

ANTENA MICROSTRIP FRACTAL – BOWTIE 2-18 GHz
UNTUK ELECTRONIC SUPPORT MEASURE
MICROSTRIP FRACTAL-BOWTIE ANTENNA 2-18 GHz
FOR ELECTRONIC SUPPORT MEASURE

Imam Ichwani¹, Heroe Wijanto², Yuyu Wahyu,³

^{1,2}Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom

³Pusat Penelitian Elektronika dan Telekomunikasi, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia

¹ imamichwani@student.telkomuniversity.ac.id ² heroe@Telkomuniversity.ac.id ³ yuyu@ppet.lipi.go.id

Abstrak

Pada era perkembangan teknologi seperti saat ini Indonesia memerlukan perangkat elektronik yang canggih yang dapat membantu pertahanan sistem keamanan Indonesia, dimana 2/3 wilayah Indonesia merupakan lautan yang perlu pengamanan ekstra. Oleh karena itu untuk meningkatkan keamanan dalam menjaga dan mengawasi wilayah Indonesia, dibutuhkan sistem yang dapat meningkatkan kemampuan pertahanan Negara Kesatuan Republik Indonesia yaitu *Electronic Support Measure* (ESM). ESM ini sedang dikembangkan oleh LIPI untuk nantinya digunakan dalam sistem keamanan Indonesia. ESM secara umum merupakan sebuah peralatan elektronik yang berfungsi untuk menerima sinyal gelombang elektromagnetik, kemudian sinyal tersebut diproses dan dianalisa sehingga diperoleh lokasi, kuat sinyal dan parameter lainnya. Salah satu subsistem penting dalam ESM adalah subsistem antenna sebagai penerima sinyal gelombang elektromagnetik. Pada penelitian tugas akhir ini akan dirancang antenna mikrostrip *fractal-bowtie* yang bekerja pada frekuensi Ultra Wideband yaitu 2-18 GHz untuk memenuhi kebutuhan *Electronic Support Measure* (ESM). Maka pada Tugas Akhir ini akan dirancang antenna mikrostrip pada software Ansoft HFSS 15.0 yang nantinya akan direalisasikan. Namun untuk mengatasi kekurangan pada antenna mikrostrip yaitu berupa bandwidth yang kecil, kombinasi dilakukan pada proses perancangan dibagian *patch* yang berbentuk *bowtie* dengan fraktal sierpinski gasket, saluran transmisi, dan *groundplane* partial agar antenna memiliki *bandwith* yang lebih lebar dan membuat antenna bekerja pada frekuensi *Ultra Wideband* yaitu 2 - 18 GHz.

Kata Kunci : Antena Microsrip Fractal-bowtie, Ultra Wideband, ESM.

Abstract

In the era of technological developments nowadays, It requires a sophisticated electronic device that could help the security defense system of Indonesia, where two-third of the area is sea and needed a dependable security. Therefore, to increase the security within the area, it needs a system that can improve the ability of Defense of the Republic of Indonesia, which is unitary State Electronic Support Measure (ESM). ESM is being developed by LIPI for later use in security systems Indonesia. ESM in General is an electronic equipment which serves to receive the signals of electromagnetic waves, the signal is then processed and analyzed so that the retrieved location, signal strength and other parameters. One of the important subsystems in the ESM is the antenna subsystem as the receiver signals of electromagnetic waves. On the research of this final assignment will be designing microstrip fractal-bowie antenna which worked on the Ultra Wideband frequency 2-18 GHz to meet the needs of Electronic Support Measure (ESM). Therefore, in this final assignment, a microstrip antenna will be designed using Ansoft HFSS 15.0. However, to overcome the shortage of microstrip antenna that is on the form of a small bandwidth, a combination of design process performed on the bowtie-shaped patch with the fractal sierpinski gasket, transmission line, and antenna in order for partial groundplane has a wider bandwidth and make the antenna working on Ultra Wideband frequency 2-18 GHz.

