

ANTENA HELIX MODE AXIAL UNTUK SENSOR CIRCULARLY POLARIZED SYNTHETIC APERTURE RADAR (CP-SAR) PADA PESAWAT TANPA AWAK

AXIAL MODE HELICAL ANTENNA FOR SENSOR OF CIRCULARLY POLARIZED SYNTHETIC APERTURE RADAR (CP-SAR) ONBOARD UNMANNED AERIAL VEHICLE (UAV)

Aqil Aztris¹, Heroe Wijanto², Edwar³

Prodi S1 Teknik Telekomunikasi, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom

aqil.aztris@gmail.com¹, hero.wijanto@gmail.com², Eduatgugel@gmail.com³

Abstrak

Synthetic Aperture Radar (SAR) merupakan salah satu bentuk perkembangan teknologi radar yang digunakan untuk membuat gambar dua atau tiga dimensi suatu objek. SAR menggunakan sensor berupa antena yang polarisasi gelombang yang dipancarkan berbentuk sirkular atau bisa disebut dengan *Circularly Polarized Synthetic Aperture Radar (CP-SAR)*. CP-SAR dapat meminimalisir pergeseran fasa ketika gelombang melewati lapisan ionosfer, sehingga meningkatkan kualitas data citra yang dihasilkan. Sistem CP-SAR akan digunakan pada *Unmanned Aerial Vehicle (UAV) JX-1* sebagai *ground testing*.

Pada penelitian ini dirancang antena helix dengan menggunakan mode *axial* untuk menghasilkan polarisasi *unidirectional*, *Right Hand Circular Polarized (RHCP)* terhadap sumbu catuan. Teknik pencatuan yang digunakan teknik *pheriperal*. Untuk teknik *matching impedance* menggunakan penambahan $\frac{1}{4}$ lilitan. Proses desain dan simulasi menggunakan *software* simulator antena. Proses realisasi menggunakan kabel tembaga dengan nilai konduktivitas $5,7 \times 10^7$ mho/m. dan memiliki ketebalan 4 mm. Antena helix mode axial menghasilkan *gain* 9,61 dB, *axial ratio* 1,03 dB, *VSWR* 1,46, *return loss* -14,97 dB, pola radiasi *unidirectional* dan *bandwidth* 568 MHz. Di desain 4 lilitan dengan total panjang antena adalah 29 cm dan memiliki berat 1,5 kg.

Kata Kunci: Antena Helix, Polarisasi Sirkular, CP-SAR, RHCP

Abstract

Synthetic Aperture Radar (SAR) is one form of development of radar technology that is used to make two or three-dimensional images of an object. SAR uses a sensor consisting of a wave-polarized antenna that is emitted circularly or can be called a *Circular Polarized Synthetic Aperture Radar (CP-SAR)*. CP-SAR can minimize the compilation phase shift through the ionosphere, thereby increasing the quality of the image image produced. The CP-SAR system will be used on the *JX-1 Unmanned Aerial Vehicle (UAV)* as a land test.

In this study a helix antenna was designed for CP-SAR onboard UAV by using axial mode to produce unidirectional radiation pattern, the *Right Hand Circular Polarized polarized Circular Right Hand (RHCP)* on the axis of the union. The rationing technique used is *pheriperal* technique. For impedance matching techniques, use $\frac{1}{4}$ winding. Design and simulation process using antenna simulator software. The evaluation process uses copper cables with conductivity values of 5.7×10^7 mho / m. and has a thickness of 4 mm. The helix mode antenna produces 9.61 dB axial gain, 1.03 dB axial ratio, 1.46 VSWR, -14.97 dB return loss, unidirectional radiation pattern and 568 MHz bandwidth. 4 turns designed with a total antenna length of 29 cm and weighing 1.5 kg.

Keywords: Helix Antenna, Circular Polarization, CP-SAR, RHCP

1. Pendahuluan

Efek distorsi pada SAR dengan polarisasi linier dapat diatasi dengan menggunakan CP-SAR [2]. Teknologi CP-SAR menggunakan antena dengan karakteristik polarisasi sirkular (*axial ratio* ≤ 3 dB) dan bekerja dalam 2 mode yakni *Right Handed Circularly Polarized (RHCP)* dan *Left Handed Circularly*

Polarized (LHCP). Teknologi ini akan digunakan sebagai *payload* dari satelit. Sebelum penerapannya, dilakukan penelitian CP-SAR *onboard Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) sebagai *ground testing* dari CP-SAR *onboard* UAV [3].

Pada penelitian [4] telah dilakukan perancangan antena mikrostrip array untuk CP-SAR *onboard* UAV menggunakan desain *circular patch* dengan teknik *catuan proximity couple* dan memanfaatkan teknik DGS mendapatkan hasil dimensi antena yang terlalu besar dan masih belum optimal untuk diaplikasikan pada UAV [4]. Dan pada penelitian [5] melakukan desain antena helix dan loop pada frekuensi 2.4 GHz dan 430 MHz untuk perangkat ground station satelit nano menghasilkan antena helix mode aksial yang berpolarisasi sirkular dan berpolarisasi unidireksional dengan tipe catuan *axial* [5]. Pada penelitian ini akan mengganti jenis antena CP-SAR *onboard* UAV yang dirancang pada penelitian sebelumnya menjadi antena helix untuk membandingkan hasil dimensi antena tanpa merubah spesifikasi-spesifikasi yang telah ditentukan.

