

PERANCANGAN DAN REALISASI ANTENA MIKROSTRIP ARRAY DENGAN PENCATUAN PROXIMITY FED DENGAN BERPOLARISASI SIRKULAR UNTUK S-BAND TRANSMITTER PADA SATELIT MIKRO

DESIGN AND REALIZATION OF MICROSTRIP ARRAY ANTENNA PROXIMITY FEED WITH CIRCULAR POLARIZATION FOR S-BAND TRANSMITTER IN MICRO SATELLITE

Alief Kusumaningtyas Krishnanti¹, Heroe Wijanto², Agus Dwi Prasetyo³

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

¹ aliefkusumaningtyas@telkomuniversity.ac.id , ² heroe@telkomuniversity.ac.id , ³ adprasetyo@telkomuniversity.ac.id.

Abstrak

Dalam perkembangan muatan *payload* dengan menggunakan teknologi dari SAR (*Synthetic Aperture Radar*) dengan penggunaan prinsip cara kerja radar sensor aktif dimana untuk mendapatkan informasi dari objek dibangkitkan dulu gelombang mikro, kemudian ditembakkan ke arah objek dan nantinya gelombang pantul terhambur ditangkap untuk dianalisa karakteristiknya. Pada proses kerjanya teknologi SAR tidak terpengaruh oleh keadaan cuaca seperti penggunaan kamera murni yang tergantung dengan sinar matahari saja.

Sistem satelit mikro dibutuhkan antena sebagai media transmisi untuk mengenali benda tersebut dan mengirimkan data image dengan jenis antena *s-band Transmitter* ke stasiun bumi . Oleh karena itu, desain antena yang memiliki polarisasi sirkular dipilih untuk mengatasi efek faraday yang akan menyebabkan terjadinya *polarization loss factor* (PLF).

Dalam Tugas Akhir ini dirancang sebuah antena mikrostrip array *proximity-fed* untuk menghasilkan polarisasi sirkular. Antena disimulasikan dengan bantuan *software* simulator antena dan direalisasikan digunakan untuk menggunakan bahan substrat *FR-4 Epoxy* dengan nilai ($\epsilon_r = 4,3$ dan $h = 1,6$ mm). Antena bekerja pada frekuensi $2,35$ GHz yang menghasilkan $VSWR = 1,062$, polarisasi sirkular ($AR = 1,58$ dB), $gain \geq 6$ dBic, pola radiasi unidireksional ($HPBW \geq 90,48^\circ$), dengan *effective bandwidth* $\approx 35,586$ MHz.

Kata Kunci : SAR, Satelit Mikro, S-Band Transmitter, Antena Mikrostrip Array, *proximity-fed*

Abstract

In the development of payload using technology from SAR (*Synthetic Aperture Radar*) which principle radar sensor Active where to get information from the object resurrected first Microwaves, then fired towards the object and later waves are reflected scattered arrested for analyzed characteristics , on SAR technologies the process works aren't be affected by weather circumstances like using pure camera sunshine but that depends on sunlight.

Micro satellite system as a transmission antenna Media needed to identify the object and transmit image data by the type is S-band antenna Transmitter Into Earth stations. Therefore, design circular polarization antenna has been chosen to overcome the faraday effect that will cause polarization loss factor (PLF). This final project a microstrip antenna array with proximity-fed for produces circular polarization.

antenna simulator software help and realized antenna is used the substrate material *FR-4 Epoxy* with value ($\epsilon_r = 4,3$ and $h = 1,6$ mm). work on frequency Antenna $2,35$ GHz $VSWR = 1,062$ Which , circular polarization ($AR = 1,58$ dB), $gain \geq 6$ dBi, unidirectional radiation pattern ($HPBW \geq 45,29^\circ$), *effective bandwidth* $\approx 35,58$ MHz.