Keywords: *Microsrip Fractal- bowtie Antenna, Ultra Wideband, ESM.*

1. Pendahuluan

ESM secara umum merupakan sebuah peralatan elektronik yang berfungsi untuk menerima sinyal gelombang elektromagnetik yang kemudian sinyal tersebut diproses dan dianalisa sehingga diperoleh lokasi, kuat sinyal, dan parameter lainnya. Dalam mendukung teknologi *Electronic Support Measure* (ESM), maka dibutuhkan *device* sebagai pengirim maupun penerima, yaitu sebagai *transformator* gelombang elektromagnetik di udara. Antena merupakan *device* yang digunakan untuk melakukan proses tersebut. Pada sistem komunikasi ESM ini, akan dirancang antenna dengan *desain compact*, berukuran kecil, *bandwith* yang lebar, dan mampu bekerja pada

frekuensi 2- 18 Ghz. Maka pada Tugas Akhir ini akan dirancang antenna mikrostrip pada software Ansoft HFSS 2012 yang nantinya akan direalisasikan. Namun untuk mengatasi kekurangan pada antenna microstrip yaitu berupa bandwidth yang kecil, kombinasi dilakukan pada proses perancangan dibagian *patch* yang berbentuk *bowtie* dengan fraktal sierpinski gasket, saluran transmisi, dan groundplane partial agar antenna memiliki *bandwith* yang lebih lebar dan membuat antenna bekerja pada frekuensi *Ultra Wideband* yaitu 2 - 18 GHz.

2. Dasar Teori

2.1 Electronic Support Measure (ESM)

Electronic Support Measure (ESM) merupakan bagian dari *Electronic Warfare(EW)*. Dimana EW merupakan peperangan elektronik yang menggunakan energi dari gelombang elektromagnetik. ESM berfungsi untuk memonitoring posisi musuh dan juga untuk mencegah serangan dari musuh dengan menggunakan spektrum gelombang elektromagnetik.

2.2 Antena Microstrip

Antena microstrip adalah jenis antenna yang berbentuk papan tipis dan mampu bekerja pada frekuensi yang tinggi yaitu diatas 100 MHz. Microstrip sendiri berasal dari dua kata yaitu micro (sangat kecil) dan trip (bilah/potongan), sehingga antenna microstrip dapat didefinisikan sebagai antenna yang memiliki bentuk seperti bilah/potongan yang ukurannya sangat kecil. Secara umum antenna mikrostrip terbagi menjadi 3 bagian utama yaitu:

▪ Patch

Secara umum, patch terbuat dari bahan konduktor seperti tembaga ataupun emas dengan bentuk beragam mulai dari lingkaran, persegi, persegi panjang, segitiga, ataupun annual ring. Fungsi dari patch ini sendiri adalah untuk meradiasikan gelombang elektromagnetik ke udara. Patch dan saluran pencatu pada umumnya diletakkan diatas substrat. Ketebalan dari patch itu sendiri dibuat sangat tipis atau lebih kecil dari λ .

▪ Substrat

Substrat sendiri terbuat dari bahan dielektrik yang fungsinya adalah sebagai media penyalur gelombang elektromagnetik dari catuan. Karakteristik dari substrat sangat berpengaruh pada besar parameter antenna. Salah satunya adalah ketebalan dari substrat yang bisa mempengaruhi *bandwidth* pada antenna yaitu dimana jika substrat dibuat semakin tebal, maka *bandwidth* juga akan semakin membesar.

▪ Ground Plane

Ground plane biasanya terbuat dari bahan konduktor. Ukurannya sama dengan substrat yang ada. Fungsi dari *groundplane* sendiri adalah sebagai *ground* dari antenna.

▪ Ground plane partial

Ground plane partial atau pengurangan bidang *groundplane* adalah metode yang sedang populer untuk meningkatkan karakteristik antenna[13]. Metode *Ground Plane Partial* digunakan untuk meningkatkan efisiensi, *matching impedance*, *front to back ratio*, dan juga meningkatkan *bandwidth*

