

PERANCANGAN ANTENA *SKEW-PLANAR* UNTUK KOMUNIKASI *UNMANNED AERIAL VEHICLE* FREKUENSI 2,4 GHz

Ardhian Ainul Yaqin^{*)}, Imam Santoso, and Teguh Prakoso

Departemen Teknik Elektro, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Sudharto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang 50275, Indonesia

^{*)}E-mail: ardhianainul@gmail.com

Abstrak

Komunikasi antara ground station controller dan pesawat Unmanned aerial vehicle (UAV) dapat terganggu saat antenna pemancar tidak mengarah dengan posisi yang tepat terhadap sudut terbang pesawat dengan adanya pointing error loss dan saat pesawat bermanuver menggunakan antenna berpolarisasi linear dengan adanya polarization mismatch. Berdasarkan permasalahan tersebut, pada penelitian ini dirancang antenna skew-planar yang bekerja pada frekuensi 2,4 GHz yang memiliki polarisasi omnidirectional dan polarisasi sirkular. Studi parameter dilakukan untuk mendapatkan desain antenna yang optimal berdasarkan hasil simulasi menggunakan CST microwave studio 2015 dan diketahui bahwa parameter yang paling berpengaruh terhadap nilai S_{11} , VSWR dan gain adalah panjang kabel koaksial dan kemiringan elemen antenna. Perkiraan jarak sistem komunikasi menggunakan antenna desain optimal adalah sejauh 1,66 km pada sudut 90° . Hasil pengukuran antenna skew-planar desain optimal : VSWR 1:1,05 dan S_{11} -31,6 dB pada frekuensi 2,44 GHz, bandwidth 640 MHz dengan $S_{11} \leq -10$ dB, gain linear 1,9 dBil dan gain sirkular 4 dBic, polarisasi elips pada sudut $\phi 0^\circ$ theta 90° dengan axial ratio 1,9 dan polarisasi omnidirectional. Pengujian secara line-of-sight pada jarak 810 meter menunjukkan antenna skew-planar dapat bekerja dengan baik pada semua sudut pengujian, Pengujian tanpa line-of-sight menunjukkan antenna skew-planar dapat bekerja sampai dengan radius 454 meter.

Kata Kunci : UAV, antenna skew-planar, polarisasi sirkular, Omnidirectional.

Abstract

When transmitter antenna does not face correctly to flight angle of Unmanned aerial vehicle (UAV) plane and revolving UAV plane use linear antenna, pointing error and mismatch polarization between ground station controller and UAV's plane will be occurred and affect to communication reliability due to interference and 2,4 GHz skew-planar antenna with omnidirectional radiation pattern and circular polarization meet the requirements that UAV's need. Parametric studies were used to obtain optimum design of antenna based on simulation result using CST microwave studio 2015 and the result found the most affected parameter against the value of S_{11} , VSWR and gain are coaxial cable length and antenna element tilt angle. Estimation of communication coverage using antenna with optimum design were 1,66 km on 90° antenna angle. The measurement's result of skew-planar antenna optimum design were VSWR 1:1,05 and S_{11} -31,6 dB on 2,44 GHz, bandwidth 640 MHz with $S_{11} \leq -10$ dB, linear gain 1,9 dBil and circular gain 4 dBic, elliptical polarization on $\phi 0^\circ$ theta 90° with axial ratio 1,9 and omnidirectional radiation pattern. Line-of-sight test with 810 meters distance have shown skew-planar antenna was worked well for every test angle. Non-line-of-sight antenna test have shown skew-planar antenna worked as far as 454 meters.

Keywords : UAV, Skew-planar antenna, circular polarization, omnidirectional

1. Pendahuluan

Unmanned aerial vehicle (UAV) atau pesawat tanpa awak mengalami perkembangan yang pesat dan merupakan salah satu segmen yang paling dinamis dalam perkembangan industri penerbangan. Permasalahan dalam perancangan baik dalam system, model ataupun system

transmisi mulai muncul seiring dengan meluasnya lingkup penggunaan dan fungsi dari UAV[1]. Antena yang digunakan pada perangkat pengendali jarak jauh pesawat UAV harus mampu menjaga komunikasi tetap terhubung pada sudut-sudut manuver pesawat UAV. Berdasarkan hal tersebut, maka pada sisi pengendali jarak jauh digunakan antenna dengan pola radiasi *omnidirectional* seperti polarisasi pada antenna *dipole* dan polarisasi

sirkular seperti polarisasi pada antenna *helix*. Keuntungannya adalah antenna dapat menerima sinyal dengan polarisasi sirkular maupun polarisasi linear baik secara vertikal ataupun horisontal dengan pancaran daya yang sama besar kesegala arah horisontal pada sudut vertikal tertentu. Terutama untuk mengurangi interferensi yang disebabkan oleh *pointing error loss* dan *mismatch polarization*.

Ada beberapa antenna yang digunakan pada UAV seperti antenna *dipole*, antenna *skew-planar*, antenna *Cloverleaf* dan antenna *patch*. Antenna *skew-planar* yaitu antenna dengan 4 daun antenna yang terpisah 90 derajat. Antenna *skew-planar* memiliki polarisasi sirkular dan pola radiasi *omnidirectional* [2]. Desain antenna ini juga dikenal dalam prinsip dasar dan konstruksi sebagai antenna *big wheel* [3], antenna *skew-planar* dideskripsikan sebagai antenna *big wheel* yang memiliki 4 elemen antenna yang dimiringkan dengan sudut kemiringan sebesar 45 derajat dengan tujuan untuk menghasilkan polarisasi sirkular[4].