Keywords: *Inter-Satellite Link (ISL), Microstrip Antenna, Micro-Satellite, Synthetic Aperture Radar (SAR), Triple Proximity-Fed.*

1. Pendahuluan

Dengan perkembangan dunia teknologi yang sangat pesat dalam memenuhi kebutuhan manusia yang semakin beragam dan hal tersebut juga memberikan dampak kepada perkembangan teknologi pada sistem komunikasi satelit. Kelebihan dalam penggunaan sistem komunikasi satelit setiap orang bisa berkomunikasi, tanpa mengenal jarak dan waktu, bahkan di tempat yang terpencil sekalipun tetap bisa berkomunikasi. Selain itu juga bisa dimanfaatkan dalam menjaga kedaulatan negara oleh negara-negara yang memiliki wilayah yang luas dan terdiri dari beberapa pulau seperti Indonesia. Universitas Telkom menjadi salah satu lembaga perguruan tinggi yang mendukung riset dalam teknologi komunikasi satelit khususnya SAR oleh beberapa dosen dan mahasiswa berasal dari berbagai laboratorium.

Dengan adanya teknologi dari SAR (*Synthetic Aperture Radar*) yang menggunakan prinsip cara kerja radar sensor aktif dimana untuk mendapatkan informasi dari objek, pada SAR harus dibangkitkan dulu gelombang mikro, kemudian ditembakkan ke arah objek dan nantinya gelombang pantul terhambur ditangkap untuk dianalisa karakteristiknya. Berbeda dengan penggunaan satelit berkamera murni yang memanfaatkan pantulan sinar matahari hanya terbatas pada saat ada sinar matahari saja. Oleh karena itu, SAR lebih efektif dalam penggunaannya dalam segala cuaca dalam aplikasinya. Untuk aplikasi dari SAR pada sektor pengelolaan sumber daya alam seperti pemanfaatan aliran sungai, pengamatan perubahan garis pantai. Selain itu juga pada sektor pertahanan sebagai pendukung pemantauan pada daerah perbatasan, pada daerah pasca bencana dan keperluan militer. Karakteristik dasar dari sensor SAR konvensional masih memiliki dimensi yang sangat besar, membutuhkan daya input yang tinggi, sensitif terhadap efek rotasi faraday yang disebabkan oleh tipe polarisasi linier terhadap atmosfer^[1].

Oleh karena itu, untuk mengatasi dari efek rotasi faraday dikembangkanlah *Circularly Polarized Synthetic Aperture Radar Onboard Microsatellite (μ SAT CP-SAR)*. μ SAT CP-SAR merupakan sensor aktif CP-SAR yang diaplikasikan di satelit mikro dengan berat kurang dari 100 kg^[2].

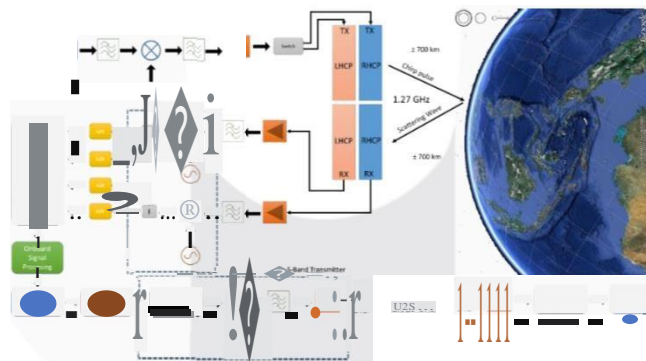
Pada satelit mikro yang memiliki misi dengan sistem payload SAR didalam blok diagram tersebut terdapat salah satu bagian penting yaitu antena *S-Band Transmitter*.

Dalam penelitian sebelumnya telah dikembangkan tentang antena array mikrostrip. Pada penelitian sebelumnya telah dibuat antena S-Band transmitter dengan polarisasi sirkular untuk SAR, namun kebutuhan gain tersebut belum mencapai target minimum. Maka pada penelitian ini didesain antena mikrostrip array dengan sirkular *truncatd edge corner* yang diharapkan dapat memenuhi parameter tersebut.

