

DESAIN DAN REALISASI ANTENA PLANAR INVERTED-F ANTENNA (PIFA) MULTIBAND (900 MHZ, 1800 MHZ DAN 2400 MHZ)

Design and Realization of Planar Inverted-F Antenna (PIFA) for Multiband

(900MHz , 1800 MHz and 2400 MHz)

¹Mokhammad Fairizal Rakhman, ²Ali Muayyadi , ³Yuyu Wahyu

^{1,2,3}Prodi S1 Teknik Telekomunikasi , Fakultas Teknik Elektro Universitas Telkom
Jln. Telekomunikasi No.1 Terusan Buah Batu Bandung 40257 Indonesia

¹mfairizal@telkomunivesity, ²alimuayyadi@telkomuniversity.ac.id, ³yuyu@ppte.lipi.go.id

ABSTRAK

Dewasa ini, peningkatan teknologi khususnya dibidang teknologi wireless meningkat dengan pesat, hampir semua perangkat memiliki kemampuan untuk terhubung dengan koneksi internet agar dapat dipantau dan dikendalikan secara online dari manapun dan kapanpun. Untuk dapat terkoneksi dengan internet secara wireless keberadaan antenna sangatlah vital. Vendor pun dituntut agar mampu meminimalisir sebaik mungkin ukuran antenna agar mampu kompetibel dengan perangkat (tidak membuat ukuran perangkat menjadi lebih besar). Planar Inverted-F Antenna (PIFA) merupakan salah satu jenis antenna yang populer digunakan pada handphon [1]. Memiliki kelebihan yaitu ukuran yang kecil, low profile, performansi yang baik, serta mudah dalam fabrikasi [2]. Untuk itu penggunaan antenna PIFA sangatlah tepat untuk diterapkan pada perangkat, dengan demikian biaya produksi dan ukuran antena dapat diminimalisir dengan sebaik mungkin. Dalam Tugas Akhir ini dirancang antena Planar Inverted-F Antenna (PIFA) yang bekerja pada frekuensi 900 MHz, 1800 Mhz, 2400 Mhz. Menggunakan antenna PIFA karena desainnya sederhana, ringan dan biaya pembuatannya murah . Metode yg digunakan adalah penambahan slot pada *groundplane*, menambah element *parasitic*, dan mempertebal *feed* terminal.

Kata Kunci : Antena PIFA , Multiband, Slot Patch, Parasitik, Slot Groundplane

ABSTRACT

Today, technological improvements, especially in the field of wireless technology are increasing rapidly, almost all devices have the ability to connect with internet connection to be monitored and controlled online from wherever and whenever. To be connected to the internet wireless antenna has a very important role. Vendors are required to be able to minimize as good as possible antenna size to be compatible with the device (not making the size of the device becomes larger). Planar Inverted-F Antenna (PIFA) is one of the most popular antenna types used on mobile phones [1]. It has advantages of small size, low profile, good performance, and easy in fabrication [2]. For that purpose the use of PIFA antenna is very appropriate to be applied to the device, thus the cost of production and antenna size can be minimized as well as possible. In this Final Project designed Planar antenna Inverted-F Antenna (PIFA) that works at 900 MHz, 1800 Mhz, 2400 Mhz. PIFA antenna is used because the design is simple, lightweight and cheap manufacturing cost. The method used is the addition of a slot to the patch, adding to the parasitic element, and reinforcing the feed terminal.

Keyword : PIFA Antenna , Multiband, Slot Patch, Parasitic, Slot Groundplane

1. Pendahuluan

Dewasa ini teknologi komunikasi menjadi bagian yang sangat vital dalam kehidupan, sebab dengan teknologi telekomunikasi manusia dapat melakukan berbagai hal dibalik kesibukkan yang sangat padat. Kebutuhan akan berkomunikasi, bekerja, mendapatkan dan mengirimkan informasi , belanja bahkan mengirimkan uang semua itu sudah dapat dilakukan hanya dengan sebuah gadget (handphone, laptop) dari manapun dan kapanpun asalkan terhubung dengan internet. Hal tersebut mengakibatkan tingginya permintaan masyarakat akan gadget. Untuk memenuhi kriteria tersebut diperlukan suatu konsep teknologi komunikasi yang bisa diakses kapan pun dan dimanapun dengan mudah dan praktis.

Untuk dapat melaksanakan semua tugas tersebut, sebuah gadget haruslah memiliki kemampuan untuk terhubung kedalam sebuah jaringan dan juga agar dapat digunakan dari manapun dan kapanpun tentunya gadget tersebut harus bekerja secara wireless. Lalu berdasarkan permasalahan di atas muncul konsep mobile wireless untuk mendukung hal tersebut.