2.3 Antena Fraktal Sierpinski Gasket

Secara umum fraktal didefinisikan sebagai bentuk geometri yang terbentuk dari bagian-bagian yang memiliki kesamaan bentuk apabila dilakukan proses pembesaran terhadap bentuk geometri tersebut. Fraktal dikatakan memiliki detil yang tak hingga dan dapat memiliki struktur serupa diri pada tingkat perbesaran yang berbeda. Pada banyak kasus, sebuah fraktal bisa dihasilkan dengan cara mengulang suatu pola dalam proses rekursif atau iteratif. Antena *Fraktal Sierpinski Gasket* merupakan salah satu jenis antenna berbentuk segitiga yang memanfaatkan sifat dan karakteristik *geometri fraktal* yaitu *self similarity* (kemiripan terhadap dirinya), pengulangan dan penskalaan. Penentuan dimensi pada geometri ini dapat dilakukan dengan beberapa cara antara lain menggunakan dimensi topologi, dimensi Euclidean, *self similarity dimension*, dan *Haussdorf dimension*. Antena Fraktal Sierpinski Gasket ini menawarkan berbagai macam keuntungan, yaitu antenna ini dapat dibuat dengan ukuran yang kecil menghasilkan beberapa frekuensi resonan (multiband), dan dapat mengoptimalkan gain.

Untuk mencari dimensi suatu antenna mikrostrip (a, W, dan L) harus diketahui parameter bahan yang akan digunakan yaitu ketebalan dielektrik (h), konstanta dielektrik, tebal konduktor (t), dan rugi-rugi bahan. Panjang antenna mikrostrip harus disesuaikan, karena panjang pendeknya suatu panjang antenna mikrostrip akan mempengaruhi nilai *bandwidth*. Semakin panjang maka *bandwidth* akan semakin lebar, sedang semakin pendek maka *bandwidth* akan semakin sempit. Dengan mengatur lebar antenna mikrostrip juga akan mempengaruhi impedansi masukan antenna tersebut. Untuk menentukan dimensi dari patch antenna pada tugas akhir ini, ada dua parameter penting yang perlu dihitung:

- Tinggi patch antenna (h)

Untuk menghitung tinggi patch antenna dapat menggunakan rumus antenna fractal dibawah ini:

$$h = 0.152 \frac{c}{fr} \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) (\delta)^n \quad (1)$$

Karena pada fractal sierpinski ini menggunakan segitiga sama sisi, maka nilai flare rate atau sudut segi tiga (α) yang digunakan adalah sebesar 60° .

- Sisi patch antenna (a)

Sisi patch antenna dapat dicari dengan menggunakan rumus dibawah ini.

$$a = \frac{h}{\cos 30} \quad (2)$$

2.4 Microstrip Bow-tie

Bentuk antenna *bow-tie* merupakan pengembangan desain antenna dari bentuk patch segitiga (triangle). Antena *bow-tie* pada dasarnya termasuk dalam jenis antenna dipole bentuk kawat dengan penambahan beberapa elemen untuk dapat melakukan pengaturan impedansi input antenna. pada perkembangannya antenna *bow-tie* bentuk kawat dikonversi kedalam bentuk patch. Antena *bow-tie* bentuk patch lebih kecil dari antenna *bow-tie* bentuk kawat. Kelebihan bentuk bowtie adalah mempunyai radiator yang lebih besar. Antena bowtie digunakan untuk menghasilkan frekuensi kerja yang sama pada kedua polarisasinya.

2.5 Teknik Pencatutan

Pada pembuatan antenna mikrostrip, dibutuhkan teknik untuk mentransmisikan energi elektromagnetik ke antenna mikrostrip itu sendiri, teknik yang dimaksud adalah teknik pencatutan mikrostrip. Beberapa teknik pencatutan antara lain *microstrip line*, *coaxial probe*, *aperture coupling*, *proximity coupling / Electromagnetically Coupled (EMC)*, dan *coplanar wave guide*. Faktor utama yang harus dipertimbangkan dalam memilih jenis pencatutan (*feeding*) adalah transfer daya yang efisien antara struktur peradiasi dengan struktur *feeding*, yaitu tercapainya *matching impedance* yang baik antara keduanya.

2.6 Exponensial Tapered Microstrip Lines

Exponensial Tapered Microstrip Lines banyak digunakan pada frekuensi radio dan gelombang mikro[12]. *Exponential tapered microstrip lines* sering digunakan sebagai transformator impedansi, resonator dan filter pada frekuensi gelombang mikro, dan memiliki kelebihan *matching impedansi* pada *broadband* bila digunakan sebagai transformator impedansi, resonator, dan filter[12].