1. Dasar Teori

A. Radar

Radar merupakan suatu sistem gelombang elektromagnetik yang berguna untuk mendeteksi, mengukur jarak dan membuat map benda-benda seperti pesawat terbang, berbagai kendaraan bermotor dan informasi cuaca. Sistem radar terdiri dari transmitter, switch, receiver, dan perekam data. Dimana prinsip kerja radar yakni transmitter akan memancarkan gelombang elektromagnetik dengan frekuensi radio ke suatu objek pengamatan, lalu switch akan mengembalikan pulsa untuk antena dan mengumpulkan echo atau gelombang pantulan ke receiver. Gelombang yang diterima oleh receiver akan diubah dalam bentuk digital, dan data yang didapatkan akan di simpat dalam data recorder, dan Selanjutnya akan dikelola untuk menjadi suatu tampilan berupa informasi [6].

B. SAR

Synthetic Aperture Radar (SAR) adalah bentuk radar yang digunakan untuk membuat gambar dua atau tiga dimensi suatu objek. SAR menggunakan gerakan antena radar di atas wilayah target untuk memberikan resolusi spasial yang lebih baik daripada radar pemindaian balok konvensional. SAR biasanya dipasang pada platform yang bergerak, seperti pesawat terbang atau pesawat ruang angkasa, dan berawal dari bentuk lanjutan dari radar udara yang tampak samping (SLAR). Jarak yang ditempuh oleh perangkat SAR di atas target dalam waktu yang dibutuhkan agar pulsa radar kembali ke antena menciptakan lubang *Aperture* sintetis besar (ukuran antena). Biasanya, semakin besar *Aperture*, semakin tinggi resolusi gambarnya [8].

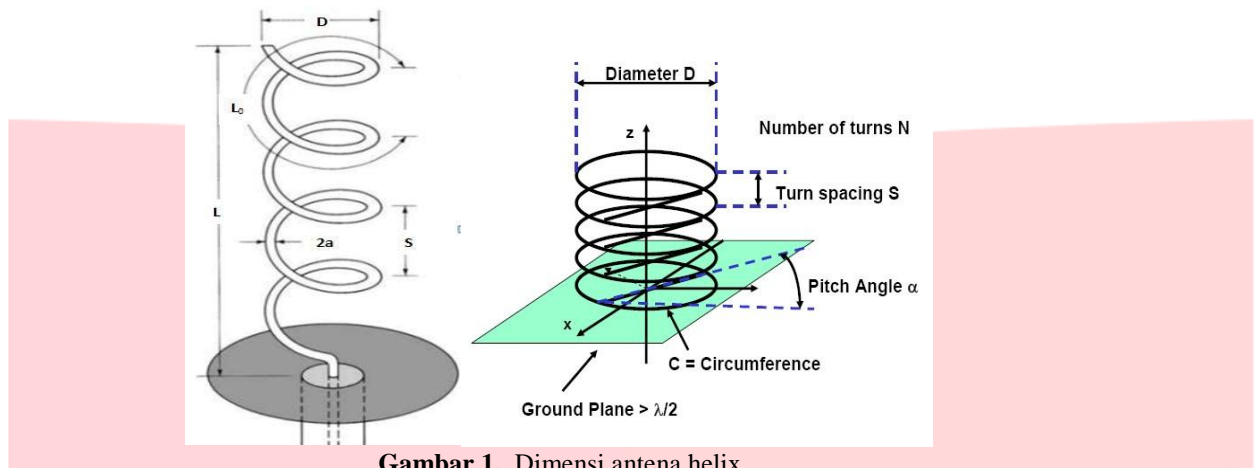
C. CP-SAR on board UAV (Unmanned Aerial Vehicle)

UAV (Unmanned Aerial Vehicle) umumnya dikenal sebagai drone yang merupakan pesawat tanpa awak yang dikendalikan dari jarak jauh (seperti dikendalikan oleh pilot di ground control stasiun). UAV juga dapat bergerak secara otomatis berdasarkan program yang sudah ditanamkan pada sistem komputernya. noise dan memiliki tingkat noise yang tinggi. UAV menggunakan teknologi SAR (Synthetic Aperture Radar) untuk melakukan pemantauan dan pemetaan suatu daerah.. Josaphat Tetuko Sri Sumantyo mengembangkan UAV bernama JX-1 menggunakan sistem CP-SAR sebagai teknologi penginderaan jarak jauh [3]. Sistem CP SAR sendiri nantinya akan sebagai platform satelit. Namun, sebelum langsung menerapkan ke platform satelit, maka dirancang CP SAR *onboard* UAV untuk *ground testing*. Blok sistem dari CP SAR *onboard* UAV pada dasarnya sama dengan platform MicroSatellite, hanya perbedaan dalam penyesuaian dalam bus-nya saja. Perbedaan yang paling mendasar adalah, ketinggian beroperasinya sistem CP SAR.

Pada dasarnya, perangkat keras sensor UAV CP-SAR terdiri dari subsistem pengirim (Tx), subsistem penerima (Rx) dan antena. Diagram blok umum perangkat keras sensor CP-SAR *onboard* UAV pada Gambar 2.5. Pada sisi *transmitter* terdapat *chirp generator*, *bandpass filter* (BPF), *mixer*, *osillator*, dan *high power amplifier* (HPA), *switch*. Pada sisi *receiver* terdiri dari *switch*, *low noise amplifier* (LNA), *bandpass filter* (BPF), *I/Q demodulator*, *analog/digital* (A/D) *converter*, memori temporer untuk memproses data selanjutnya pada bagian *onboard signal processing* (OSP) [10].