Beberapa teknologi wireless yang paling banyak digunakan di Indonesia adalah GSM (Global System for Mobile Communication) yang bekerja pada frekuensi 900 Mhz dan 1800 Mhz dan WiFi (Wireless Fidelity) yang berkerja pada frekuensi 2400 Mhz.

Untuk mendukung konsep teknologi wireless maka keberadaan antenna akan menjadi sangat vital, sebab agar dapat bekerja secara wireless suatu perangkat membutuhkan antenna agar bisa terkoneksi dengan jaringan .Penentuan antenna harus sangat diperhatikan, sebab bila antenna yang digunakan terlalu besar dan berat tentu

akan mengurangi kenyamanan penggunaan gadget dan apabila biaya produksi antenna mahal, tentunya akan berdampak pada harga gadget menjadi lebih mahal serta keuntungan vendor menjadi berkurang. Selain itu kinerja antenna harus mampu bekerja pada frekuensi-frekuensi yang telah ditentukan.

Dalam Tugas Akhir ini dirancang antenna *Planar Inverted-F Antenna* (PIFA) yang diharapkan bekerja pada frekuensi GSM (900 MHz dan 1800 MHz) dan WiFi (2400 MHz). Alasan digunakan antenna Planar Inverted-F Antenna (PIFA) adalah karena antenna ini desainnya sederhana, kecil, ringan dan biaya pembuatannya murah. Antenna PIFA yang dirancang bertujuan untuk mendapatkan jangkauan frekuensi tiga band sekaligus, memiliki ukuran antenna yang kecil dan harga yang murah. Simulasi yang digunakan dalam perancangan antenna ini adalah CST Microwave 2010.

Metode yg digunakan adalah penambahan slot pada *patch* dan *groundplane*, menambah elemen *parasitic*, dan mempertebal *feed* terminal. Penambahan ini bertujuan agar antenna yang dirancang dapat memenuhi kebutuhan teknologi komunikasi GSM dan WiFi.

2. Dasar Teori

2.1. Planar Inverted-F Antenna

Antena planar inverted-F (PIFA) merupakan pengembangan dari antenna yang telah ada. Berawal dari pengembangan antenna inverted-L (ILA) dan antena inverted-F (IFA).

Frekuensi resonan dari PIFA dapat dicari dengan menggunakan persamaan :

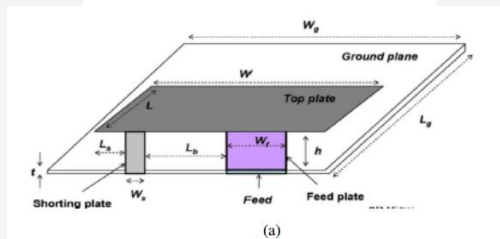
$$L1 + L2 - W = 1/4 \lambda \quad (1)$$

$$\text{Bila } W = L2, \text{ maka } L1 = 1/4 \lambda \quad (2)$$

$$\text{Bila } W \ll L2, \text{ maka } L1 + L2 = 1/4 \lambda \quad (3)$$

Namun, persamaan di atas tidak terlalu tepat karena banyak faktor lain yang mempengaruhi frekuensi resonan. Berdasarkan jurnal *An Empirical Equation for Predicting the Resonant Frequency of Planar Inverted-F Antennas* oleh Hassan Tariq Chattha, Yi Huang, Xu Zhu, dan Yang Lu; persamaan untuk mencari frekuensi resonan pada PIFA adalah sebagai berikut.

$$f_0 = \frac{c}{3W + 5,6L + 3,7h - 3,7Wf - 4,3Ws - 4,3Lb - 2,5Ls} \quad (4)$$



Gambar 2.1 Parameter antenna PIFA

parameter persamaan 2.4 dijelaskan pada gambar 2.1, berikut penjelasan tiap parameter pada tabel 2.1

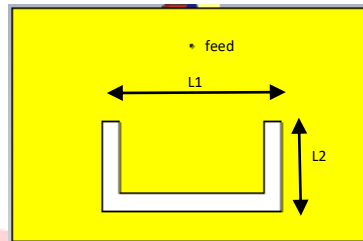
Matching impedance pada antena PIFA diperoleh dengan cara mengatur jarak antara *feeding point* dan *shorting pin*. Semakin dekat jarak antara *feed* dengan *shorting point* maka impedansi akan menurun. Untuk meningkatkan impedansi, dilakukan dengan menggeser *feed* menjauh dari *shorting point*.

2.2. Penambahan Substrat

Pada pemilihan jenis substrat nilai permitivitas bahan substrat sangat berpengaruh pada kinerja dari antena itu sendiri. Semakin tinggi nilai permitivitas substrat maka nilai *bandwidth* dan *gain* antena akan berkurang []. Sehingga penulis melakukan pemilihan bahan substrat yang memiliki nilai permitivitas yang tidak terlalu besar dan tersedia dipasaran agar dapat direalisasikan. Pada tugas akhir ini digunakan substrat berjenis FR-4 Epoxy yang memiliki nilai permitivitas relative (ϵ_r) sebesar 4,4 dengan ketebalan 1,6 mm.