3. Perancangan dan Simulasi

Dalam menentukan dimensi suatu antenna, frekuensi kerja sangat mempengaruhi ukuran suatu antenna. Dalam tugas akhir ini antenna yang dirancang bekerja pada frekuensi Ultra Wideband yaitu 2 -18 Ghz. Untuk mendapatkan bandwidth yang lebar tersebut, Maka kombinasi akan dilakukan pada bagian *patch* yang berbentuk *bowtie* dengan 3 buah iterasi fraktal sierpinski gasket, saluran transmisi, dan groundplane yang berbentuk *partial* agar antenna memiliki *bandwith* yang lebih lebar dan membuat antenna bekerja pada frekuensi *Ultra Wideband* yaitu 2 - 18 GHz.

3.1 Menghitung Dimensi Patch Fraktal Sierpinski Gasket - Bowtie

Antena sierpinski gasket yang akan dirancang merupakan segitiga sama sisi, sehingga sudut segitiga (α) sebesar 60° , dan konstanta yang digunakan untuk menghitung dimensi patch pada tugas akhir ini bernilai 0.152. Nilai konstanta tergantung dari nilai dielektrik substrat dan ketebalan substrat yang digunakan.

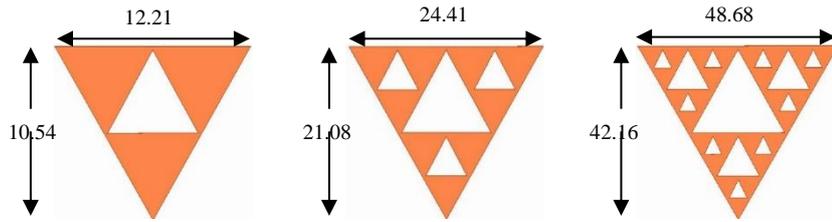
Untuk mendapatkan dimensi antenna total, langkah awal yang dilakukan pada pengerjaan tugas akhir ini adalah dengan cara menentukan frekuensi kerja untuk iterasi yang paling kecil. Maka ditetapkan 15 Ghz sebagai frekuensi tengah pada range frekuensi tertinggi untuk iterasi yang paling kecil yaitu iterasi ke-4. Sehingga frekuensi 15 Ghz nantinya akan menjadi acuan untuk menghitung tinggi dari iterasi yang paling kecil yaitu h_1 :

$$h_1 = 0.152 \frac{3 \times 10^8}{15 \times 10^9} \cos (60/2)(2)^1 = 5.27 \text{ mm}$$

setelah didapat dimensi untuk iterasi pertama, maka tinggi dari iterasi selanjutnya tinggal dikalikan 2 seperti, $h_2=2 \times h_1$, $h_3=2 \times h_2$, $h_4=2 \times h_3$ dan seterusnya sebanyak iterasi yang ditentukan. Sehingga diperoleh $h_1=5.27$ mm, $h_2=10.54$ mm, $h_3=21.08$ mm, dan $h_4=42.16$. Setelah tinggi segitiga diperoleh, maka sekarang hitung sisi tiap segitiga:

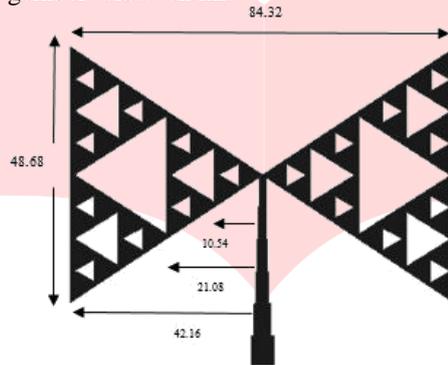
$$a_1 = \frac{5.27}{\cos 30} = 6.09 \text{ mm}$$