Pada penelitian sebelumnya, antenna dengan konsep *skew-planar* atau yang disebut juga antenna *cloverleaf* digunakan dalam berbagai bidang baik dalam bentuk mikrostrip seperti antenna *cloverleaf* untuk pengukuran CHIME (Canadian Hydrogen Intensity Mapping Experiment) pada pita frekuensi 400-800 MHz [5] dan bentuk antenna kawat seperti antenna *Clover-leaf* yang digunakan sebagai Pemancar F.M [6]. Antenna *clover-leaf* juga dapat dirancang untuk penggunaan pada frekuensi THz seperti desain antenna *clover-leaf* untuk antenna coupled bolometer pengukuran temperatur ruangan pada band 0,5 -1,5 THz [7] dan Antenna *clover-leaf* untuk photomixer pada band 0,1-10 THz [8].

2. Metode

Perancangan antenna *skew-planar* dilakukan dalam beberapa tahap yaitu : menentukan spesifikasi antenna, menentukan desain antenna, optimalisasi desain antenna menggunakan studi parameter antenna dan fabrikasi desain antenna.

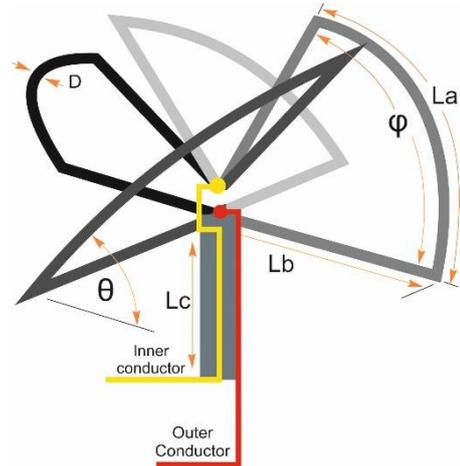
2.1. Spesifikasi antenna

Pada penelitian ini dirancang antenna yang digunakan untuk keperluan pengendali jarak jauh pesawat UAV. Antenna yang dirancang adalah antenna *skew-planar* yang bekerja pada frekuensi 2,402 GHz - 2,483 GHz dengan nilai $S_{11} \leq -10\text{dB}$ yang memiliki pola radiasi *omnidirectional* dan polarisasi sirkular

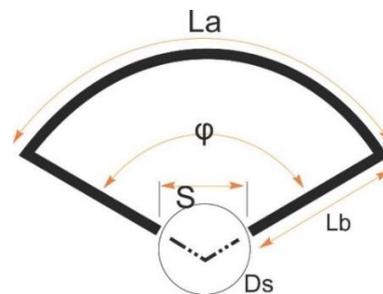
2.2. Desain antenna *skew-planar*

Antenna *skew-planar* terdiri dari 4 buah elemen antenna yang dimiringkan sebesar sudut " θ ". Salah satu sisi dari tiap elemen terhubung ke *inner conductor* dan sisi lain terhubung ke *outer conductor* dari kabel *coaxial*. L_a

adalah panjang lengkung kawat dari elemen antenna dan L_b adalah panjang kawat lurus dari elemen antenna. Kombinasi dari L_a dan L_b membentuk sudut elemen antenna " φ " dan L_c adalah panjang dari kabel koaksial, D adalah diameter dari ketebalan kawat tembaga. Panjang total dari elemen antenna yang sama besar dengan 1λ pada frekuensi kerja antenna



Gambar 1. Antenna Skew planar dengan 4 buah element yang terpisah sebesar 90°, dengan tiap element yang terhubung ke inner conductor dan outer conductor dari kabel coaxial



Gambar 2. Detail ukuran element antenna skew-planar dimana D_s adalah diameter outer conductor dari kabel coaxial

Panjang total dari element antenna (keliling element) yang sama besar dengan 1λ pada frekuensi kerja antenna diperoleh menggunakan persamaan 1(gambar 2) .

$$L_t = \lambda = 2L_b + L_a \quad (1)$$

Dengan L_t adalah panjang total keliling element antenna, L_b adalah panjang lengkung kawat dan L_a adalah panjang kawat lurus dari element antenna.

2.3. Studi parameter antenna

2.3.1. Desain awal antenna skew-planar

Desain awal antenna skew-planar memiliki dimensi antenna Panjang gelombang 125 mm, Ketebalan kawat 0.8 mm Sudut elemen antenna 108.307°, Sudut kemiringan elemen 45°, Panjang kabel 60 mm.

Hasil simulasi antenna skew-planar desain awal pada frekuensi resonansi 2,412 GHz adalah S_{11} -13,6 dB dan VSWR 1:1,52, Bandwidth 290 MHz dengan $VSWR \leq 2$, gain linier -1,1 dBil, gain sirkular 1,15 dBic, Beamwidth (≥ -3 dB) 116,74°, polarisasi elips pada sudut phi 0° theta 90° axial ratio 1,87 dan polaradiasi omnidirectional.

2.3.2 Studi parameter antenna

Studi parameter antenna bertujuan untuk memperoleh hasil yang optimal dari sebuah desain antenna dengan membandingkan hasil-hasil simulasi dari pengubahan parameter dimensi antenna. Pada antenna skew-planar, dilakukan studi parameter pada sudut elemen antenna, sudut kemiringan elemen antenna, keliling elemen antenna, ketebalan kawat tembaga dan panjang kabel coaxial. Simulasi antenna menggunakan perangkat lunak CST microwave studio 2015 dengan menggunakan fitur parameter sweep.