D. Antena Helix

Antena Helix atau Helical adalah suatu antena yang terdiri dari 'conducting wire' yang dililitkan dengan melingkari suatu diameter tertentu dan naik secara linier membentuk spiral [11]



Gambar 1. Dimensi antenna helix

Konfigurasi geometris dari antenna helix, diameter D , spasi antar lilitan S , dan jumlah lilitan N . Total panjang dari antenna helix adalah L yang didapat menggunakan persamaan

$$L = N \times S \quad (1)$$

untuk nilai diameter helix menggunakan persamaan

$$D = \frac{C}{\pi} \quad (2)$$

Setelah mendapatkan nilai diameter, bisa ditentukan nilai jarak antar lilitan

$$S = \pi \cdot D \tan \alpha \quad (3)$$

Dengan nilai jarak antar lilitan mempengaruhi panjang total helix dengan rumus

$$L = N \cdot S \quad (4)$$

E. Helix Mode Axial

Mode aksial terjadi jika: $3/4\lambda < C < 4/3\lambda$; $12^\circ \leq \alpha \leq 14^\circ$ dan $n \geq 3$. Antena heliks pada mode aksial yang bersifat unidireksional, biasanya digunakan untuk mencapai gain tinggi (lebar berkas sempit).

F. Nilai Impedansi Antena Helix

Dalam teknik feed antena heliks dapat dilakukan dengan dua cara, yaitu secara *axial* dan *peripheral*. Teknik pencatutan ini akan mempengaruhi besarnya nilai impedansi masukan dari antena heliks. Teknik pencatutan secara *axial* dilakukan pada bagian tengah sumbu heliks, sedangkan secara *peripheral*, pencatutan dilakukan pada tepi antena heliks. Formula untuk menghitung impedansi antena heliks dengan catutan aksial dengan toleransi 20% adalah :

$$Z = 140 \frac{C}{\lambda} (\Omega) \quad (5)$$

Persamaan lainnya diberikan oleh Baker dengan toleransi 10% untuk pencatutan *peripheral*, yaitu :