2.3. Metode Slot pada Patch

Metode menambahkan slot pada antenna telah banyak digunakan pada banyak aplikasi. Metode penambahan slot ini diantaranya bertujuan untuk menambah frekuensi antenna agar antena dapat bekerja pada banyak frekuensi (*multiband*). Macam-macam slot yang biasa digunakan: *U-slot*, *L-slot*, *slot strip*.

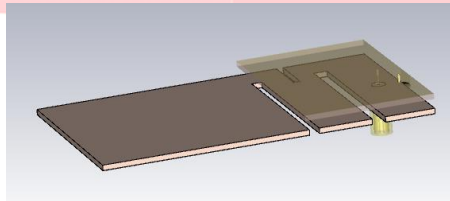


Gambar 2.2 U-Slot pada patch

Untuk mendapatkan frekuensi resonan yang diinginkan, dapat dicari dengan menggunakan persamaan $L1 + L2 - W = \lambda/4$ (5)

2.4. Metode Slot pada Groundplane

Pada makalah “*Enhanced-bandwidth PIFA Antenna with a Slot on Ground Plane*” [14] disebut-kan bahwa penambahan slot pada groundplane dapat memperlebar bandwidth dan dapat mencakup frekuensi rendah tanpa harus memperlebar ukuran groundplane antenna PIFA [10]. Contoh penggunaan slot pada groundplane ditunjukkan pada Gambar 2.9 berikut ini.

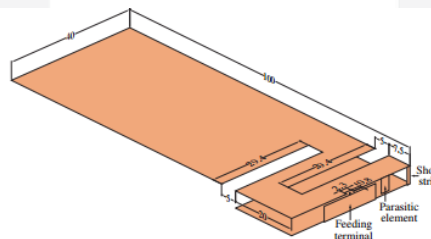


Gambar 2.3 Slot pada Groundplane

Jika antenna ditujukan untuk bekerja pada frekuensi ponsel yang juga harus mencakup band 900 MHz. Penambahan slot di ground plane tampaknya menjadi yang paling cocok sebab dapat mengurangi dimensi dari antenna itu sendiri.

2.5. Penambahan Elemen Parasitic

Penambahan elemen parasitic ditujukan untuk meningkatkan bandwidth pada frekuensi yang lebih tinggi. Elemen ini sangat sederhana dan memberikan kopling kapasitif tertentu antara ground plane dan elemen radiooator utama untuk meningkatkan respon di bagian bandwidth atas [2].



Gambar 2. 1 Peletakkan elemen parasitic [2]

3. Perancangan

3.1. Spesifikasi Antena

Untuk merancang Antenna dengan spesifikasi yang diinginkan, maka pada perancangan antenna PIFA ini dibutuhkan spesifikasi dengan ketentuan sebagai berikut :

Frekuensi kerja	: 900 MHz , 1800 MHz dan 2400 MHz
Gain	: ≥ 0 dBi
Bandwidth	: 10 MHz , 10 MHz dan 2400 MHz
VSWR	: ≤ 2
Impedansi masukan	: 50 ohm
Pola Radiasi	: Omnidireksional
Polarisasi	: Linear
Return Loss	: ≤ -10 dB

Adapun spesifikasi dari bahann sebagai berikut ,

- Bahan substrat epoxy fiberglass FR-4 dengan ketabalan 1,6 mm dan kontanta dielektrik 4,4
- Bahan pelapis substrat (konduktor) tembaga dengan ketebalan 0,035 mm
- Bahan pada short (konduktor) tembaga dengan ketebalan 0,3 mm

3.2. Perhitungan Dimensi Antena

Perancangan antenna PIFA dilakukan dengan menggunakan persamaan (4)

$$f_o = \frac{c}{3W + 5,6L + 3,7h - 3Wf - 3,7Ws - 4,3Lb - 2,5Ls}$$

Tabel 3. 1 Dimensi PIFA hasil Perhitungan

Komponen	Keterangan	Dimensi (mm)
W	Lebar Patch	50
L	Panjang Patch	50
H	Tinggi Antenna	6
Wf	Lebar feed	10
Ws	Lebar Short	19
Lb	Jarak Antara Feed dan Short	5
Ls	Jarak Short dari Ujung Patch	0
Wg	Lebar Groundplane	50
Lg	Panjang Groundplane	75

3.3. Dimensi U-Slot

Pada penelitian ini digunakan slot berbentuk U yang ditambahkan pada *patch* antenna agar menghasilkan frekuensi resonansi yang baru. Untuk mencari panjang dan lebar dari slot dapat menggunakan persamaan (2.5)