Dimana a itu adalah sisi dari segitiga sama sisi, 5.27 adalah tinggi dari segitiga dan 30° adalah sudut yang dibentuk oleh sisi segitiga dan tinggi segitiga. Hitunglah sisi segitiga a_2, a_3, a_4 menggunakan rumus yang sama sehingga diperoleh $a_2 = 12.21$, $a_3 = 24.41$, $a_4 = 48.68$. Pada proses pengerjaan tugas akhir ini ada sedikit modifikasi dengan mengurangi jumlah iterasi menjadi 3 yang semula menggunakan 4 buah iterasi. Karena nilai VSWR yang dihasilkan dengan menggunakan 3 buah iterasi sudah memenuhi spesifikasi perancangan antenna yang dibutuhkan *Electronic Support Measure* untuk frekuensi 2- 18 GHz yaitu ≤ 2 . Sehingga tinggi h_1 dan sisi a_1 untuk iterasi ke-4 yaitu segitiga yang paling kecil tidak digunakan. Maka konstruksi patch untuk segitiga terlihat seperti gambar 1 dibawah ini dengan 3 iterasi.



Gambar 1. Tingkatan Konstruksi Patch Antena Sierpinski Gasket

Pada penelitian ini patch antena yang dirancang menggunakan fraktal dengan 3 iterasi dan dicerminkan agar membentuk bowtie seperti pada gambar dibawah ini:



Gambar 2. Dimensi Microstrip *Fractal-Bowtie*

4. Pengukuran Antena



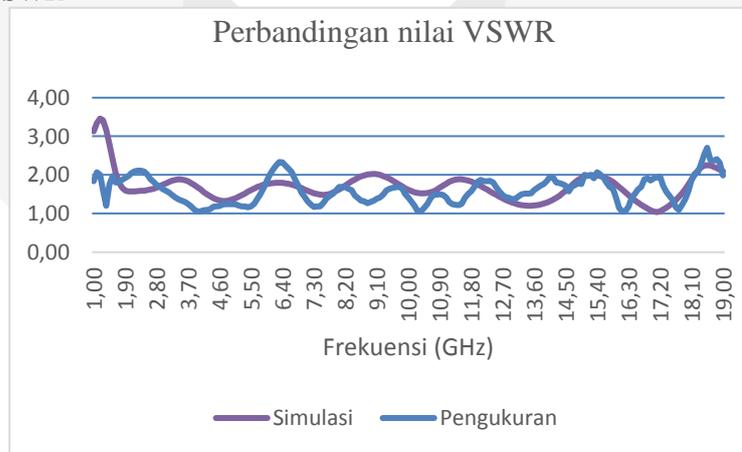
(a)

(b)

Gambar 3. Realisasi antena microstrip fraktal-bowtie dengan 3 iterasi
a) tampak depan ; b) tampak belakang

▪ **Teknik Pengukuran Medan Dekat**

1. Pengukuran VSWR



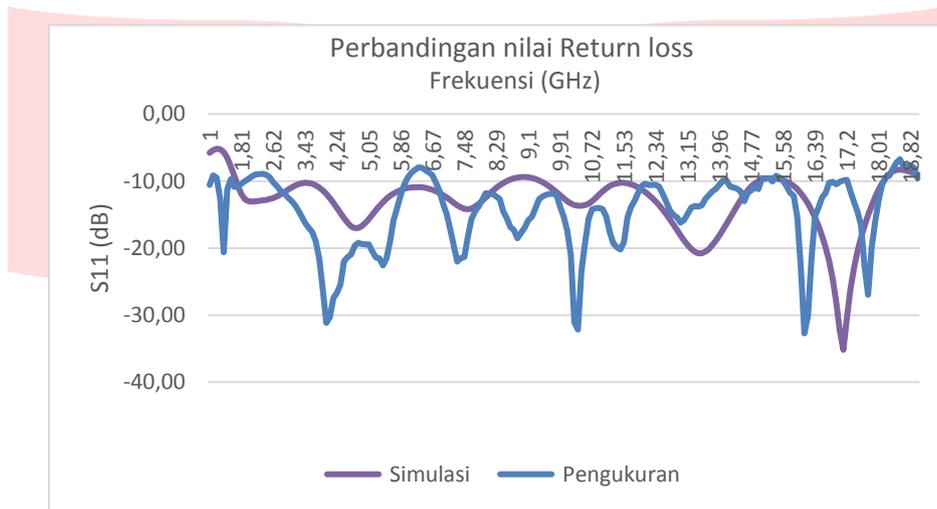
Gambar 4. Grafik perbandingan VSWR hasil Simulasi dengan Pengukuran