$$Z = \frac{150}{\sqrt{C\lambda}} \quad (6)$$

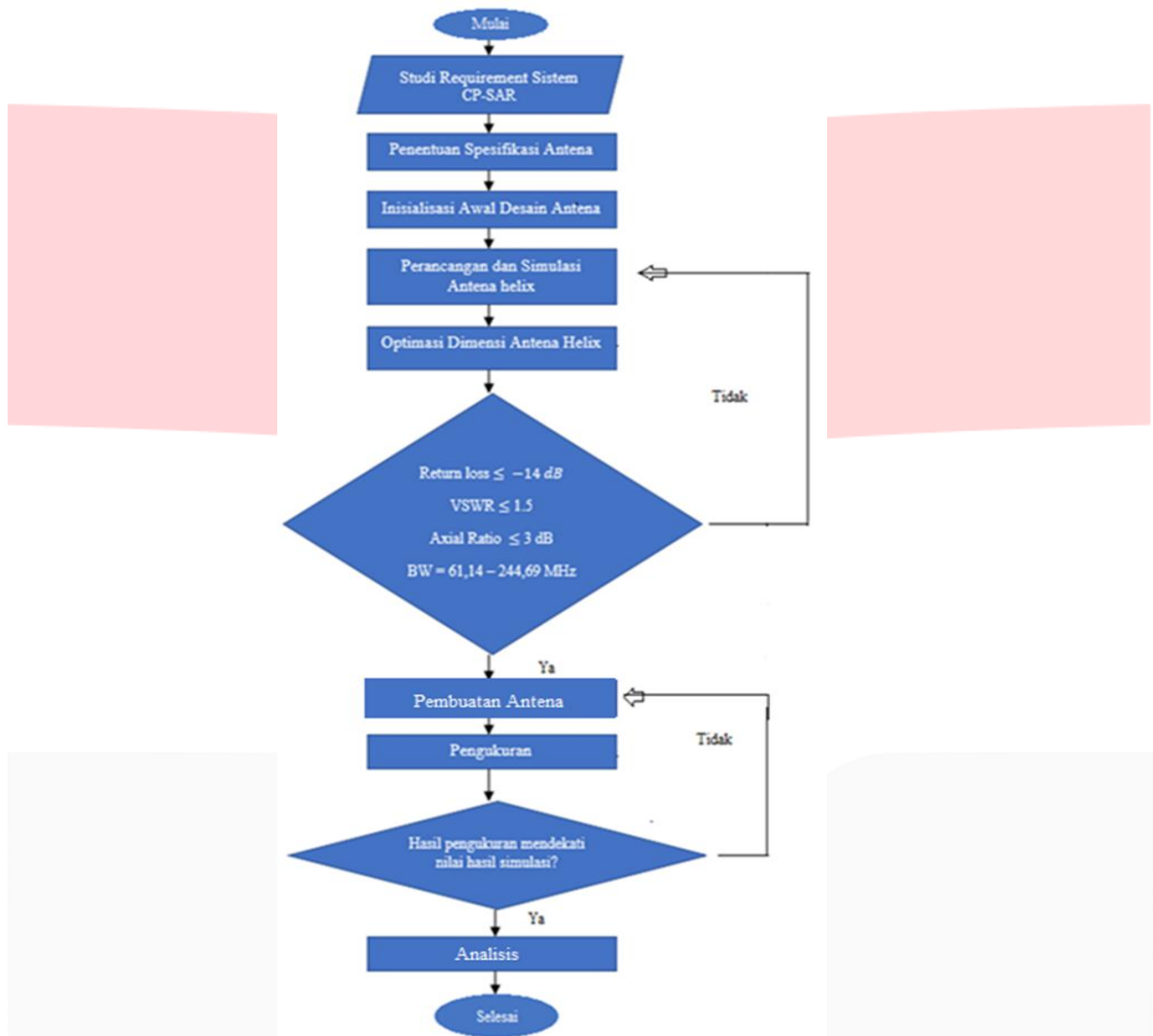
G. Penyepadanan Antena Helix

Supaya terjadi transfer daya seoptimal mungkin, maka impedansi antena heliks harus sama dengan impedansi saluran transmisi yaitu 50Ω . Sedangkan impedansi antena heliks adalah sekitar 150Ω . Untuk itu diperlukan suatu penyepadanan impedansi [15]. Untuk menyepadankan impedansi antena helix bisa dengan cara menambah $1/4$ lilitan saluran transmisi terakhirnya atau bisa disebut dengan metode empirik.

2. Perancangan Sistem

A. Flowchart

Pada pembuatan tugas akhir kali ini akan melalui beberapa tahap, agar memiliki alur penelitian yang jelas sehingga mempermudah proses pengerjaan tugas akhir. Tahapan-tahapan tersebut akan ditampilkan dalam bentuk diagram alir (*flowchart*), seperti pada gambar 2



Gambar 2. Flowchart Perancangan Antena

B. Penentuan Spesifikasi

Dalam perancangan antenna langkah pertama yang harus dilakukan adalah menentukan spesifikasi yang meliputi frekuensi kerja, Return loss, VSWR, Axial Ratio, Polarisasi, dan Polaradasi, adapun spesifikasi yang akan digunakan band pass filter yang akan dibuat pada tugas akhir kali ini sebagai berikut:

Tabel 1. Parameter Antena

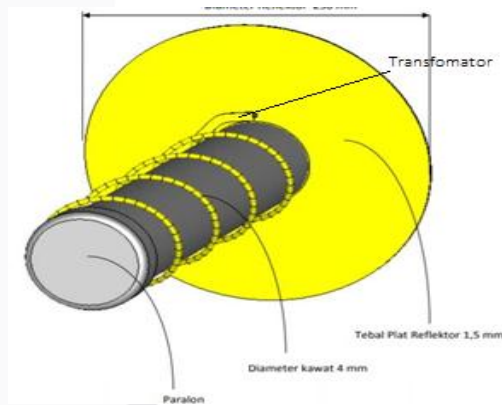
Parameter	Nilai
Frekuensi Kerja	1,27 GHz
Polarisasi	<i>Right Hand Circular Polarization (RHCP)</i>
<i>Axial Ratio</i>	≤ 3 dB
VSWR	$\leq 1,5$
<i>Return Loss</i>	≤ -14 dB
<i>Antena Gain</i>	14,32 dBic
<i>Bandwidth</i>	< 300 MHz
Pola radiasi	<i>Unidirectional</i>
Impedansi Sistem	50 Ω

C. Perancang dan Simulasi Antena

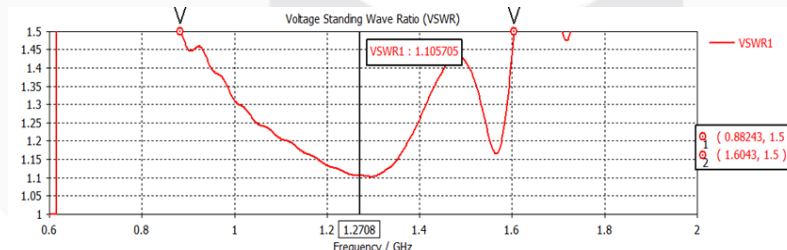
Berdasarkan rumus yang digunakan dalam merancang antena yaitu pada rumus 1-6 maka didapatkan hasil perancangan antena helix Berikut hasil perancangan.

Tabel 2. Parameter Simulasi Antena Helix

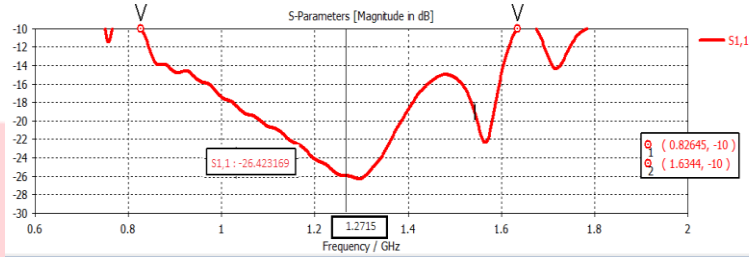
Parameter	Nilai
Frekuensi	1.27 GHz
Lamda (λ)	23.6 cm
Diameter (d)	8 cm
Circumference (C)	25.12 cm
Jarak antar lilitan (S)	5.9 cm
Pitch angle (α)	13.2°
Jumlah lilitan (N)	4
Panjang total helix	29 cm
Diameter <i>ground plan</i>	23 cm
Tebal <i>groundplan</i>	0.15 cm
Panjang transformator	5cm
Lebar transformator	0.7 cm
Tebal transformator	0.1 cm
Tebal kawat	0.4 cm
Tebal pipa PVC	0.27 cm