Parameter keliling elemen antenna disimulasikan dengan panjang 120 mm sampai dengan 125 mm. parameter sudut elemen dengan sudut 100° sampai dengan 107°. Parameter panjang kabel koaksial dengan desain kabel RG-316/U dengan variasi panjang 30 mm sampai dengan 150 mm. Parameter kemiringan elemen antenna dari sudut 30° sampai dengan 65°. Parameter ketebalan kawat dengan ketebalan 0,1 mm sampai dengan 1,5 mm. Parameter

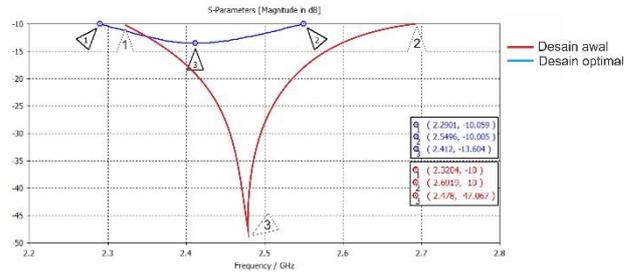
Hasil studi parameter menunjukkan bahwa parameter antenna yang memberikan dampak signifikan terhadap nilai VSWR, s_{11} dan gain dalam melakukan optimalisasi terhadap desain antenna skew-planar secara urut adalah panjang kabel koaksial, kemiringan elemen antenna, sudut elemen antenna, ketebalan kawat tembaga dan keliling elemen antenna.

2.3.3 Desain optimal antenna skew-planar

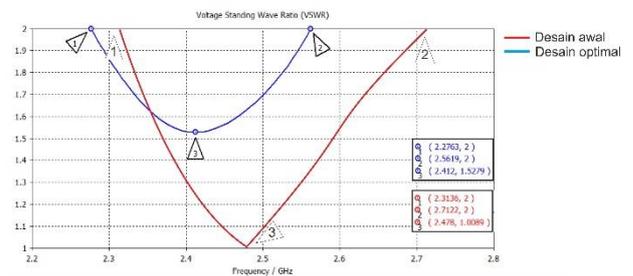
Berdasarkan hasil yang diperoleh dari studi parameter antenna, desain antenna optimal memiliki dimensi antenna dengan keliling elemen antenna 125 mm, sudut elemen antenna 103.36°, sudut kemiringan elemen antenna 55°, panjang kabel koaksial 100 mm dan diameter kawat tembaga 1 mm.

Hasil simulasi antenna skew-planar desain optimal pada frekuensi resonansi 2,478 GHz adalah S_{11} -47,06 dB dan VSWR 1:1,0089, bandwidth 470 MHz dengan $VSWR \leq 1,2$, Beamwidth (≥ -3 dB) 110,9°, gain linier 0,58 dBil, gain sirkuler 1,99 dBic, polarisasi elips pada sudut phi 0° theta 90° axial ratio 3,95 dan polaradiasi omnidirectional.

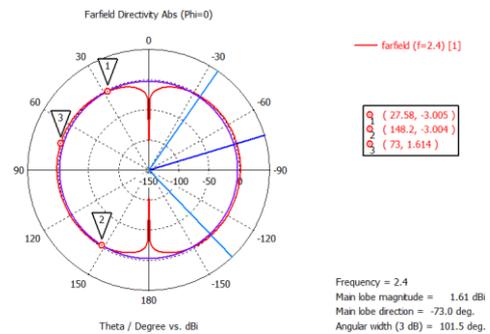
Perbandingan hasil simulasi antenna skew-planar desain awal dan desain optimal ditunjukkan pada gambar 3 sampai dengan gambar 6.



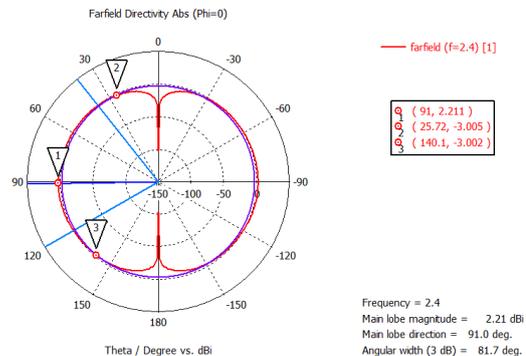
Gambar 3. Perbandingan hasil simulasi nilai s_{11} antenna skew-planar desain awal dan desain optimal



Gambar 4. Perbandingan hasil simulasi nilai VSWR antenna skew-planar desain awal dan desain optimal



Gambar 5. Hasil simulasi polaradiasi desain awal antenna skew-planar ($\phi=0$)



Gambar 6. Hasil simulasi polaradiasi desain optimal antenna skew-planar ($\phi=0$)

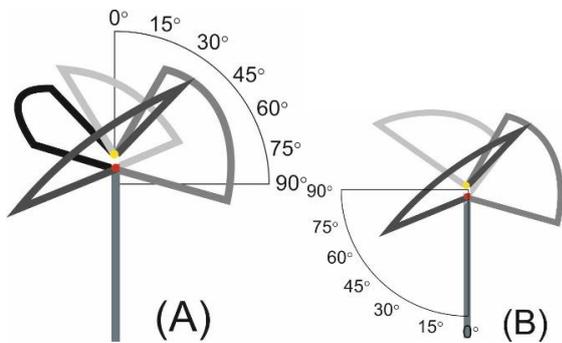
2.3.4 Evaluasi desain antenna

Evaluasi desain antenna dilakukan dengan menggunakan perhitungan link budget antenna pada sudut terbang pesawat UAV. Perhitungan link budget antenna memperkirakan jarak terjauh berdasarkan perhitungan jarak komunikasi terjauh antara antenna pada sisi pemancar (antenna skew-planar) menggunakan DJT Frysky 2,4 GHz Telemetry transmitter module dan antenna pada sisi penerima (antenna clover-leaf) dengan penerimaan sinyal terendah menggunakan D8R-II Plus pada frekuensi kerja 2,4GHz. Perhitungan ini merujuk pada evaluasi performansi dari sistem radiosonde sonde 403 MHz [9] dengan menggunakan persamaan 1 untuk menghitung EIRP dan persamaan 2 untuk menghitung FSL. Sudut antenna clover leaf dan skew-planar diilustrasikan pada gambar 7.

