patch* persegi yang dilakukan modifikasi menggunakan *slot line* dikarenakan dengan menggunakan teknik ini dapat memenuhi spesifikasi yang dibutuhkan untuk sel kecil 4G-5G-Wi-Fi.



Gambar 3.1 Perancangan antenna mikrostrip *multiband patch* persegi bercelah.

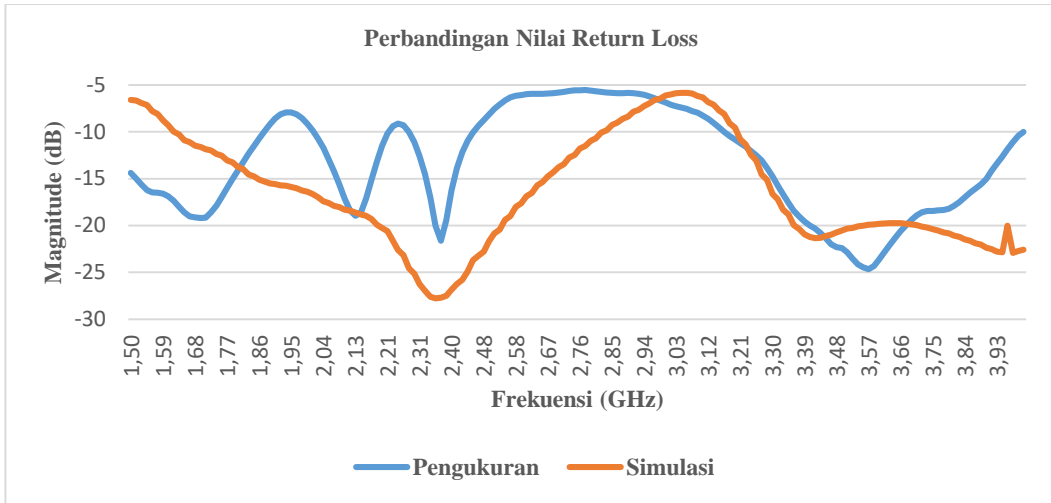


Gambar 3.2 Realisasi antenna mikrostrip.

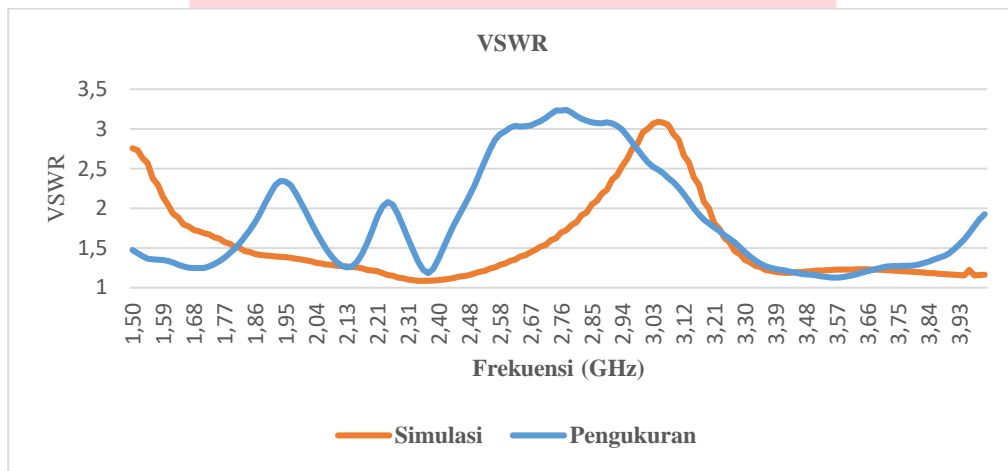
4. Pengukuran dan Analisis

4.1 Hasil Pengukuran *Return Loss*, VSWR, *Bandwidth*, dan Impedansi

Skema pengukuran return loss, VSWR dan Impedansi dilakukan menggunakan perangkat yang ada pada laboratorium Lembaga Ilmu Penelitian Indonesia (LIPI) yaitu menggunakan alat Advantest R3770 Network Analyzer 300 kHz – 20 GHz. Hasil pengukuran didapatkan seperti gambar dibawah:



Gambar 4.2 Hasil pengukuran return loss.