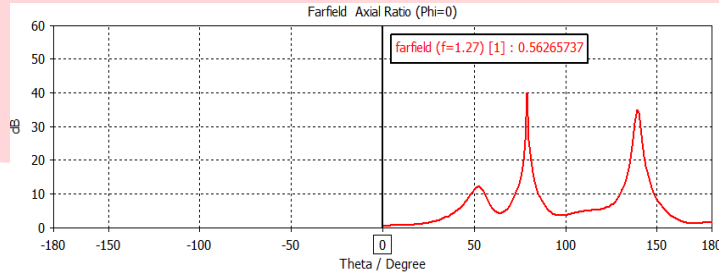
Gambar 3. Dimensi helix simulasi



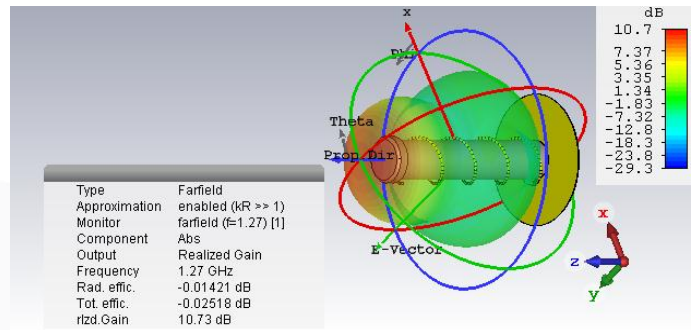
Gambar 4. VSWR



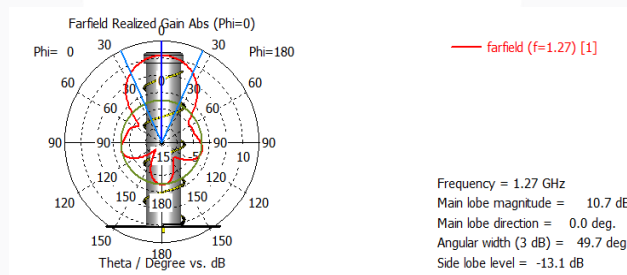
Gambar 5. Return Loss



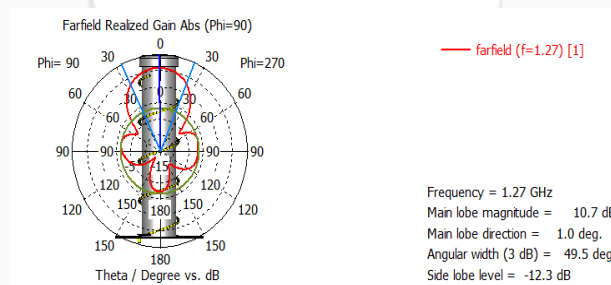
Gambar 6 Axial Ratio



Gambar 7 Polaradiasi



Gambar 8 Pola radiasi dan HPBW (azimuth)



Gambar 3.9 Pola radiasi dan HPBW (elevasi)

Tabel 3. Hasil Simulasi Antena Helix

Parameter	Nilai
Frekuensi kerja	1.27 GHz
Return Loss	-26.423 dB

VSWR	1.105
<i>Axial Ratio</i>	0.562 dB
Polarisasi	RHCP (<i>right hand circular polarization</i>)
<i>Gain</i>	10.73 dB
<i>Bandwidth</i>	722 MHz
Polaradiasi	Unidirectional

Berdasar tabel 3 hampir semua parameter sesuai dengan yang dibutuhkan. Tapi *gain* masih belum sesuai dengan spesifikasi. Teknik untuk meningkatkan gain pada antena helix adalah dengan menambah jumlah lilitan. Apabila jumlah lilitan ditambah maka akan menambah panjang dimensi helix itu sendiri dan membuat panjang helix tidak efektif untuk UAV itu sendiri.

D. Realisasi Antena

Setelah hasil optimasi mendapatkan nilai spesifikasi yang diinginkan kemudian dilakukan proses pabrikan, hasil dari proses tersebut ditunjukkan pada gambar 10,