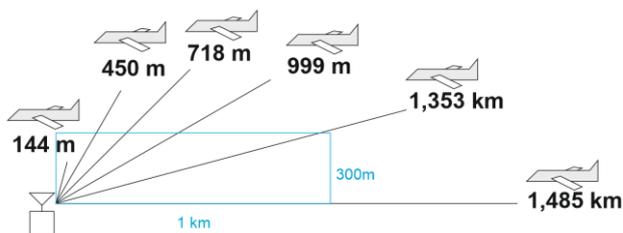
$$EIRP \text{ (dBm)} = P_{Tx} \text{ (dBm)} + G_{Tx} \text{ (dB)} - \text{losses (dB)} \quad (2)$$

$$FSL \text{ (dB)} = 32.4 + 20 \log f \text{ (MHz)} + 20 \log d \text{ (km)} \quad (3)$$

Dengan P_{Tx} adalah daya pemancar (dBm), G_{Tx} adalah penguatan (gain) pemancar (dB), f adalah Frekuensi yang digunakan (MHz) dan d adalah jarak komunikasi (km)

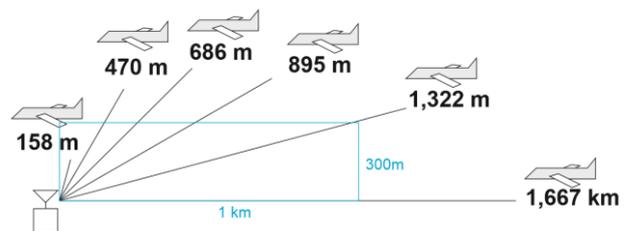


Gambar 7. Sudut elevasi antenna skew-planar (A) dan clover-leaf (B)



Gambar 8. Perkiraan jarak terbang pesawat UAV menggunakan antenna cloverleaf dan antenna skew-planar desain awal

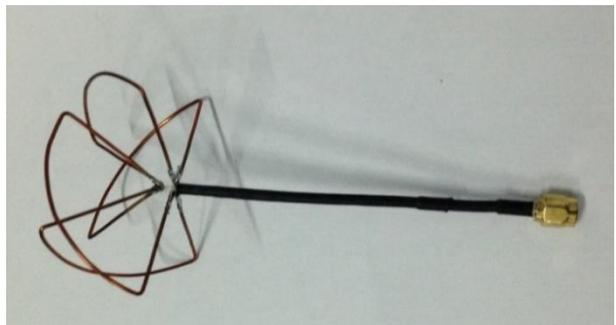
Jarak terjauh komunikasi modul pemancar dan penerima diilustrasikan pada gambar 8 dan gambar 9 berdasarkan perhitungan link-budget antenna. Perhitungan menggunakan antenna skew-planar desain optimal untuk power budget pemancar pada lampiran A tabel 1, power budget penerima pada lampiran A tabel 2 dan jarak terjauh komunikasi dengan ketersediaan sinyal 99,9% pada Lampiran A tabel 3.



Gambar 9. Perkiraan jarak terbang pesawat UAV menggunakan antenna cloverleaf dan antenna skew-planar desain optimal

2.3.5 Fabrikasi antenna skew-planar

Penelitian ini merancang 2 buah antenna skew-planar untuk membandingkan kinerja keduanya yaitu antenna skew-planar desain awal dan antenna skew-planar desain optimal. Perancangan antenna menggunakan port RP-SMA dengan kabel koaksial RG-316/U. Spesifikasi dan dimensi perancangan antenna skew-planar sesuai dengan spesifikasi pada simulasi antenna.



Gambar 10. Hasil Fabrikasi antenna skew-planar desain optimal

3. Hasil dan Analisis

Hasil dari penelitian antenna skew-planar berupa hasil pengukuran besaran antenna (VSWR, S_{11} , gain, polaradiasi

dan polarisasi) dan hasil pengujian jarak komunikasi antenna secara *line of sight* (LOS) dan tanpa LOS

3.1 Pengukuran besaran antenna

Parameter kinerja antenna yang diukur yaitu parameter S₁₁, VSWR, lebar pita, gain, pola radiasi, dan polarisasi antenna. Pengukuran antenna dilakukan terhadap 2 buah antenna *skew-planar* yaitu *skew-planar* desain awal dan *Skew-planar* desain optimal.

3.1.1 Pengukuran s₁₁

Pengukuran S₁₁ antenna menggunakan *Advantest R3770 Network Analyzer*

Tabel 1. Perbandingan hasil Pengukuran S₁₁ antenna *skew-planar* desain awal dan desain optimal

Antena	Nilai S ₁₁ Frekuensi Resonansi (dB)	Frekuensi Resonansi (GHz)	Frekuensi S ₁₁ ≤ -10dB (GHz)	S ₁₁ Frekuensi 2,44 GHz (dB)
Desain awal	-16,4	2,48	2,083-2,792	-16,024
Desain optimal	-41,9	2,49	2,103-2,751	-31,652

3.1.2 Pengukuran VSWR

Pengukuran VSWR dilakukan dengan menggunakan *Advantest R3770 Network Analyzer*.