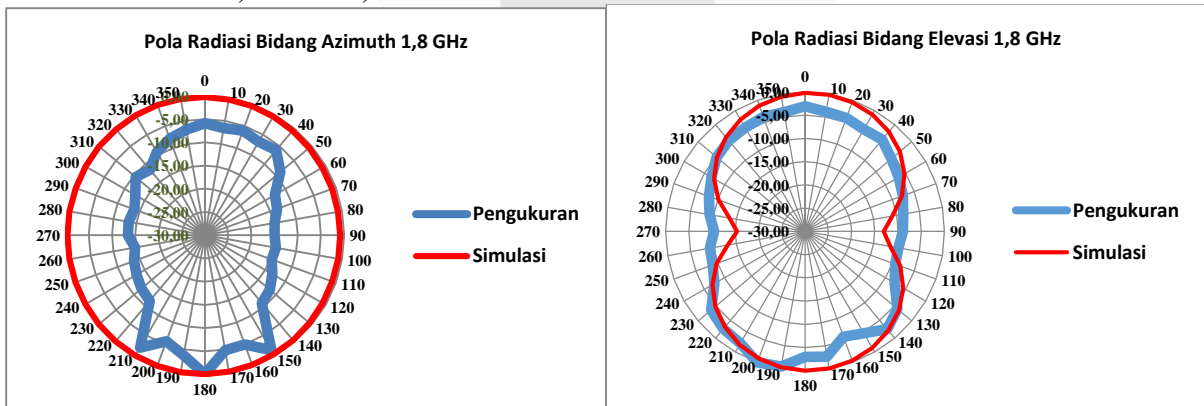


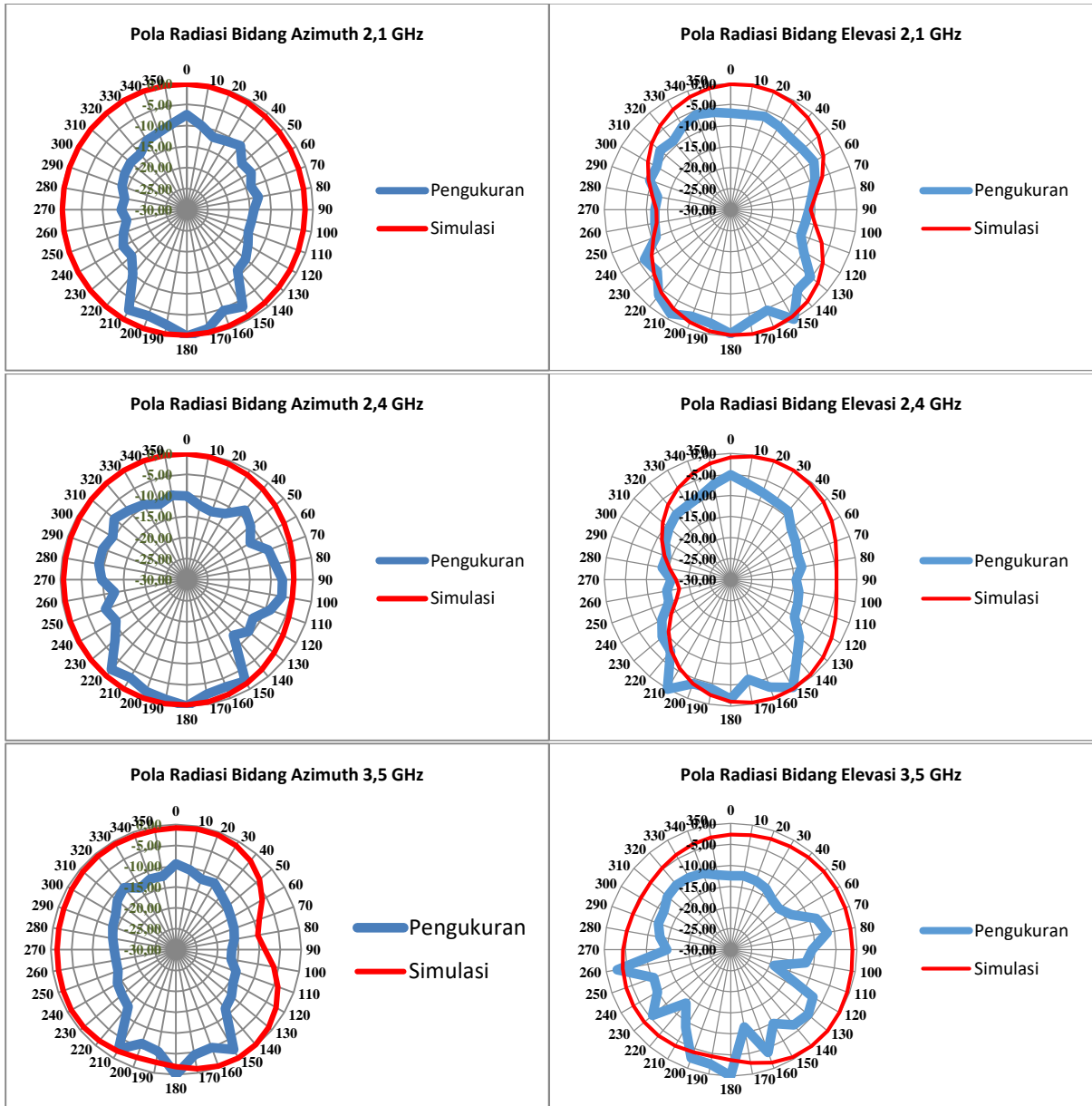
Gambar 4.3 Hasil pengukuran VSWR.