Bila nilai VSWR hasil pengukuran dibandingkan dengan hasil simulasi seperti yang terlihat pada **Gambar 4** maka ada sedikit perbedaan dan pergeseran nilai VSWR antara pengukuran dan simulasi. Perbedaan dan

pergeseran sedikit antara hasil pengukuran dengan hasil simulasi terjadi dikarenakan pada proses simulasi memiliki kondisi yang ideal tanpa ada faktor gangguan. Meskipun ada beberapa faktor yang menyebabkan pergeseran, nilai VSWR masih dalam batas yang wajar dan masih memenuhi standar dari spesifikasi yang telah ditentukan di awal yaitu nilai VSWR rata-rata pada frekuensi 2-18 GHz masih berada pada nilai ≤ 2 .

2. Return loss

Pengukuran *return loss* pada antenna bertujuan untuk mengetahui besar daya yang kembali ke saluran transmisi. Berikut ini adalah hasil pengukuran *return loss* antenna.



Gambar 5. Grafik perbandingan Return loss hasil Simulasi dengan Pengukuran

Bila hasil pengukuran antenna dibandingkan dengan hasil simulasi pada **Gambar 5** maka nilai *return loss* tidak terlalu jauh berbeda. Perbedaan sedikit antara hasil pengukuran dengan hasil simulasi dikarenakan tidak ada faktor-faktor gangguan pada simulasi, seperti pada pengukuran ada penambahan port yang tidak ada pada simulasi, serta pengukuran dilakukan pada ruangan yang banyak terdapat alat yang memancarkan gelombang elektromagnetik.

3. Impedansi

Impedansi antenna diukur melalui port catuan antenna menggunakan alat untuk mengukur impedansi yaitu *Network Analyzer*. Pada tugas akhir ini saluran output yang digunakan adalah 50 Ω , sehingga nilai impedansi yang bagus agar terjadi transfer daya maksimum adalah mendekati nilai 50 Ω .

Tabel 1 Perbandingan Impedansi dan pengukuran

Frekuensi (GHz)	Impedansi (Ω)	
	Simulasi	Pengukuran
2	75.32	43.38
5	67.58	51.58
10	75.89	47.86
15	53.03	43.83
17	51.28	48.65

Dari Tabel 1 baik hasil simulasi maupun pengukuran impedansi masih menunjukkan hasil yang normal karena masih mendekati 50 Ω .

▪ **Teknik Pengukuran Medan Jauh**

Pengukuran Gain, Pola Radiasi, dan Polarisasi bertujuan untuk mengetahui karakteristik medan jauh antenna serta mengetahui distribusi dan penjalaran gelombang pada media propagasi yang dihasilkan oleh antenna tersebut.

1. Pengukuran Gain

Pengukuran Gain bertujuan untuk mengetahui besarnya jarak pancar serta *coverage area* yang dapat dicapai oleh antenna melalui daya yang dipancarkan

$$G_{AUT(dBi)} = 10 \log \frac{P_{AUT}}{P_{Ref}} + G_{Reff} \tag{3}$$

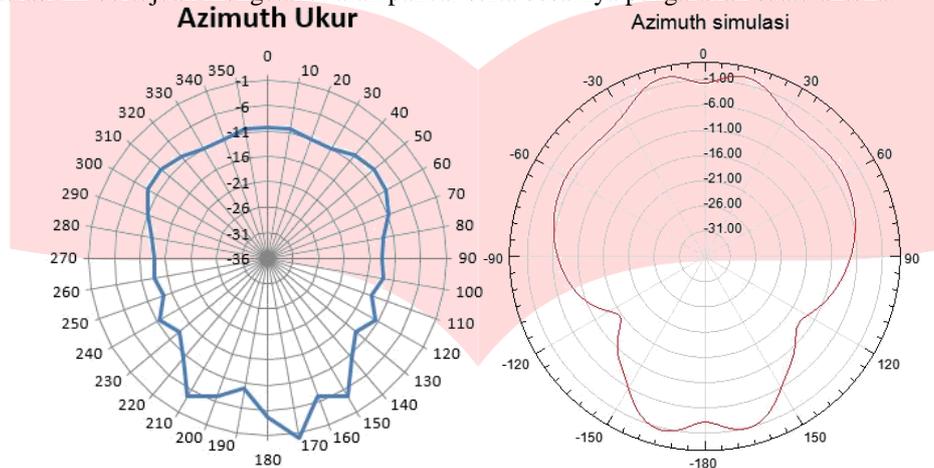
Jika dilakukan dalam perhitungan dB, maka :