2. Teori

2.1 S-Band Transmitter

Pada bagian penerima tersusun atas dua panel antena susun mikrostrip yang berpolarisasi sirkular (LHCP dan RHCP), *low noise amplifier* (LNA), *band pass filter* (BPF), I/Q demodulator untuk menghasilkan *in-phase* dan *quadrature* data dari sinyal *chirp pulse* yang 13 diterima, *analog to digital converter* (ADC), *temporary memory* untuk proses data, unit *onboard signal processing* (OSP), data transmitter sistem. Didalam unit OSP, sinyal hasil pantulan akan diproses dalam beberapa tahap diantaranya, *range compression*, *corner turn*, *azimuth compression*, dan lain-lain untuk menghasilkan gambar SAR. Kemudian, gambar ini dikirim ke stasiun bumi menggunakan S-band transmitter untuk diproses lebih lanjut. sinyal-sinyal yang diterima oleh antena SAR dimana data tersebut diolah ke dalam modul-modul atau perangkat SAR. Kemudian dikirim melalui antena S-Band Transmitter ke stasiun bumi untuk diproses oleh perangkat *Software Defined Radio* (SDR).



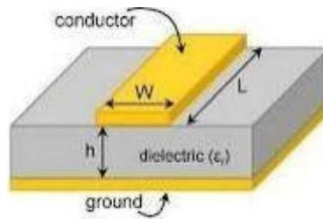
Gambar 2. Blok Diagram *Circular Polarization Synthetic Aperture Radar (CP SAR)*^{[1][2]}.

2.3 Synthetic Aperture Radar (SAR)

Merupakan teknik dimana menggunakan prinsip radar yang bergerak antara dua transmisi pulsa, dimana untuk meningkatkan resolusi gambar radar berkualitas tinggi dengan menggabungkan secara bertahap semua gema dan mensintesis antena *array* yang sangat cukup besar. Pada bulan Juni 1951, solusi virtual dalam meningkatkan resolusi gambar pada radar ditemukan oleh Carl Wiley melalui penjelasan dengan menggunakan analisis frekuensi Doppler dalam meningkatkan resolusi gambar radar menggunakan gerakan *platform* dan sinyal koherensi untuk merekonstruksi antena dengan *aperture* besar dengan perhitungan^[5]. Kelebihan dari sistem SAR yaitu dapat memproduksi citra beresolusi tinggi dari permukaan bumi dalam berbagai kondisi cuaca baik siang maupun malam. Posisi geometris yang berbeda dari elemen antena adalah hasil dari pergerakan *platform*.

2.2 Antena Mikrostrip

Merupakan antena yang terdiri atas 3 bilah bagian, yaitu patch pada salah satu sisi substrat dielektrik yang berfungsi sebagai peradiasi, substrat dielektrik yang memiliki tinggi (h) diantara $0,003\lambda_0 - 0,05\lambda_0$, dan groundplane dengan bahan konduktor sebagai pemantul sempurna^[7]. Dalam perancangannya diatur sedemikian rupa agar dimensi antena kecil agar cukup pada satelit mikro.

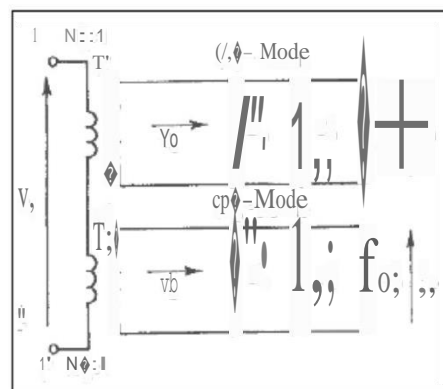


Gambar 3. Struktur Antena Mikrostrip^[7].

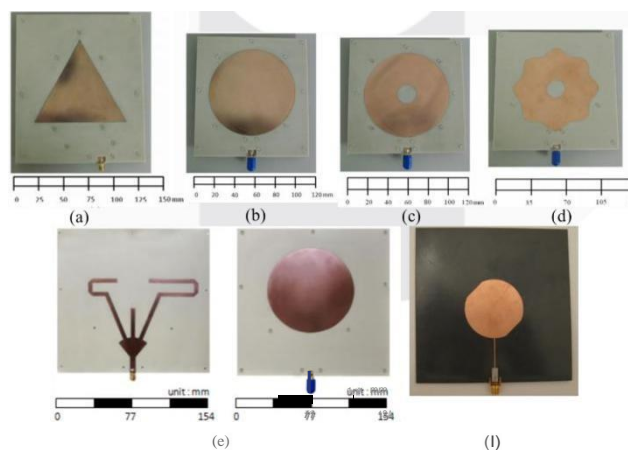
2.3.1 Antena Mikrostrip dengan Polarisasi Sirkular

Antena mikrostrip merupakan jenis antena yang sering digunakan untuk menghasilkan polarisasi sirkular. Beberapa bentuk *patch* antena mikrostrip yang dapat digunakan untuk membentuk polarisasi sirkular, di antaranya bentuk persegi, sirkular, pentagonal^[21], Segitiga Sama Sisi^[22], Elips^[23], *Elliptical Annual Ring*^[24], *Sine Wave Periphery*^[25], *Sirkular Triple-Fed*^[26], dan *Circular Truncated Corner*^[4].