Tabel 2. Perbandingan hasil pengukuran VSWR antenna *skew-planar*

Antena	VSWR Frekuensi Resonansi	Frekuensi Resonansi (GHz)	Frekuensi VSWR ≤ 2 (GHz)	VSWR pada Frekuensi 2,44 (GHz)
Desain awal	1:1,354	2,48	2,083-2,792	1:1,375
Desain optimal	1:1,016	2,49	2,103-2,751	1:1,059

3.1.3 Pengukuran lebar pita

Nilai *bandwidth* ditentukan pada rentang frekuensi yang memiliki nilai VSWR ≤ 1:2. Batas atas adalah nilai tertinggi dari daerah frekuensi yang memiliki VSWR ≤ 1:2, sedangkan batas bawah adalah nilai terendah dari daerah frekuensi yang memiliki VSWR ≤ 1:2.

Tabel 3. Hasil pengukuran lebar pita antenna *skew-planar*

Antena	Lebar Pita Frekuensi (MHz)	Frekuensi (GHz)
Desain awal	690	2,083-2,792
Desain optimal	640	2,103-2,751

3.1.4 Pengukuran gain

Metode untuk menentukan *gain* suatu antenna adalah metode perbandingan *gain* (*gain comparison method*). Metode ini membutuhkan sebuah antenna referensi dengan nilai *gain* diketahui menggunakan persamaan 4 dengan G_{ref} adalah *gain* antenna referensi (dB), P_U adalah daya yang diterima antenna uji (dBm) dan P_R adalah daya yang diterima antenna referensi (dBm).

$$G = G_{ref}(dB) + P_U(dBm) - P_R(dBm) \quad (4)$$

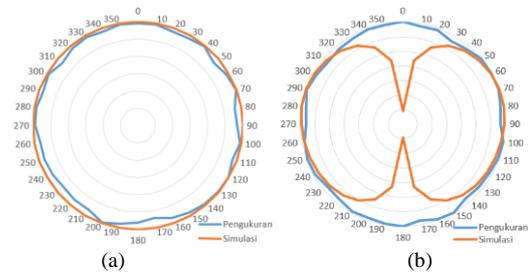
Hasil perhitungan mempunyai satuan dBil karena pengukuran *gain* antenna menggunakan antenna referensi dengan polarisasi linear sebagai pemancar. Jika pengukuran *gain* antenna dengan menggunakan antenna referensi polarisasi sirkular sebagai pemancar, maka hasil pengukuran mempunyai satuan dBic (*decible isotropic circular*) hasil pengukuran *gain* ditunjukkan pada tabel 4.

Tabel 4. Hasil pengukuran gain linear dan sirkular

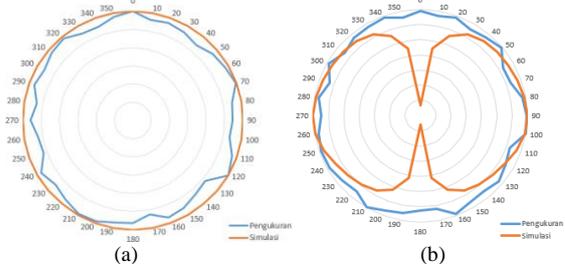
Antena	Gain simulasi		Gain Pengukuran	
	Linier (dBil)	Sirkular (dBic)	Linier (dBil)	Sirkular (dBic)
Desain awal	-1,1	1,151	1,69	3,099
Desain optimal	0,5878	1,993	1,94	4,015

3.1.5 Pengukuran pola radiasi

Pengukuran pola radiasi antenna *skew-planar* menggunakan alat ukur berupa sebuah pembangkit sinyal *Hewlett Packard 83590A* sebagai pemancar dan *spectrum analyzer Hewlett Packard 8593A* sebagai penerima.



Gambar 11. Pola radiasi antenna *skew-planar* desain awal (a) azimuth (b) elevasi



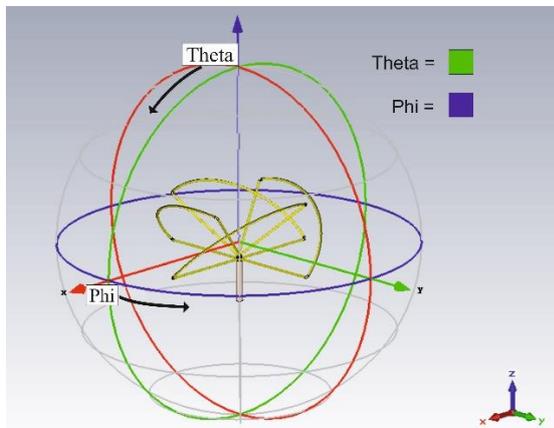
Gambar 12. Pola radiasi antenna *skew-planar* desain optimal (a) azimuth (b) elevasi

Perbedaan polaradiasi pengukuran dan simulasi disebabkan faktor fabrikasi antenna seperti pembuatan

antena yang dilakukan secara manual sehingga ukuran antenna kurang presisi dan teknik penyolderan yang memungkinkan penambahan panjang dimensi antenna.