$$G_{AUT(dBi)} = (P_{AUT(dBm)} - P_{Reff(dBm)}) + G_{Reff(dBi)} \quad (4)$$

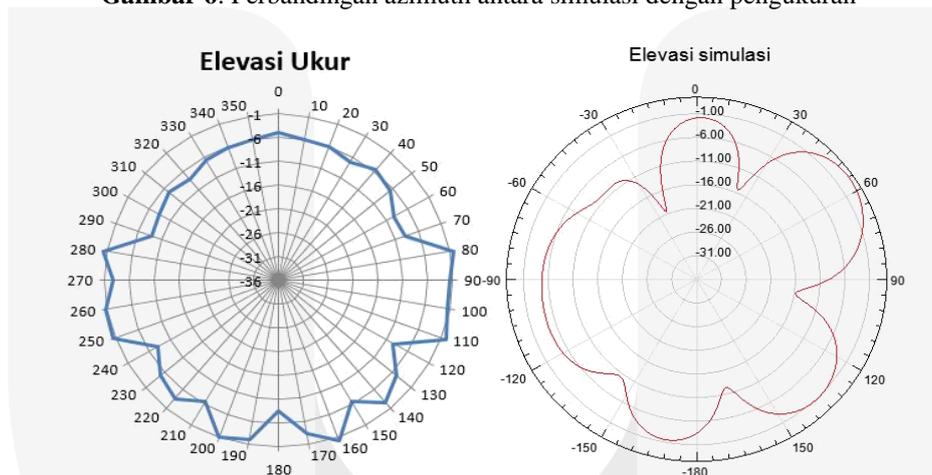
Antena microstrip fractal bowtie yang dirancang pada penelitian ini menghasilkan Gain sebesar 3.8 dB.

2. Pengukuran Pola Radiasi

Pola radiasi mempresentasikan arah pancaran dari medan atau gelombang suatu antenna. pengukuran pola radiasi ini bertujuan mengetahui arah pancar serta besarnya pengarahannya suatu antenna.



Gambar 6. Perbandingan azimuth antara simulasi dengan pengukuran



Gambar 7. Perbandingan elevasi antara simulasi dengan pengukuran

Dari hasil yang diperoleh terlihat perbedaan pola radiasi baik pada arah *azimuth* maupun elevasi antara hasil pengukuran dan simulasi. Terdapat beberapa faktor yang menyebabkan adanya penyimpangan hasil pengukuran dibandingkan hasil simulasi. Berikut adalah beberapa faktor yang mempengaruhi terjadinya penyimpangan:

1. Pengukuran tidak dilakukan di ruangan *anechoic chamber* melainkan di ruang terbuka yang tidak *homogenic* yang disekitarnya berdekatan dengan gedung dan bangunan lainnya yang memungkinkan terjadinya pantulan-pantulan sinyal.
2. Pengukuran dilakukan di dalam ruangan yang tidak menutup kemungkinan adanya interferensi sinyal dari sistem lain dan pantulan benda-benda disekitarnya.
3. Perangkat untuk pengukuran yang masih manual, yaitu pengarahannya secara manual, sehingga pengarahannya yang mungkin masih kurang presisi.
4. Nilai yang muncul pada alat ukur yang terus berubah sehingga diambil dua sampai empat sampel saja untuk mengambil hasil data sehingga keakuratan hasil pengukuran menjadi berkurang.

Kesalahan pembacaan level daya yang mungkin terjadi akibat fluktuasi daya terima yang terukur pada *spectrum analyzer*. Namun dengan melihat hasil simulasi dan pengukuran menunjukkan bahwa kedua hasil tersebut menunjukkan jenis pola radiasi *omnidirectional* karena daya terbesar memancar hampir kesegala arah. Maka hal ini sesuai dengan spesifikasi awal antenna yang diinginkan mempunyai pola radiasi *omnidirectional*.