Tabel 4. 1 Pengukuran impedansi pada masing-masing frekuensi tengah (f_c).

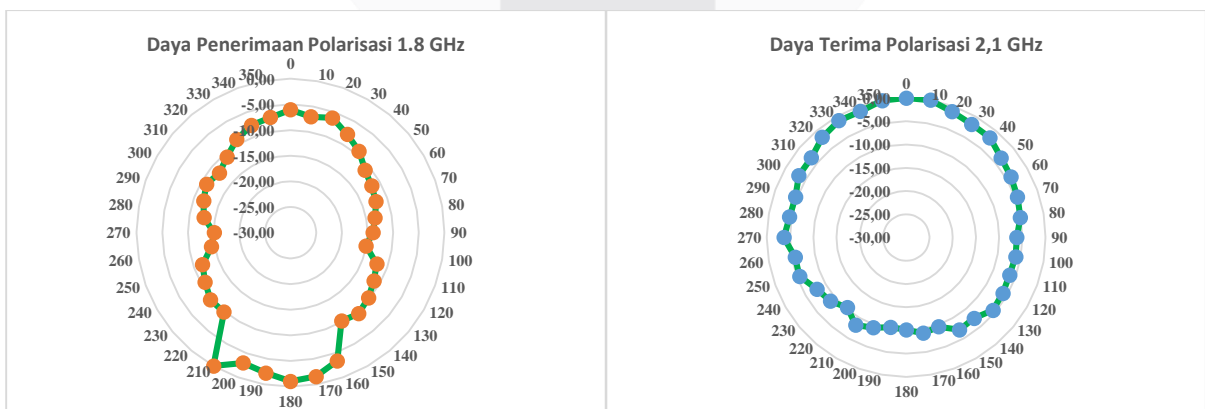
Frek. Kerja (f_c) (n)	Nilai Impedansi (Ω)
1,8 GHz (1)	34,158
2,1 GHz (2)	55,636
2,4 GHz (3)	36,378
3,5 GHz (4)	51,027

4.2. Hasil Pola Radiasi, Polarisasi, dan Gain



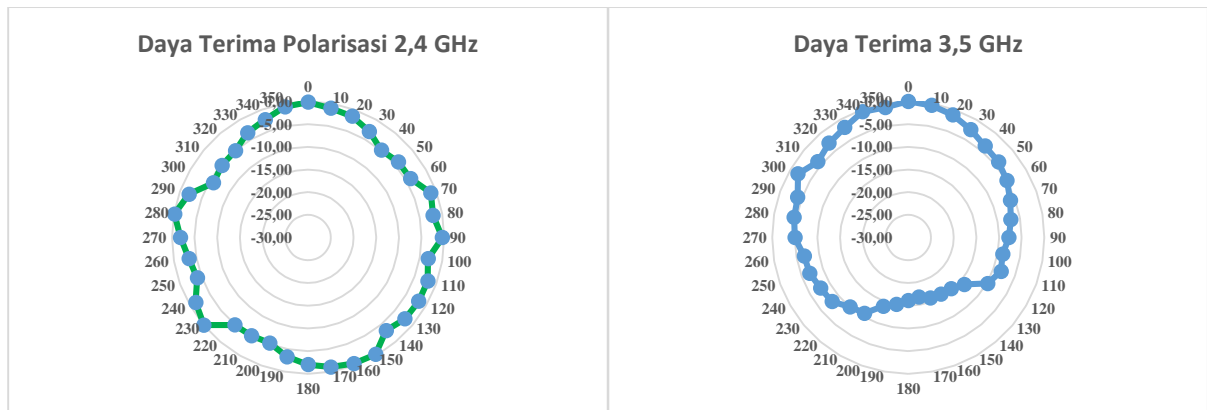


Gambar 4. 1 Pola radiasi 1,8 GHz, 2,1 GHz, 2,4 GHz dan 3,5 GHz bidang azimuth dan elevasi.