3.1.6. Pengukuran polarisasi

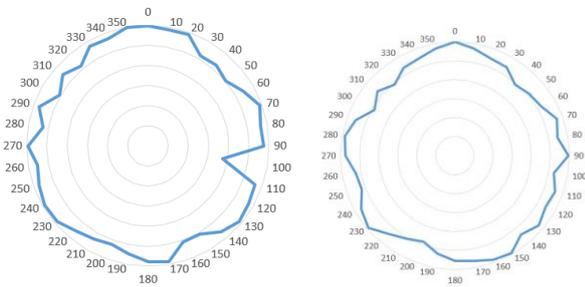
Pengukuran polarisasi antenna skew-planar menggunakan pengaturan antenna skew-planar berperan sebagai antenna penerima dengan antenna Horn berpolarisasi linier sebagai pemancar. Antenna diputar pada titik tengah antenna dengan sudut phi = 90° mulai dari sudut theta 0° hingga 350° dengan arah gelombang pemancar dari sumbu x dengan mengacu pada ilustrasi sudut antenna skew-planar pada gambar 13.



Gambar 13. Ilustrasi sudut antenna skew-planar

$$AR = \frac{E_{mayor}}{E_{minor}} = \frac{\sqrt{P_{watt\ mayor}}}{\sqrt{P_{watt\ minor}}} \quad (5)$$

Hasil pengukuran polarisasi antenna desain awal dan desain optimal adalah nilai axial ratio pada sudut phi 0° dan theta 90° dengan menggunakan persamaan 5 Dengan P_{watt mayor} adalah daya terbesar (mW) dan P_{watt minor} adalah daya terkecil (mW)



Gambar 14. Perbandingan polarisasi antenna skew-planar (a) desain awal (b) desain optimal

Tabel 5. Nilai axial ratio pada sudut phi 0° dan theta 90° antenna skew-planar

Antena	Axial Ratio
--------	-------------

	Simulasi	Pengukuran
Desain awal	1,87	3.54
Desain optimal	3,95	1.96

Nilai axial ratio pada tabel 4.21 menunjukkan bahwa polarisasi hasil pengukuran desain awal dan desain optimal bersifat elips yang hampir mendekati sirkular karena nilainya tidak terpaut jauh dengan nilai 1 yaitu dengan selisih 2,54 pada desain awal dan 0,96 pada desain optimal. Perbedaan polarisasi hasil pengukuran dan hasil simulasi disebabkan oleh faktor fabrikasi antenna seperti pembuatan antenna yang dilakukan secara manual sehingga ukuran antenna kurang presisi, polarisasi antenna yang tidak sepenuhnya sirkular dan teknik penyolderan yang memungkinkan penambahan panjang antenna

3.2 Evaluasi kinerja antenna

Tabel 6 menunjukkan antenna skew-planar desain optimal memiliki hasil nilai S₁₁, VSWR dan gain yang lebih baik dibandingkan dengan desain awal. walaupun desain optimal memiliki bandwidth yang lebih sempit dibandingkan desain awal, spesifikasi antenna yang dibutuhkan tetap terpenuhi. dengan hasil ini menunjukkan bahwa desain antenna skew-planar yang dioptimalisasi menggunakan studi parameter dimensi antenna memberikan hasil antenna yang lebih baik.

Tabel 6. Perbandingan hasil pengukuran dan spesifikasi antenna skew-planar

Besaran	Spesifikasi	Pengukuran	
		Desain awal	Desain optimal
Frekuensi resonansi	2,4 - 2,5 GHz	2,48 GHz	2,49 GHz
S ₁₁ *	≤ -10 dB	16,024 dB	31,652 dB
VSWR*	≤ 2	1,375	1,059
Gain Linier	≥ -3dB	1,69 dBil	1,94 dBil
Gain sirkular	≥ -3dB	3,099 dBic	4,015 dBic
Bandwidth	100 MHz	690 MHz	640 MHz
	2,4 - 2,5 GHz	2,08-2,79 GHz	2,10-2,75 GHz
Polaradiasi	Omnidirectional	Omnidirectional	Omnidirectional
Polarisasi	Sirkular	Elips	Elips

*) nilai pada 2,44 GHz

Pengujian antenna pada perangkat pesawat UAV dilakukan dengan menempatkan antenna skew-planar pada pengendali jarak jauh UAV Turnigy dengan modul FrSky DJT 2,4 GHz telemetry dan antenna clover-leaf ditempatkan pada pesawat UAV dengan modul FrSky D8R-II Plus Pengujian antenna pada UAV dilakukan di luar laboratorium secara line of sight (LOS) dan tanpa LOS.

Pengujian dilakukan dengan dan memutar pesawat pada sudut theta dengan phi 90° dan theta dengan phi 0° dengan hasil pengujian berupa kemampuan pesawat menggerakkan motor yang digunakan sebagai pengendali arah terbang pesawat. Sumbu X adalah arah gelombang datang pada sisi pesawat. Pengujian ini dilakukan tanpa

uji terbang pesawat. Sudut ϕ dan θ pada pesawat UAV ditunjukkan pada gambar 15.

Pengujian ini juga membandingkan performa antena monopole polarisasi linier pada sisi pemancar dan penerima pesawat UAV dengan antena *skew-planar* polarisasi sirkuler pada sisi pemancar pesawat UAV dan antena *clover-leaf* pada sisi penerima pesawat UAV

3.2.2 Pengujian tanpa LOS

Hasil pengujian berupa jarak terjauh pesawat dapat menggerakkan rotor pada sudut pengujian. Pengujian dilakukan 2 kali dengan lokasi yang berbeda. Pengujian pertama (pengujian 1) dilakukan di sepanjang jalan Rumah sakit nasional Diponegoro (RSND) sampai Fakultas Ekonomi dan Bisnis (FEB). Tabel 7 menunjukkan hasil pengujian pertama tanpa LOS. Pengujian kedua (pengujian 2) dilakukan di waduk pendidikan Universitas Diponegoro sampai sepanjang jalan menuju LPPU Universitas Diponegoro. Tabel 8 menunjukkan hasil pengujian 2 tanpa LOS.