Tabel 3.2 Perhitungan dimensi Slot

1800 MHz	2400 MHz
$f_o = \frac{c}{4(W + L)}$	$f_o = \frac{c}{4(W + L)}$
$W + L = \frac{c}{4(f_o)}$	$W + L = \frac{c}{4(f_o)}$
$W + L = \frac{300}{4(1800)}$	$W + L = \frac{300}{4(2400)}$
$W + L = 41.67 \text{ mm}$	$W + L = 31.25 \text{ mm}$

3.4. Dimensi Slot Groundplane

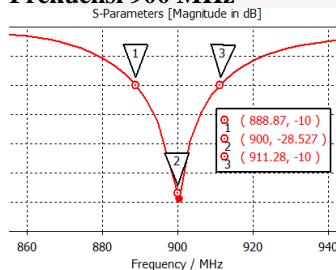
Pada jurnal *Multiband Handset Antennas By Means Of Groundplane Modification* disebutkan bahwa panjang slot pada groundplane yang paling optimal adalah $\lambda / 4$ dari frekuensi yang diinginkan. Untuk posisi slot, penulis menggunakan metode *trial and error* untuk mendapatkan antenna yang sesuai dengan spesifikasi.

3.5. Dimensi Elemen Parasitic

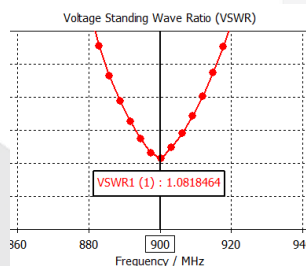
Pada jurnal *Ultra Wideband Planar Inverted-F Antenna (PIFA) for Mobile Phone Frequencies and Ultra Wideband Application* disebutkan bahwa penambahan elemen parasitic ditujukan untuk meningkatkan bandwidth pada frekuensi yang lebih tinggi. Untuk posisi elemen, penulis menggunakan metode *trial and error* untuk mendapatkan antenna yang sesuai dengan spesifikasi.

3.6. Hasil Simulasi

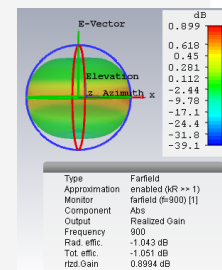
3.6.1. Frekuensi 900 MHz



Gambar 3.2 S-parameter 900 MHz



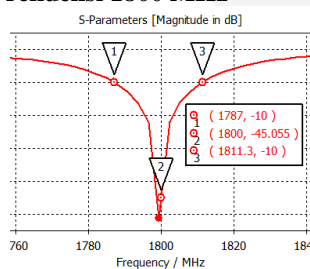
Gambar 3.3 VSWR 900 MHz



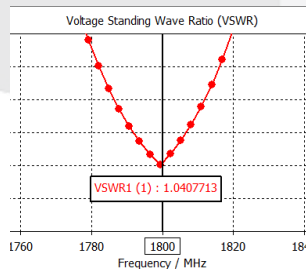
Gambar 3.4 Gain 900 MHz

Berdasarkan data pada gambar 3.2, 3.3, dan 3.4 untuk simulasi pada 1800 MHz didapatkan hasil sebagai berikut : Return Loss -28,5 dB , VSWR 1.08, bandwidth 22,41 MHz, gain 0,8 dB.

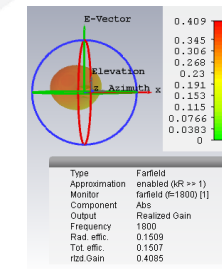
3.6.2. Frekuensi 1800 MHz



Gambar 3.5 S-parameter 1800 MHz



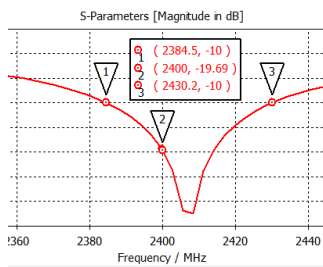
Gambar 3.6 VSWR 1800 MHz



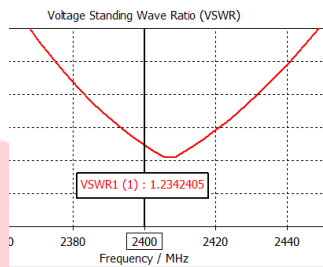
Gambar 3.7 Gain 1800 MHz

Berdasarkan data pada gambar 3.5, 3.6, dan 3.7 untuk simulasi pada 900 MHz didapatkan hasil sebagai berikut : Return Loss -45,05 dB , VSWR 1.04, bandwidth 24,3 MHz, gain 0,4 dB.