Gambar 4. 2 Grafik polarisasi 1,8 GHz.

Gambar 4. 3 Grafik polarisasi 2,1 GHz.



Gambar 4. 4 Grafik polarisasi 2,4 GHz. Gambar 4. 5 Grafik polarisasi 3,4 GHz

Tabel 4.1 Hasil pengukuran gain antenna.

	1.8 GHz	2.1 GHz	2.4 GHz	3.5 GHz
P1(rx)	-38.39	-36.83	-36.45	-34.27
P2(tx)	-27.74	-25.34	-26.71	-26.60
GAIN	1,35 dB	1,51 dB	2,26 dB	2,33 dB

4.3 Perbandingan Hasil Simulasi dan Optimasi

Berikut adalah tabel yang menunjukkan perbandingan antara spesifikasi, hasil simulasi, dan hasil pengukuran:

Tabel 4. 2 Perbandingan hasil simulasi dan pengukuran.

Parameter	Frekuensi	Spesifikasi	Simulasi	Pengukuran
Return Loss (dB)	1,8 GHz	< -10 dB	-13,826 dB	-13,874 dB
	2,1 GHz		-18,343 dB	-17,527 dB
	2,4 GHz		-26,645 dB	-15,462 dB
	3,5 GHz		-20,413 dB	-22,720 dB
VSWR	1,8 GHz	< 2	1,512	1,508
	2,1 GHz		1,275	1,307
	2,4 GHz		1,097	1,411
	3,5 GHz		1,21	1,157
Gain (dBi)	1,8 GHz	> 3 dBi	1,518 dBi	1,35 dBi
	2,1 GHz		1,973 dBi	1,51 dBi
	2,4 GHz		3,493 dBi	2,26 dBi
	3,5 GHz		3,493 dBi	2,33 dBi
Impedansi (Ω)	1,8 GHz	50 Ω	70,92 Ω.	34,158 Ω.
	2,1 GHz		69,77 Ω.	55,636 Ω.
	2,4 GHz		55,54 Ω.	36,378 Ω.
	3,5 GHz		63,6 Ω.	51,027 Ω.
Bandwidth (MHz)	1,8 GHz	≤100 MHz pada 2,4 GHz ≥100 MHz pada 1,8 GHz; 2,1 GHz; 3,5 GHz	290 MHz	585 MHz
	2,1 GHz		260 MHz	206 MHz
	2,4 GHz		438 MHz	55 MHz
	3,5 GHz		1,398 GHz	837 MHz
Pola Radiasi	1,8 GHz	Omnidireksional	Omnidireksional	Bidireksional
	2,1 GHz		Omnidireksional	Bidireksional
	2,4 GHz		Omnidireksional	Bidireksional
	3,5 GHz		Omnidireksional	Bidireksional
Polarisasi	1,8 GHz	Linier	Elips	Elips
	2,1 GHz		Elips	Elips
	2,4 GHz		Sirkular	Sirkular
	3,5 GHz		Elips	Elips

5. Kesimpulan dan Saran

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat ditarik dalam Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Adanya penambahan slot menyebabkan terjadinya pembelokan distribusi arus permukaan patch, pembelokan ini menyebabkan konsentrasi arus yang menghasilkan frekuensi resonansi baru.
2. Antena yang dirancang dan difabrikasi mampu menghasilkan 4 frekuensi kerja yaitu pada 1,8 GHz, 2,1 GHz, 2,4 GHz dan 3,5 GHz.

3. *Return loss* yang dihasilkan pada realisasi antenna yaitu masing masing -13,874 dB, -17,527 dB, -15,462, dan -22,720 dB yang menunjukkan bahwa target pada perancangan antenna ini sudah tercapai.
4. Perubahan panjang *groundplane* (L_g) mempengaruhi *bandwidth* antenna dan menghasilkan pola radiasi omnidireksional. Karena panjang *groundplane* mempengaruhi penurunan efisiensi pada antenna, hal ini mengakibatkan *bandwidth* menjadi lebih.
5. VSWR yang didapat yaitu 1.508, 1.307, 1.411, dan 1,157 pada masing-masing frekuensi kerja yang ditargetkan yang menunjukkan level pantulan pada antenna ini cukup rendah dan sudah sesuai dengan perancangan.
6. Gain yang didapat yaitu 1,35 dBi, 1,51 dBi, 2,26 dBi, dan 2,33 dBi dimana gain yang ditargetkan pada perancangan awal kurang dari 2 dBi.
7. *Bandwidth* yang dihasilkan telah mencapai spesifikasi dengan lebar yaitu 585 MHz, 206 MHz, 55 MHz, dan 837 MHz.
8. Bentuk Polarisasi yang dihasilkan pada masing masing frekuensi kerja yang diinginkan adalah sirkular pada 2,4 GHz serta elips pada 1,8 GHz, 2,1 GHz dan 3,5 GHz.
9. Pola radiasi yang dihasilkan saat pengukuran merupakan jenis bidireksional, akan tetapi jenis ini masih memenuhi spesifikasi apabila pemasangan antenna dapat dilakukan dengan tepat sesuai kebutuhan.