3. Pengukuran polarisasi

Pengukuran polarisasi bertujuan untuk mengetahui pola arah getar gelombang dari suatu antena yang merambat melalui media propagasi. Mengetahui jenis polarisasi dari suatu antena diperlukan pada perhitungan power link budget karena apabila antara *transmitter* dan *receiver* memiliki jenis polarisasi yang berbeda maka akan menghasilkan loss polarization.

5. Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari perancangan dan realisasi antenna microstrip fractal – bowtie pada tugas akhir ini adalah:

1. Antena microstrip fractal – bowtie yang dirancang dan direalisasikan dapat bekerja pada range frekuensi sesuai dengan spesifikasi, yaitu 2-18 GHz dimana itu merupakan frekuensi kerja dari Electronic Support Measure dengan $VSWR \leq 2$, dan Gain yang dihasilkan antena sebesar 3.8 dB.
2. Kombinasi antara saluran transmisi, bentuk patch fractal – bowtie, dan *groundplane* yang berbentuk *partial* mampu menurunkan nilai VSWR kebatas minimum, sehingga membuat *bandwidth* menjadi lebih lebar dan memenuhi spesifikasi.
3. Polaradiasi yang dihasilkan antena adalah *omnidirectional*, dan polarisasi antena adalah linier.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Balanis, C. (1982.). *Antenna Theory Analysis And Design*.
- [2] Indonesia, L. (2013). *Electronic Support Measure*.
- [3] Adhi mahendra, Perancangan Antena Microstrip Bow-tie pada Aplikasi Ultra Wideband, Universitas Pancasila, 2012
- [4] LIPI. (2014). Rancangan Bangun Sistem *Mobile Electronic Support Measure (ESM)* 2-18 GHz dengan Sensitivitas Sinyal dan Akurasi Posisi Yang Tinggi Untuk Identifikasi Tipe dan Lokasi Radar Serta Persenjataan Elektronik Musuh.
- [5] Iqbal Adhiyogo, "Perancangan dan Realisasi Antena Microstrip Fractal Sierpinski Gasket Pada Beberapa Range Frekuensi (Multiband) dengan Menggunakan Substrat Rogers 4003", Universitas Telkom, Bandung, 2011.
- [6] Ramesh Garg, Prakash Bhartia, Inder Bahl, Apisak Ittipoboon, "Microstrip Antenna Design Handbook", Artech House, inc, Norwood, 2001.
- [7] J.R. James and P.S. Hall, "Handbook of Microstrip Antennas", London: United Kingdom, 1989.
- [8] David M. Pozar, Daniel H. Schaubert, "Microstrip Antennas: The Analysis and Design of Microstrip Antennas and Arrays", John Wiley & Son, inc, 1995
- [9] Kurnia Sari, Dian, "Simulasi Dan Implementasi Antena Mikrostrip Bowtie Untuk Aplikasi ISM Pada Frekuensi 2,4GHz," Universitas Telkom, Bandung, 2008
- [10] M.K.A. Rahim, M.Z.A. Abdul Aziz, C.S. Goh, "Bow-tie Microstrip Antenna Design," in *IEEE*, Wireless Communication Centre, Faculty of Electrical Engineering, University Teknologi Malaysia, 2005.
- [11] Mashury Wahab, "Penelitian dan Pengembangan *RF Head* dan *Baseband Processing Electronic Support Measure (ESM)*", Pusat Penelitian Elektronika dan Telekomunikasi-LIPI, Bandung, 2012.
- [12] Mehmet Ali Belen, Salih Demirel, Filiz Gunes, and Ahmet Kenan Keskin "Design Optimization of the Exponentially Tapered Microstrip Impedance Matching Sections Using a Cost Effective 3-D-SONNET-based SVRM with the Particle Swarm Intelligence", Yildiz Technical University, Istanbul, Turkey, 2013.
- [13] Abhishek Viswanathan, Rajasi Desai "Applying *Partial-Ground Technique to Enhance Bandwidth of a UWB Circular Microstrip Patch Antenna*" 2014.