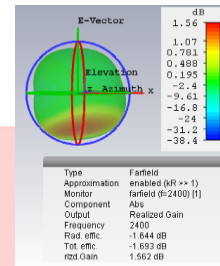
3.6.3. Frekuensi 2400 MHz



Gambar 3.8 S-parameter 2400 MHz



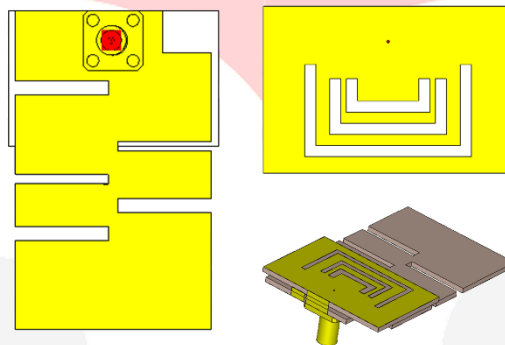
Gambar 3.9 VSWR 2400 MHz



Gambar 3.10 Gain 2400 MHz

Berdasarkan data pada gambar 3.8, 3.9, dan 3.10 untuk simulasi pada 2400 MHz didapatkan hasil sebagai berikut : Return Loss -19,69 dB , VSWR 1.23, bandwidth 45,7 MHz, gain 1,5 dB.

3.7. Hasil rancangan



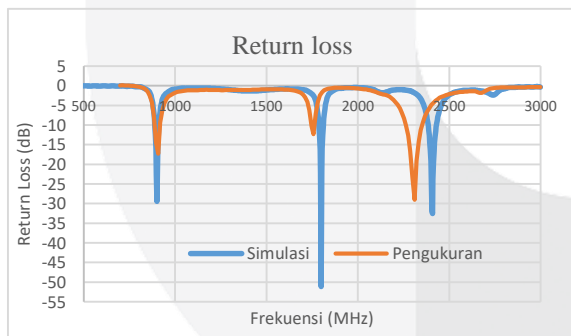
Gambar 3.11 Desain antenna PIFA

Setelah melakukan perhitungan dimensi awal lalu dilakukan optimasi untuk mendapatkan antenna PIFA yang dapat bekerja 3 frekuensi berbeda.

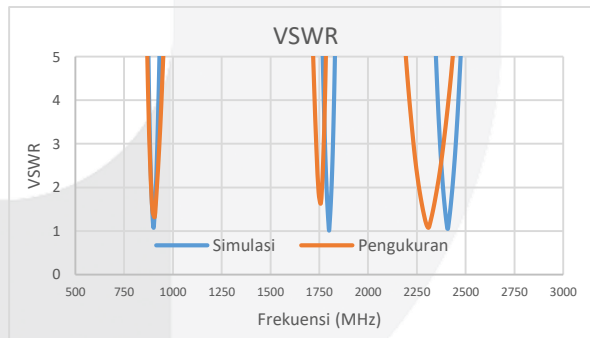
4. Pengukuran dan Analisis

4.1 Pengukuran S-Parameter

Berikut adalah data perbandingan hasil pengukuran dan simulasi dari parameter return loss, VSWR, dan bandwidth.