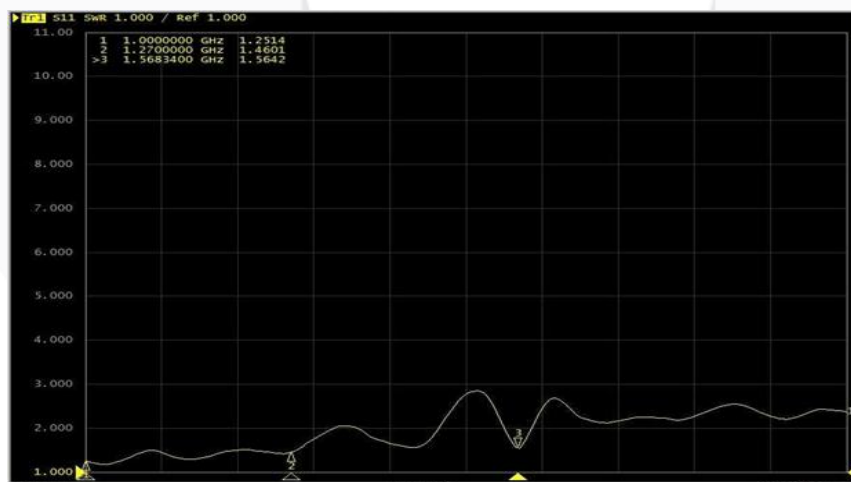


Gambar 10 Realisasi Antena Helix

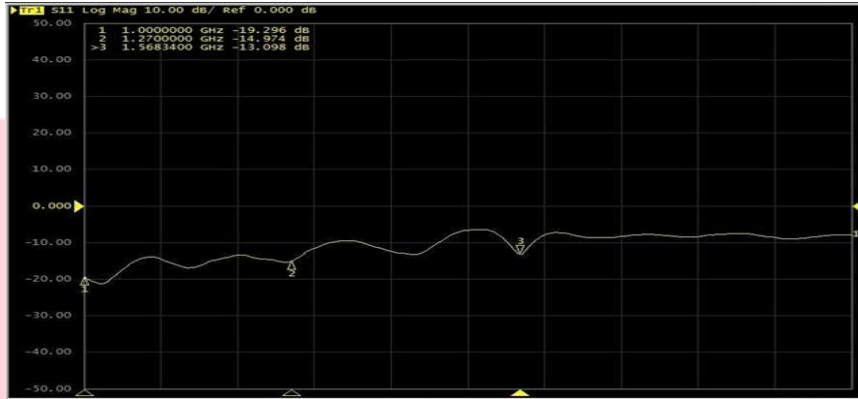
3. Pengukuran dan Analisa

A. Pengukuran Antena

Pengukuran yang dilakukan adalah pengukuran parameter hamburan (return loss, vswr, bandwidth) dan medan jauh. Pengukuran parameter hamburan menggunakan VNA KEYSIGHT E5063A 100 kHz – 18 GHz dan medan jauh menggunakan Signal Generator dan Spectrum Analyzer. Berikut hasil dari pengukuran parameter hamburan dan medan jauh