Tabel 7. Hasil Pengujian 1 tanpa LOS

Antena	Sudut theta (Phi 0°)	jarak (m)	Sudut theta (Phi 90°)	Jarak (m)
Monopole	0°	331	0°	331
	45°	333	45°	321
	90°	338	90°	326
Skew-planar	0°	359	0°	359
	45°	354	45°	360
	90°	347	90°	359

Tabel 8. Hasil Pengujian 2 tanpa LOS

Antena	Sudut theta (Phi 0°)	jarak (m)	Sudut theta (Phi 90°)	Jarak (m)
Monopole	0°	394	0°	394
	45°	384	45°	394
	90°	371	90°	393
Skew-planar	0°	454	0°	454
	45°	436	45°	453
	90°	424	90°	454

Hasil dari pengujian LOS 1 dan 2 menunjukkan bahwa antena polarisasi sirkuler (*skew-planar* dan *clover-leaf*) memiliki jarak jangkauan yang lebih jauh dibanding antena monopole pesawat UAV. Hasil pengujian tidak sesuai dengan *link budget* jarak terjauh antena karena pada pengujian tanpa LOS terdapat banyak penghalang yang mengakibatkan efek *multipath* dan *shadowing* yang dapat mempengaruhi daya penerimaan sehingga dapat melemahkan sinyal.

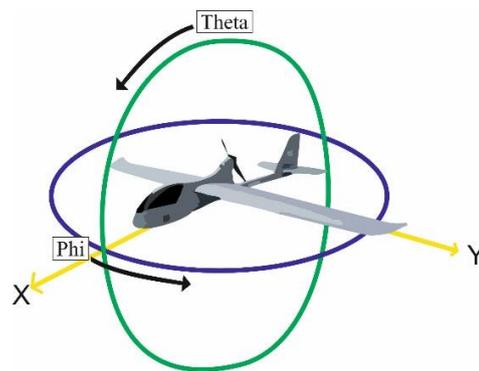
3.2.2 Pengujian tanpa LOS

Pengujian dengan LOS dilakukan pada dua tempat dengan jarak yang berbeda dengan pemancar dan

penerima berada pada keadaan LOS. Hasil pengujian berupa kemampuan pesawat menggerakkan rotor pada sudut pengujian. Pengujian dilakukan 2 kali dengan jarak yang berbeda.

Pengujian pertama (pengujian 1) dilakukan dengan lokasi pemancar berada di lantai 4 gedung B Fakultas Kedokteran Universitas Diponegoro dan lokasi penerima berada di lantai 3 gedung B Teknik Elektro Universitas Diponegoro Diponegoro. Jarak antara pengirim dan penerima pada pengujian pertama sejauh 589,79 m. Tabel 9 menunjukkan hasil pengujian pertama. Pengujian kedua (pengujian 2) dilakukan dengan lokasi pemancar berada di lantai 4 gedung B Fakultas Kedokteran Universitas Diponegoro dan penerima berada di lantai 6 gedung ICT Universitas Diponegoro. Jarak antara pengirim dan penerima pada pengujian kedua sejauh 810,38 m. tabel 10 menunjukkan hasil pengujian kedua.

Hasil pengujian 1 dengan LOS menunjukkan bahwa kedua antena masih dapat bekerja baik pada jarak LOS 589,42 m. antena *monopole* dapat bekerja saat antena pemancar pada posisi sama atau tegak lurus terhadap antena penerima. Hal ini menunjukkan antena tersebut tidak sepenuhnya linier dengan adanya komponen *cross polarization*. Hasil pengujian 2 dengan LOS menunjukkan bahwa antena dengan polarisasi sirkular (*skew-planar* dan *clover-leaf*) dapat bekerja dengan baik pada jarak LOS 810,38 m. Antena *monopole* tidak dapat bekerja dengan baik pada jarak LOS 810,38 m. Antena *monopole* tidak dapat terhubung pada sudut 90° (ϕ 90°) karena antena penerima dalam posisi tegak lurus terhadap antena pemancar (*cross polarization*) yang mengakibatkan pelemahan daya terima. Daya terima berkurang sampai dengan tak terhingga pada saat 2 antena polarisasi linear terhubung dalam keadaan saling tegak lurus[10].



Gambar 15. Ilustrasi sudut θ dan ϕ pada pesawat UAV

Tabel 9. Hasil Pengujian 1 LOS

Antena	Sudut theta (Phi 0°)	Terhubung	Sudut theta (Phi 90°)	Terhubung
Monopole	0°	v	0°	v
	45°	v	45°	v
	90°	v	90°	v

Skew-planar	0°	v	0°	v
	45°	v	45°	v
	90°	v	90°	v

Tabel 10. Hasil Pengujian 2 LOS

Antena	Sudut theta (Phi 0°)	Terhubung	Sudut theta (Phi 90°)	Terhubung
Monopole	0°	V*	0°	V*
	45°	V*	45°	-
	90°	-	90°	-
Skew-planar	0°	v	0°	v
	45°	v	45°	v
	90°	v	90°	v