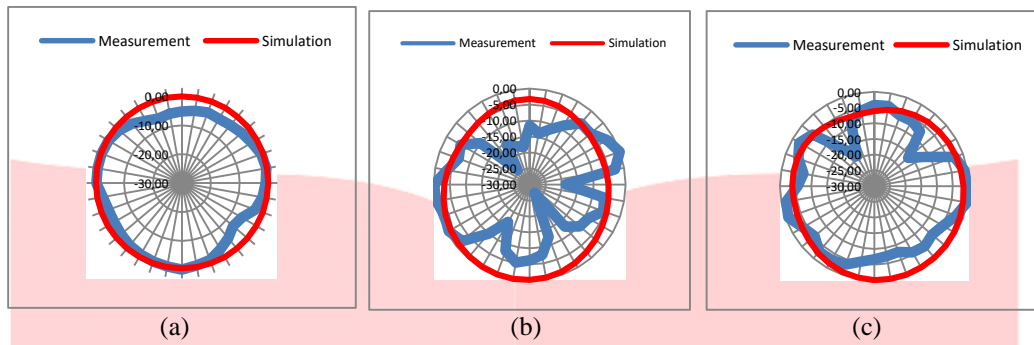
Gambar 4.1 Grafik Return Loss



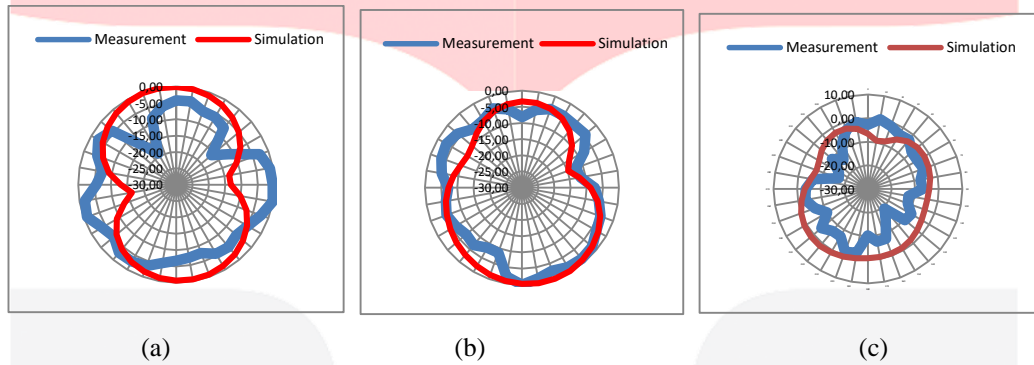
Gambar 4.2 Grafik VSWR

Akan tetapi, nilai *return loss* mengalami pergeseran seperti ditunjukkan pada gambar 4.2 dan Tabel 4.1. Perbedaan tersebut disebabkan karena pengerjaan antenna dengan tingkat ketelitian yang masih rendah dan pemasangan konektor dan patch dengan timah yang kurang baik menyebabkan pergeseran pada frekuensi kerja yang dihasilkan antenna.

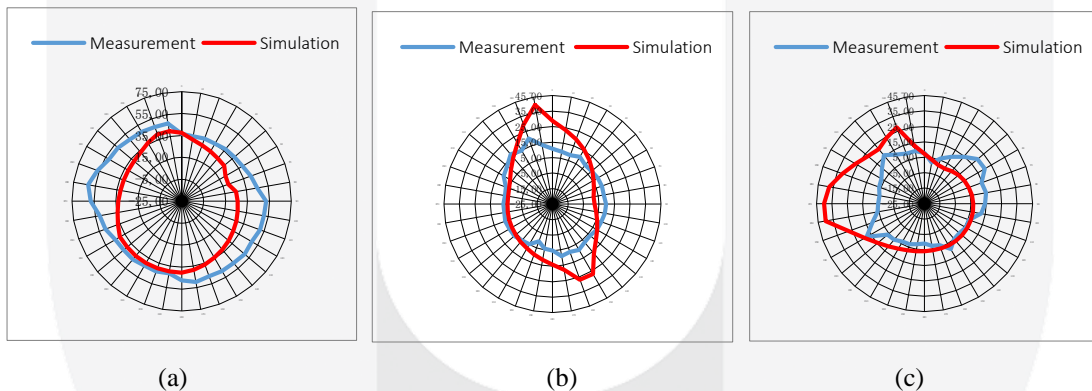
4.2 Pengukuran Pola Radiasi dan Polarisasi



Gambar 4. 1 Perbandingan pengukuran dan simulasi pola radiasi arah azimuth (a) frekuensi 900 MHz, (b) frekuensi 1800 MHz, (c) frekuensi 2400 MHz



Gambar 4. 2 Perbandingan pengukuran dan simulasi pola radiasi arah elevasi, (a) frekuensi 900 MHz, (b) frekuensi 1800 MHz, (c) frekuensi 2400 MHz



Gambar 4. 3 Perbandingan pengukuran dan simulasi polarisasi, (a) frekuensi 900 MHz, (b) frekuensi 1800 MHz, (c) frekuensi 2400 MHz

4.3 Perbandingan Pengukuran dengan Simulasi

Parameter	Spesifikasi	Simulasi	Pengukuran
Frekuensi	900 MHz	900	900
	1800 MHz	1800	1756
	2400 MHz	2400	2308
Return loss	< -10 dB	-28,57	-15,5
		-45,05	-12,09
		-19,69	-28,345
VSWR	< 2	1,08	1,4
		1,04	1,6
		1,2	1,08

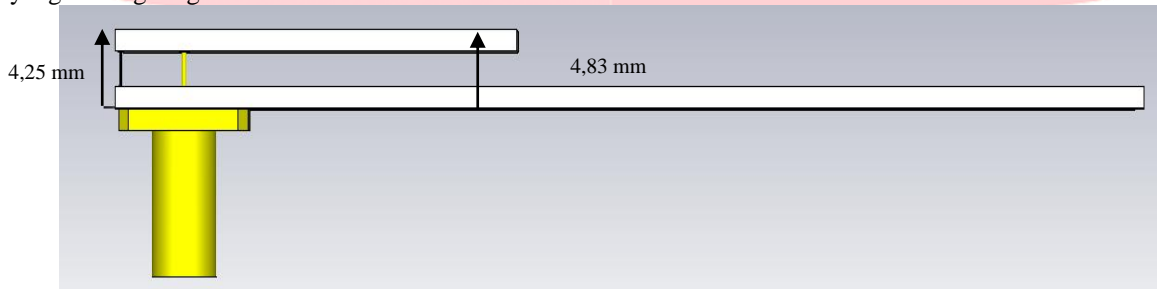
Parameter	Spesifikasi	Simulasi	Pengukuran
Gain	>0 dB	0,89	0,58
		0,4	-0,63
		1,5	0,52
Bandwidth	10 MHz	22,41	25,75
		24,3	17
	20 MHz	45,7	83