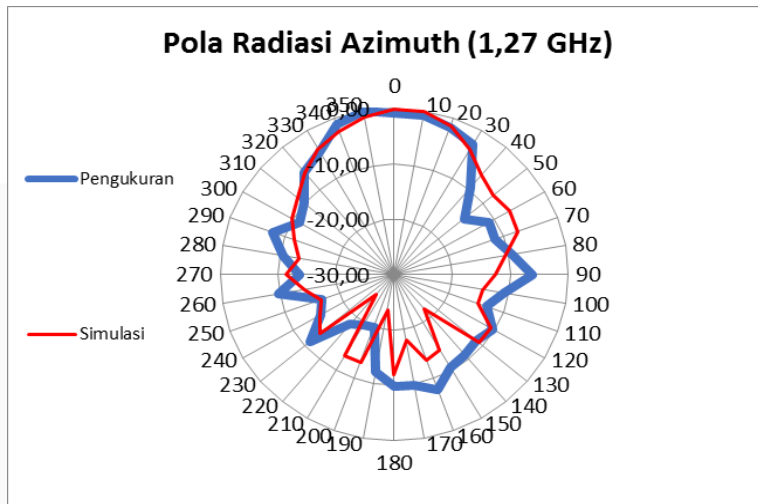


Gambar 11 Hasil Pengukuran VSWR dan Bandwidth

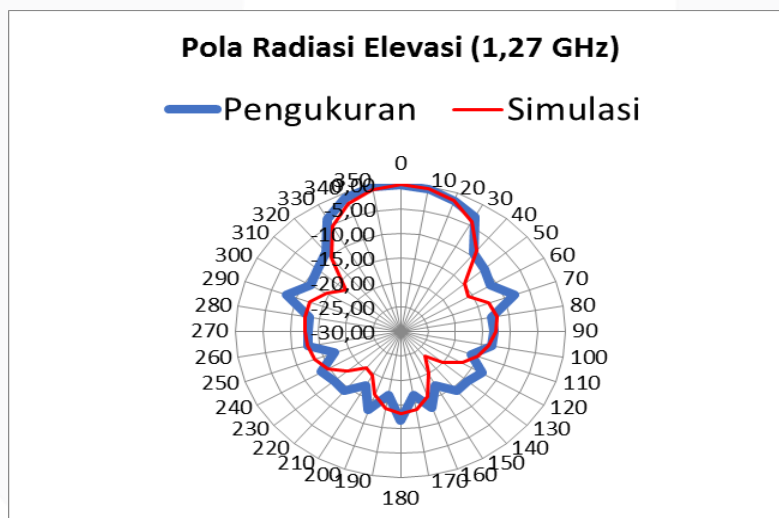


Gambar 12 Hasil Pengukuran Return Loss

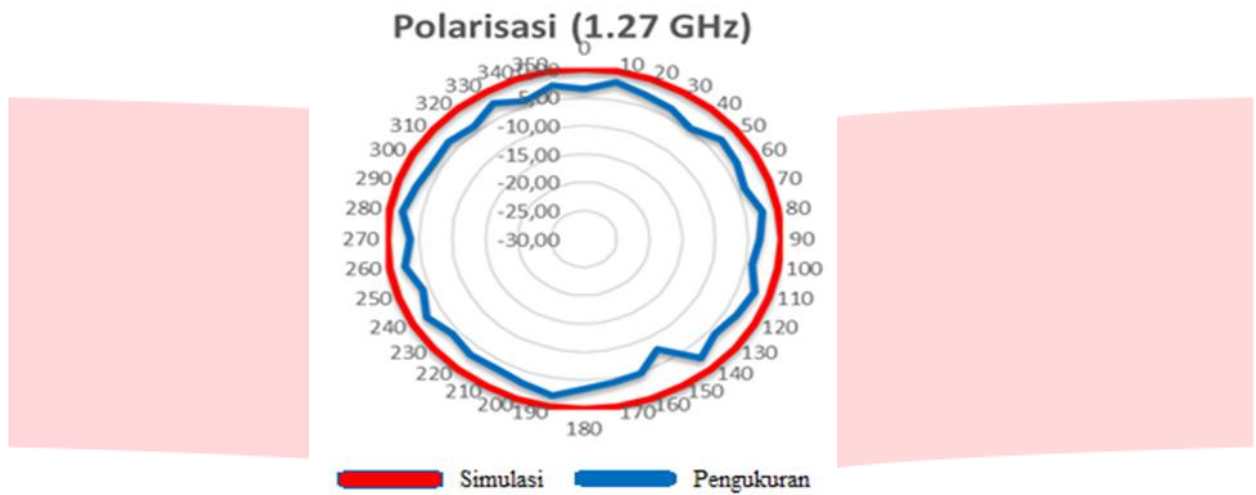
Pada gambar 11 dan gambar 12 mendapatkan hasil VSWR sebesar 1,4601 , returnloss sebesar -14,97 dB dan bandwidth sebesar 568 MHz.



Gambar 13 Pengukuran Polaradiasi (Azimuth)



Gambar 14 Pengukuran Polaradiasi (Elevasi)



Gambar 15 Pengukuran Polarisasi

Dari hasil pengukuran medan jauh di dapatkan polaradiasi berbentuk unidireksional, polarisasi sirkular dan medapatkan gain sebesar 9,64 dB.

B. Analisa hasil pengukuran

Tabel 4 Perbandingan Hasil Simulasi dan Pengukuran Realisasi

Parameter	Simulasi	Pengukuran
VSWR	1.105	1.4601
Return loss	-26.423 dB	-14,97 dB
Bandwidth	722 MHz	568 MHz
Gain	10.73 dB	9,64 dB
Axial Ratio	0.562 dB	1,03 dB
Polarisasi	Sirkular	Sirkular
Polarisasi	<i>Unidirectional</i>	<i>Unidirectional</i>

Parameter hamburan terdiri dari parameter VSWR, *return loss*, dan *bandwidth*. Nilai VSWR pada simulasi dan realisasi jauh berbeda, terjadi penurunan perfarmasi sebesar 32,72% dari hasil simulasi tetapi masih sesuai dengan spesifikasi yang diharapkan. Nilai *return loss* yang dihasilkan pada simulasi dan pengukuran jauh berbeda, terjadi penurunan perfarmansi 43 % dari hasil simulasi namun masih sesuai dengan spesifikasi yang diinginkan . Pengukuran VSWR dan *return loss* yang dihasilkan lebih buruk dibandingkan pada saat simulasi. Karena VSWR dan *return loss* dapat dikatakan semakin baik jika nilai yang dimiliki semakin kecil, dimana $1 \leq VSWR \leq \infty$ dan $-\infty \leq return\ loss \leq 0$. Meski hasil VSWR dan *return loss* jauh berbeda dari hasil simulasi , tapi nilai bandwidth hanya mengalami penurunan perfarmansi hanya 21.3 %. Perbedaan hasil pengukuran dan simulasi untuk parameter hamburan disebabkan kondisi perangkat pengukuran dan lingkungan saat pengukuran tidak memiliki kondisi yang sama dengan simulasi. Selain itu fabrikasi yang tidak ideal juga merupakan faktor penyebab terjadinya perbedaan hasil pengukuran dan simulasi.

Untuk pengukuran medan jauh yang terdiri dari *gain*, polarisasi dan pola radiasi memiliki hasil yang berbeda dengan simulasi. Pengukuran dari parameter *gain* terjadi penurunan berkisar 36,84% dari hasil simulasi. Pengukuran *axial ratio* terjadi kenaikan berkisar 50% dari hasil simulasi. Nilai *axial ratio* merepresentasikan jenis polarisasi yang dihasilkan. Hasil pengukuran dan simulasi menunjukkan *axial ratio* yang masih dalam rentang toleransi polarisasi sirkular. Pengukuran pola radiasi yang dihasilkan terdapat pada Gambar 4.6 dan 4.7, menunjukan pola yang hampir sama. Hasil simulasi pola radiasi yang dihasilkan *unidirectional* dan hasil pengukuran menunjukkan pola radiasi *unidirectional*. Perbedaan hasil pengukuran

medan jauh pada penelitian ini disebabkan pengukuran tidak dilakukan di lingkungan yang ideal atau pada ruangan *anechoic chamber*. Sehingga pada saat pengukuran, banyak gelombang yang terpantul dan mengurangi level daya yang diterima dan adanya *loss* kabel pada sisi antena *transmitter* dan *receiver*. Kesalahan pembacaan level daya yang mungkin terjadi akibat fluktuasi daya terima yang terukur pada *spectrum analyzer*. Selain itu fabrikasi yang tidak ideal juga merupakan faktor penyebab terjadinya perbedaan hasil pengukuran dan simulasi.