*) keadaan daya terima sinyal lemah

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian ini, disimpulkan bahwa antenna *skew-planar* desain optimal secara keseluruhan

memiliki kinerja yang lebih baik dibandingkan dengan desain awal. Hasil studi parameter menunjukkan bahwa dalam melakukan optimalisasi terhadap desain antenna *skew-planar*, parameter antenna yang memberikan dampak signifikan terhadap nilai VSWR, s11 dan *gain* secara urut adalah panjang kabel, kemiringan elemen, sudut elemen, ketebalan kawat dan keliling elemen antenna. Hasil perkiraan jarak terjauh adalah 1,67 km pada sudut 90°, Hasil pengujian membuktikan antenna dapat beroperasi dengan baik pada semua sudut pengujian pada jarak *line of sight* 810,38 m dan non line of sight sejauh 454 m. Diharapkan penelitian selanjutnya dapat mengulas lebih dalam lagi tentang impedansi, rambatan medan elektro magnet dan material pembuatan antenna beserta pengaruhnya terhadap kinerja antenna *skew-planar*.

LAMPIRAN A

Link Budget

Tabel 1. Power Budget pada sistem pemancar menggunakan antenna *skew-planar* desain optimal

Elevasi	Tx Antena gain (dBic)	Faktor koreksi rugi-rugi (dB)	Tx output power (dBm)	EIRP (dBm)
0°	-103	3	17,78	-88,22
15°	-7,026	3	17,78	7,754
30°	-2,029	3	17,78	12,751
45°	-0,239	3	17,78	14,541
60°	0,388	3	17,78	15,168
75°	1,402	3	17,78	16,182
90°	2,206	3	17,78	16,986

Keterangan:

Tx = transmitter (pemancar)

Tabel 2. Power budget pada sistem penerima menggunakan antenna *clover leaf*

Elevasi	Rx gain Antena (dBic)	Pointing error loss (dB)	PLF (dB)	Gain Rx (dB)	Rugi kabel & penghubung (dBm)	Sensitivitas demodulator (dBm)	P _{RX} (dBm)
0°	-41,83	3	0	-44,83	0,18	-94	-93,82
15°	-8,593	3	0	-11,593	0,18	-94	-93,82
30°	-4,12	3	0	-7,12	0,18	-94	-93,82
45°	-2,62	3	0	-5,62	0,18	-94	-93,82
60°	-0,94	3	0	-3,94	0,18	-94	-93,82
75°	1,43	3	0	-1,57	0,18	-94	-93,82
90°	2,64	3	0	-0,36	0,18	-94	-93,82

Keterangan:

PLF = Polarization loss factor

P_{RX} = Daya yang dibutuhkan pada sistem penerima

Tabel 3. Jarak terjauh dengan ketersediaan sinyal 99,9% pada sistem penerima menggunakan antenna *skew-planar* desain optimal (Tx) dan antenna *cloverleaf* (Rx)

Elevasi	Frekuensi (MHz)	Total rugi maksimal	Large scale fading	Small scale fading	Free space loss	Jarak maksimal (km)
0°	2400	-39,23	0	6	-45,23	5,47×10 ⁻⁰⁸
15°	2400	89,981	0	6	83,981	0,158
30°	2400	99,451	0	6	93,451	0,47
45°	2400	102,741	0	6	96,741	0,686
60°	2400	105,048	0	6	99,048	0,895
75°	2400	108,432	0	6	102,432	1,322
90°	2400	110,446	0	6	104,446	1,667

Referensi

- [1]. Y. Rafael, *Guidance of Unmanned Aerial Vehicle*, CRC Press, New York, 2011.
- [2]. M. Leasure and M. S. Nolan, *Unmanned Aviation Systems: The Definitive Guide*. eAcademicBooks LLC, 2015.
- [3]. M. Robert. W1FBY, D. Tony W1YNC, H. Gerald W1NJM, Lewis McCoy W1ICP, Mc. Thomas W1SL, *Radio Amateur's Handbook, fifty-third edition*, The American Radio Relay League, Inc., p.328 Newington, 1976.
- [4]. ---, *A.R.R.L. Antenna Book 10th edition.*, The American Radio Relay League, 1964.
- [5]. M. Deng and D. Campbell-Wilson, "The cloverleaf antenna: A compact wide-bandwidth dual-polarization feed for CHIME," *Antenna Technology and Applied Electromagnetics (ANTEM), 2014 16th International Symposium on*, Victoria, BC, 2014, pp. 1-2.
- [6]. P. H. Smith, "Cloverleaf" Antenna for F.M. Broadcasting," in *Proceedings of the IRE*, vol. 35, no. 12, pp. 1556-1563, Dec. 1947
- [7]. T. Morf, B. Klein, M. Despont, U. Drechsler, L. Kull, D. Corcos, D. Elad, N. Kaminski, U. R. Pfeiffer, R. Al, H. M. Keller, M. Braendli, C. Menolfi, M. Kossel, P. Andrea, T. Toifl, and D. Plettemeier, "Wide bandwidth room-temperature THz imaging array based on antenna-coupled MOSFET bolometer," *Sensors Actuators A. Phys.*, 2014.
- [8]. T. K. Nguyen, I. Woo, H. Han, I. Park and H. Lim, "Four-leaf clover-shaped antenna on an extended hemispherical lens for a high-output-power THz photomixer," *35th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, Rome, 2010, pp. 1-2.
- [9]. Teguh Prakoso, Teguh Widiarsono, Sugihartono, Imam Idris, Ade Rukamana, "Design, Realization and performance evaluation of digital radiosonde system for 403 MHz band" *2006 International Joint Conference TSSA & WSSA*, Bandung, Dec 2006
- [10]. Christof Rohner, *Antenna Basics*, Rohde&Schwarz, 2006.