Antena dengan *patch* tunggal dapat meradiasikan gelombang dengan polarisasi sirkular jika dua buah lokasi pada *patch* secara simultan mengeksitasi medan dengan amplitudo yang sama besar dan memiliki beda fasa sebesar $\pm 90^\circ$ antara keduanya dengan tanda "+" dan "-" sebagai penunjuk arah rotasinya.



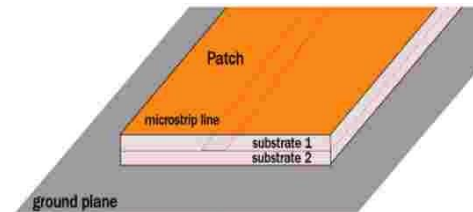
Gambar 4. Bentuk Rangkaian Ekuivalen Antena Mikrostrip dengan Perturbasi^[27].



Gambar 5. Macam-macam Model Antena Mikrostrip Polarisasi Sirkular (a) Segitiga Sama Sisi^[22] (b) Elips^[23] (c) *Elliptical Annual Ring*^[24] (d) *Sine Wave Periphery*^[25] (e) *Sirkular Triple-Fed*^[26] (f) *Circular Truncated Corner*^[4].

2.3.2 Pencatuan

Pada antenna mikrostrip memiliki elemen peradiasi pada salah satu sisi substrat dielektrik. Jenis-jenis teknik pencatuan diantaranya adalah *mikrostrip line*, *coaxial probe* pada *groundplane*. Kemudian dikembangkan sejumlah teknik pencatuan baru yaitu *coaxial feed*, *mikrostrip (coplanar) feed*, *proximity coupled*, *aperture-coupled feed* dan *coplanar wave guide feed*. Untuk *proximity coupled* merupakan salah satu jenis dari *non contacting non coplanar mikrostrip feed* ditunjukkan pada gambar teknik catuan dengan menggunakan substrat dua layar dengan *mikrostripline* pada bagian lapisan bawah dan *patch* pada lapisan paling atas. Kopling diantara *patch* dan mikrostrip memiliki sifat kapasitif. Kopling kapasitor secara seri digambarkan dengan resonan paralel R-L-C yang mewakili *patch*.



Gambar 6. Proximity Coupled Feeding.

3. Perancangan

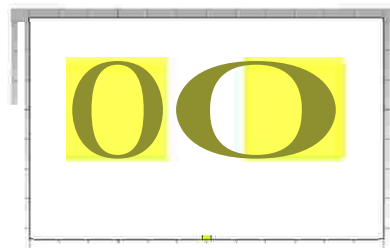
3.1 Spesifikasi Antena

Hasil perhitungan link budget dan referensi, serta mengacu dari kebutuhan sistem, maka spesifikasi antenna dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Frekuensi tengah : 2,35 GHz (S-Band)
2. Bandwidth : 32 MHz
3. Pola Radiasi : *Unidirectional*
4. Polarisasi : *Left Handed Circularly Polarized (LHCP)*
5. HPBW : 45.29° dengan arah mainlobe pada 0°
6. Gain : ≥ 6 dBi
7. Return Loss : ≤ 10 dB

3.2 Perancangan Mikrostrip

Untuk realisasi antenna, perancangan dilakukan pada simulator antenna. Hal ini bertujuan untuk mengetahui dimensi optimal pada antenna yang nantinya akan direalisasikan.



Gambar 7. Desain Antena

Tabel 1. Parameter Dimensi Antena Sebelum dan Setelah Optimasi.