5.2 Saran

Untuk pengembangan kedepannya, ada beberapa parameter pada antenna mikrostrip multiband patch rektanguler bercelah ini yang masih dapat diperbaiki, diantaranya adalah:

1. Pengukuran sebaiknya dilakukan di *anechoic chamber* yang menggunakan rotator otomatis agar tidak terlalu banyak gangguan dari luar.
2. Untuk mendapatkan hasil yang lebih baik dalam sisi dimensi, sebaiknya menggunakan bahan Rogers (Duroid) yang memiliki permitivitas relative yang lebih kecil dibandingkan dengan FR-4 Epoxy.
3. Sebaiknya tidak memilih sembarang konektor karena mempengaruhi hasil pengukuran.
4. Mencari referensi desain, dimensi, bentuk patch yang lebih baik dan sederhana sehingga lebih efisien dan meminimalisir faktor fabrikasi.

a. DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Balanis, C. A. (2016). *Antenna Theory: Analysis and Design* (Fourth ed.). New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- [2]. Jatmiko, L. D. (2019, March 14). Harga Pita Frekuensi 5G Masih Digodok. Jakarta, DKI Jakarta, Indonesia: KOMINFO ID. Dipetik May 10, 2019, dari https://kominform.go.id/content/detail/17112/harga-pita-frekuensi-5g-masih-digodok/0/sorotan_media
- [3]. MENTERI KOMUNIKASI DAN INFORMATIKA. (2015). *PENATAAN PITA FREKUENSI RADIO 1800 MHz UNTUK KEPERLUAN PENYELENGGARAAN JARINGAN BERGERAK SELULER*. Kementerian Komunikasi dan Informatika. Jakarta: KOMINFO RI.
- [4]. MENTERI KOMUNIKASI DAN INFORMATIKA. (2017). *PENGUNAAN TEKNOLOGI PADA PITA FREKUENSI RADIO 450 MHz, 900 MHz, 2,1 GHz, DAN 2,3 GHz UNTUK PENYELENGGARAAN JARINGAN BERGERAK SELULER*. Jakarta: KOMINFO RI.
- [5]. MENTERI KOMUNIKASI DAN INFORMATIKA REPUBLIK INDONESIA. (2015). *PERSYARATAN TEKNIS ALAT DAN PERANGKAT TELEKOMUNIKASI YANG BEROPERASI PADA PITA FREKUENSI RADIO 2,4 GHz DAN/ATAU PITA FREKUENSI RADIO 5,8 GHz*. KEMENTERIAN KOMUNIKASI DAN INFORMATIKA. Jakarta: KOMINFO RI.
- [6]. Nezhad, S. M., & Hamid, R. H. (2010). A Novel Triband E-Shaped Printed Monopole Antenna for MIMO Application. *IEEE ANTENNAS AND WIRELESS PROPAGATION LETTERS*. 9, hal. 4. Tehran: IEEE. doi:10.1109/LAWP.2010.2051131
- [7]. Nordrum, Amy; Clark, Kristen; , IEEE Spectrum Staff. (2017, January 27). *Everything You Need to Know About 5G*. Dipetik November 22, 2018, dari <https://spectrum.ieee.org/video/telecom/wireless/everything-you-need-to-know-about-5g>
- [8]. Qorvo, Inc. (2007, May 17). *Small Cell Networks and the Evolution of 5G (Part 1)*. (Small Cell) Dipetik May 12, 2019, dari <https://www.qorvo.com/design-hub/blog/small-cell-networks-and-the-evolution-of-5g>
- [9]. Qualcomm Technologies, Inc. (2019). *Small cells help meet skyrocketing data demand by bringing the network closer*. (Qualcomm Technologies, Inc.) Dipetik April 22, 2019, dari Qualcomm: <https://www.qualcomm.com/products/networking/small-cells>
- [10]. Third Generation Partnership Project (3GPP). (2018). *Base Station (BS) radio transmission and reception*. France: Third Generation Partnership Project (3GPP).
- [11]. V., B. D. (2017). *Basics of Microstrip Slot Line*. Gujarat: L.J. Institute of Engineering & Technology.