4.4. Analisis Pergeseran Hasil Pengukuran

Berdasarkan hasil pengukuran, antenna PIFA yang dihasilkan mengalami pergeseran pada frekuensi (1800 MHz dan 2400 MHz) dan beberapa parameter lainnya bila dibandingkan dengan hasil simulasi. Hal tersebut dikarenakan beberapa faktor, yaitu :

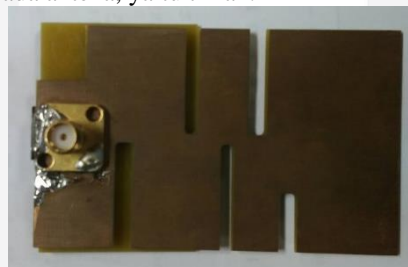
1. Simulasi merupakan kondisi ideal dimana nilai daya yang diterima antenna tidak dipengaruhi benda-benda yang ada disekitarnya. Pada pengukuran yang dilakukan tidak berada pada ruangan ideal sehingga daya yang diterima bias berasal dari daya akibat pantulan benda disekitarnya.
2. Antena yang direalisasikan bekerja pada frekuensi kerja beberapa provider telekomunikasi sehingga daya yang diterima bercampur dengan daya yang dikirim dari provider tersebut.
3. Tingkat ketelitian pada realisasi masih rendah yang menyebabkan perubahan pada daya yang diterima antenna.

Pada antenna hasil realisasi terjadi banyak perbedaan dibandingkan dengan hasil simulasi. Setelah dilakukan pengukuran, ketidak akuratan ukuran yang mencolok terjadi pada bagian patch antenna, dimana patch antenna tidak lurus sehingga tinggi antenna menjadi 4,25 mm pada ujung patch bagian short dan 4,83 mm pada bagian patch yang melengkung.

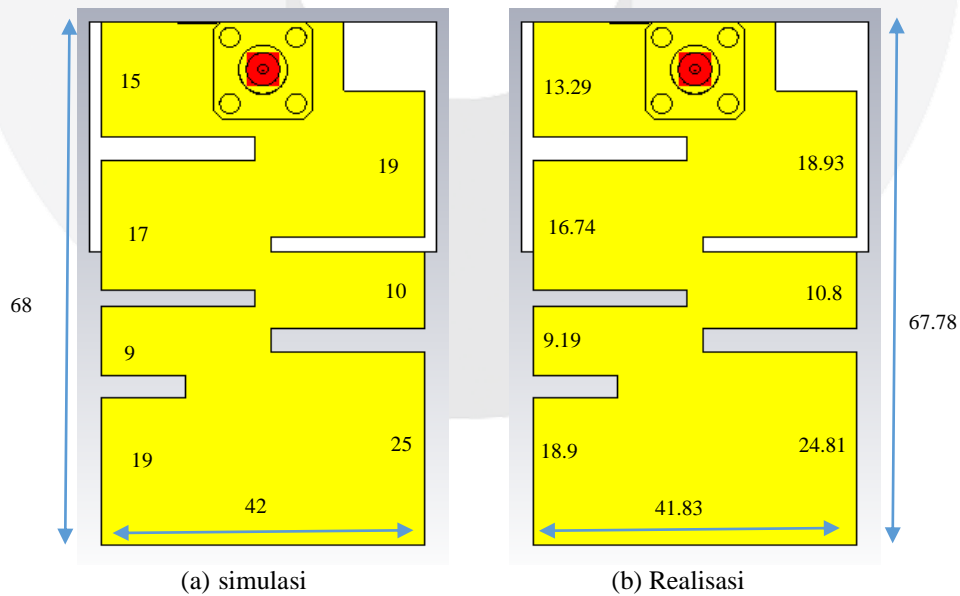


Gambar 4. 4 Kelengkungan pada patch antenna

Lalu , untuk tahap penyambungan antenna menggunakan teknik penyolderan, yang dimana mengakibatkan adanya element baru pada antenna, yaitu timah.