Parameter	Definisi	Ukuran (mm)
d	jarak antar <i>patch</i>	60
r	jari-jari <i>patch</i>	16.7
tr	kedalaman perturbasi	1.72
lc	panjang catuan <i>patch</i>	21.25
wc	lebar catuan <i>patch</i> 50ohm	2.98
p12	panjang catuan 100 ohm	20
w11	lebar catuan 100 ohm	3
p13	panjang catuan 70 ohm	20
w12	lebar catuan 70 ohm	2
p14	panjang catuan Zt : 50 ohm	15
wc2	lebar catuan Zt : 50 ohm	5

3.3 Realisasi Antena

Untuk tahap selanjutnya antena yang telah dirancang dan disimulasikan dengan perangkat lunak bantu simulator antena, kemudian direalisasikan dengan menggunakan bahan yang sudah ditentukan sebelumnya yaitu substrat *Epoxy FR-4* di pabrik percetakan dengan menggunakan jasa percetakan *Printed Circuit Board (PCB)*.

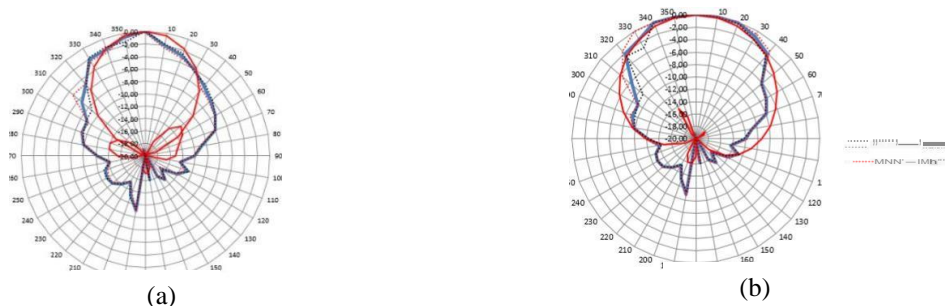
**Gambar 8. Realisasi Antena**

4. Pengukuran dan Analisis

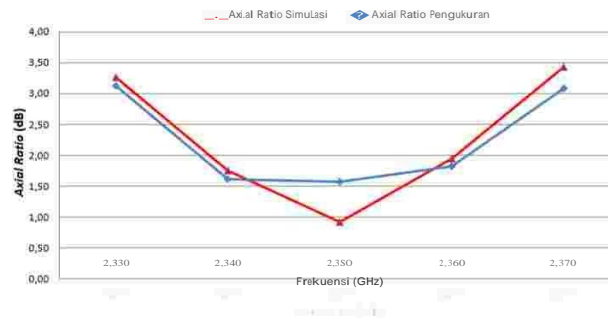
Setelah dilakukan proses realisasi, tahap selanjutnya yaitu verifikasi hasil pengukuran dengan kebutuhan spesifikasi. Pengukuran parameter antena dilakukan pada medan dekat dan medan jauh. Untuk pengukuran medan dekat digunakan alat *Network Analyzer* untuk melihat parameter *VSWR*, *return loss*, *bandwidth* dan *impedansi antena*. Sedangkan, untuk pengukuran medan jauh untuk pengukuran polaradiasi, polarisasi, dan *gain*. Dari hasil pengukuran, didapatkan hasil kurang sesuai dengan desain menggunakan simulator antena dimana frekuensi resonansi dari antena sedikit bergeser ke kiri. Tetapi pada frekuensi resonansi 2,35 GHz memiliki nilai *S11* sebesar -30,356 dB.

Tabel 2. Nilai Bandwidth Simulasi dan Pengukuran Return Loss.

Pengamatan	Simulasi	Realisasi
<i>Return Loss</i>	-29,89 dB	-23,85 dB
Bandwidth	242,58 MHz	231 MHz

**Gambar 9. Hasil Pengukuran Polaradiasi (a) Arah Azimuth, (b) Arah Elevasi.**

Dari data diatas disimpulkan bahwa pengukuran pola radiasi untuk azimuth dengan HPBW $\pm 40^\circ$ belum mendekati hasil simulasi sedangkan elevasi sebesar $\pm 80^\circ$. Perbedaan nilai penerimaan pada sudut-sudut tertentu diakibatkan oleh kondisi lingkungan yang kurang ideal pada saat pengukuran. Pada saat pengukuran azimuth didapatkan nilai variasi medan rata-rata sebesar 0,15 dB dan pada elevasi sebesar 0,28 dB.