4. Kesimpulan

Kesimpulan yang bisa diambil dalam seluruh proses penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Parameter hamburan yang terdiri dari VSWR, *return loss*, dan *bandwidth* pada telah memenuhi spesifikasi antena sebagai sensor CP-SAR *onboard* UAV pada frekuensi 1,27 GHz.
2. Antena helix mode axial sangat baik menghasilkan polarisasi *unidirectional*
3. Polarisasi yang dihasilkan oleh antena memenuhi spesifikasi antena sebagai sensor CP-SAR *onboard* UAV pada frekuensi 1,27 GHz.
4. Dimensi antena telah mencapai dimensi maksimum pada *bus*, sehingga simulasi yang dihasilkan menunjukkan nilai *gain* sebesar 10.73 dBic .
5. Massa antena belum optimal untuk diterapkan menjadi satu kesatuan sistem CPSAR *onboard* UAV.
6. *Gain* yang dihasilkan pada hasil simulasi yakni 10.73 dBic ataupun pada saat pengukuran yakni senilai 9,61 dBic belum memenuhi spesifikasi CP-SAR *onboard* UAV dengan nilai *gain* 14,32 dBic.
7. Hasil pengukuran parameter luar atau medan jauh seperti pola radiasi dan cukup mendekati hasil simulasi,

Untuk mendapatkan performansi antena ini menjadi lebih baik, terdapat beberapa saran yang dapat dijadikan sebagai pertimbangan sebagai berikut:

1. Karena hasil simulasi tidak mencapai *gain* yang diinginkan, maka untuk meningkatkan *gain* tanpa menambah panjang antena perlu adanya kelanjutan untuk melakukan desain antena helix dengan array atau dengan teknik deployer
2. Pemilihan bahan untuk *ground plan* dapat dicoba dengan bahan yang lebih ringan agar berat antena bisa lebih ringan optimal untuk diterapkan pada system CP-SAR *onboard* UAV.
3. Menggunakan teknik fabrikasi yang lain untuk menggantikan PVC sebagai penyangganya agar tidak terlalu mempengaruhi epsilon bahan dari antena dan berat dari antena helix tersebut
4. Pengukuran parameter-parameter antena alangkah jauh lebih baik jika dilakukan pada ruangan *anechoic chamber* dan *masking* antena yang memadai untuk dimensi antena yang besar, sehingga hasil pengukuran tidak berbeda jauh dengan hasil simulasi.
5. Ketelitian fabrikasi lebih ditingkatkan untuk meminimalisir perbedaan antara hasil simulasi dan realisasi.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Moreira, Alberto; Prats-Iraola, Pau; Younis, Marwan; Krieger, Gerhard; Hajnsek, Irena; P. Papathanassiou, Konstantinos (2013). "A tutorial on synthetic Aperture radar". IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine
- [2] Y. H. Kuze dan T. S. J. Sumantyo, "Development of Circularly Polarized Microstrip Antennas for CP-SAR System Installed on Unmanned Aerial", Chiba University, 2012.
- [3] J. T. S. Sumantyo dan K. V. Chet, "Development of Synthetic Aperture Radar onboard Unmanned Aerial Vehicle," dalam Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR), 2013.
- [4] S. R. Alfitri, Wijanto, Heroe dan A. D. Prasetyo, "Antena Susunan Mikrostrip Untuk Sensor Circularly Polarized Synthetic Aperture Radar (CP-SAR) Onboard Unmanned Aerial Vehicle (UAV) , Bandung: Universitas Telkom, 2018.
- [5] M. H. Mahmudy, Setijadi, Eko dan Hendratoro, Gamantyo, "Desain Antena Helix Dan Loop Pada Frekuensi 2.4 GHz Dan 430 MHz Untuk Perangkat Ground Station Satelit Nano", Jurnal Teknik ITS , Vol. 1, No. 1, (Sept. 2012) ISSN: 2301-928X.
- [6] Y. Chan dan V. Koo, "An Introduction to Synthetic Aperture Radar," Progress In Electromagnetics Research, vol. 2, pp. 27-60, 2008.
- [7] Hasniah, Yudo Prasetyo, "Pengenalan Teknologi Radar untuk Pemetaan Spasial di Kawasan Tropis". Vol. 32 No.2 Tahun 2011, ISSN 0852-1697.

- [8] G. W. Stimson, "Introduction to Airborne RADAR", Chapter 1 (13 pp).
- [9] E. J. Rignot, "Effect of Faraday Rotation on L-Band Interferometric," *IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing*, vol. 38, p. 383, 2000.
- [10] J. T. S. Sumantyo, "Development of Circularly Polarized Synthetic Aperture Radar (CP-SAR) Onboard Small Satellite", dalam *PIERS Proceedings*, Marrakesh, 2011.
- [11] Alaydrus, Mudrik, "Antena Prinsip dan Aplikasi", Jakarta, Indonesia, 2011.
- [12] Antonius, Irianto, Betty, Savitri, Busono, Soerowirdjo. "Perancangan antena helix untuk frekuensi 2,4 Ghz". Universitas Gunadarma.
- [13] Marhefka, J.R., and Kraus, J.D. "Antennas For All Applications", 3rd edition, McGraw-Hill International. New York. 2002.
- [14] Balanis, C.A. "Antenna Theory : Analysis and Design". John Wiley and Sons., 1982.
- [15] R. O. Dewi, Wijanto, Heroe dan Soetamso, "Rekayasa Antena Heliks Berpolarisasi Linier 1250 - 2500 Mhz Berterminal 50 Ohm Unbalance Dengan Penetralan Kawat Persegi", Bandung: Universitas Telkom, 2010.
- [16] J. T. S. Sumantyo, "Progress On Development Of Synthetic Aperture Radar Onboard Uav And Microsatellite", Chiba University, 2012