Gambar 4. 5 Bagian penyambungan tiap bagian dengan teknik penyolderan



Gambar 4. 6 Perbandingan dimensi antenna simulasi dengan realisasi

5. Kesimpulan dan Saran

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari seluruh proses perancangan dan realisasi antenna PIFA pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut,

1. Antena memiliki dimensi 68 mm x 42 mm.
2. Seluruh parameter antena seperti *Return Loss*, *VSWR*, *Bandwidth*, Pola Radiasi, Polarisasi, dan *Gain* telah sesuai dengan spesifikasi yang diinginkan.
3. Penambahan substrat dan slot pada groundplane antena PIFA dapat memperkecil dimensi dari keseluruhan PIFA.
4. Terdapat perbedaan hasil pengukuran dengan hasil realisasi baik saat pengukuran medan dekat dan medan jauh. Hal tersebut disebabkan oleh kondisi yang tidak ideal saat pengukuran dan Antena PIFA yang direalisasikan memiliki ketelitian yang cukup rendah.

5.2 Saran

Saran yang baik dilakukan untuk tugas akhir ini adalah :

1. Dalam fabrikasi, sebaiknya menggunakan mesin agar didapatkan ukuran yang presisi karena antena PIFA butuh ketelitian cukup tinggi.
2. Pengukuran antena yang telah direalisasikan sebaiknya dilakukan 2 kali. Pengukuran pertama dilakukan pada ruangan yang ideal seperti *anechoic chamber* untuk memvalidasi bahwa antena sesuai dengan yang disimulasikan. Pengukuran kedua dilakukan pada kondisi sebenarnya pada ruang terbuka agar dapat dibandingkan dengan hasil pada saat kondisi ideal.
3. *Bandwidth* yang dihasilkan antena PIFA masih terlalu sempit sehingga pada penelitian selanjutnya digunakan metode lain dalam meningkatkan *bandwidth*.
4. Antena PIFA secara keseluruhan dirasa masih terlalu rentan akan kerusakan sehingga pada penelitian selanjutnya agar menggunakan teknik lain agar antena yang dibuat dapat lebih kokoh.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. Q. K. d. H. Wong, "Small Antennas in Wireless Communications," *Proccesings of the IEEE*, vol. 100, pp. 2109-2121, 2012.
- [2] Ricardo Gomez-Villanueva, Roberto Linares-y-Miranda, Jose A. Tirado-Mendez, Hildeberto Jardón-Aguilar, "Ultra Wideband Planar Inverted-F Antenna (PIFA) for Mobile Phone Frequencies and Ultra Wideband Application," *Electromagnetics Research*, vol. 43, pp. 109-120, 2013.
- [3] C. A. Balanis, *Antenna Theory Analysis and Design*, 4th ed., New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2016.
- [4] Firstya Zahra Zerlinda, Bambang Setia Nugroho, Agus Dwi Prasetyo, "Perancangan dan Realisasi Multiband L-Slot Planar Inverted-F Antenna (PIFA) untuk Wi-Fi, UMTS, HSPA dan LTE pada Perangkat Seluler," 2015.
- [5] D. A. Sánchez-Hernández, "Multiband Integrated Antennas for 4G Terminals," Artech House, Inc., 2008.
- [6] F. Firmansyah, "Rancang Bangun Desain Antena PIFA untuk Penangkapan Daya Elektromagnetik Pada Frekuensi GSM 900MHz dan DCS 1800MHz dengan metode electromagnetic Harvesting," Institut Teknologi Sepuluh November, 2010.
- [7] Raja Patar Silitonga, Heroe Wijanto, Yuyu Wahyu, "Perancangan dan Realisasi Antena Mikrostrip Rektangular Bercelah untuk Tripleband (900 MHz, 1800 MHz, 2400 MHz)," 2015.
- [8] H.T. Chattha, M.K. Ishfaq, Y. Huang, S.J. Boyes, "Bandwidth Enhancement Techniques for Planar Inverted-F Antenna," *IET Microwaves Antennas & Propagation*, 2010.
- [9] M. A. Yasin, W. A. M. Al-Ashwal, A. M. Shire, S. A. Hamzah, K. N. Ramli, "Tri-Band Planar Inverted-F Antenna (PIFA) For GSM Bands And Bluetooth Application," *Asian Research Publishing Network (ARPN)*, 2015.
- [10] Christian Budi Eko Saputro, Heroe Wijanto, Agus Dwi Prasetyo, "Antena Monopole SWA-Bentang UHF untuk TTC (Telemetry, Tracking, and Command) dan Antena Susunan PIFA untuk Pemancar S-Band pada Nano Satelit," 2016.
- [11] Chattha, Hassan Tariq, Yi Huang, Xu Zhu, Yang Lu, "An Empirical Equation for Predicting the Resonant Frequency of Planar Inverted-F Antennas," *IEEE antennas and wireless propagation letters*, vol. 8, 2009.
- [12] "PIFA - The Planar Inverted-F Antenna," *Antenna Theory*, 2009. [Online]. Available: <http://www.antenna-theory.com/antennas/patches/pifa.php>. [Accessed Minggu Oktober 2017].