Gambar 10. Grafik Perbandingan Axial Ratio simulasi dan pengukuran.

Dari hasil simulasi dan pengukuran terdapat perbedaan. Pada simulasi, titik terendah polarisasi sirkular berada pada frekuensi 2,35 GHz dengan nilai *axial ratio* sebesar 0,92360637 dB, sedangkan hasil pengukuran pada frekuensi 2.35 GHz, nilai *axial ratio* sebesar 1,58 dB. Dari rentang frekuensi yang diukur hanya frekuensi 2,37 GHz yang sudah tidak menunjukkan kesirkularan polarisasi. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa *bandwidth axial ratio* hasil pengukuran adalah 34 MHz yaitu dari 2,334-2,368 GHz. Hasil pengukuran sudah sesuai dengan parameter yang dibutuhkan.

Tabel 3. Gain Hasil Simulasi dan Pengukuran.

Frekuensi	Simulasi (dBic)	Pengukuran (dBic)
2,35 GHz	6,83	6,34

Tabel 4. Spesifikasi dan Hasil Pengukuran

Parameter	Spesifikasi	Pengukuran
Frekuensi Tengah	2,35 GHz	2,35 GHz
<i>Return Loss</i>	≤ -10 dB	-23,85 dB
VSWR	≤ 2	1,137
<i>Bandwidth Impedansi</i>	32 MHz	231 MHz
<i>Bandwidth Axial Ratio</i>	32 MHz	34 MHz
<i>Gain</i>	≥ 6 dBic	6,34 dBic
HPBW	$\geq 45^\circ$	40°

Dari hasil simulasi dan pengukuran terdapat perbedaan. Perbedaan yang terjadi disebabkan oleh kondisi lingkungan yang tidak ideal pada saat pengukuran sehingga pengukuran menjadi kurang akurat. Antena hasil simulasi dan realisasi telah diverifikasi memiliki gain 6,34 dBic, berbeda 0,49 dB dari hasil simulasi, tetapi sudah memenuhi gain spesifikasi yang dibutuhkan yaitu ≥ 6 dBi. Pada penelitian sebelumnya didapatkan gain pengukuran sebesar 5,268 dBi^[3].

5. Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari seluruh proses perancangan dan realisasi antenna mikrostrip dengan dari seluruh proses perancangan dan realisasi antenna mikrostrip berpolarisasi sirkular catuan *proximity coupled* dengan bentuk *patch* lingkaran dan persegi adalah sebagai berikut. *Bandwidth impedansi patch* lingkaran dari hasil simulasi sebesar 242,58 MHz sedangkan hasil pengukuran sebesar 231 MHz.. Untuk Gain simulasi yang didapatkan sebesar 6,83 dBi sedangkan Gain realisasi sebesar 6,34 dBi. *Effective bandwidth* dengan nilai *axial ratio* ≤ 3 dan nilai VSWR $\leq 1,5$ terjadi pada rentang frekuensi 2,3316 -2,3672 GHz sebesar 35,58 MHz.

Daftar Pustaka

- [1] Sumantyo, Josaphat Tetuko Sri. "*Development of Circularly Polarized Synthetic Aperture Radar Onboard UAV for Earth Diagnosis*". EUSAR.2012
- [2] Sumantyo, Josaphat Tetuko Sri. "*Development of Circularly Polarized Synthetic Aperture Radar Onboard Microsatellite for Earth Diagnosis*". IGARSS.2011
- [3] Ramadhan, Muhammad Faizal. Wijanto, Heroe. Prasetyo, Agus Dwi. 2014. "Perancangan dan Realisasi antenna mikrostrip array patch segitiga sama sisi untuk S-Band Transmitter satelit mikro". Bandung : Universitas Telkom.
- [4] Marwa Shakeeb, A. Sebak. "*Circularly Polarized Microstrip Antenna*". Thesis Concordia University Canada. 2010
- [5] Y K Chan, Y K Koo. "*An Introduction to Synthetic Aperture Radar (SAR)*". PIERB.2008
- [6] Syauki, Ahmad Yanuar.2012. "*Dasar Komunikasi Satelit*". Surabaya : Universitas Narotama
- [7] Kraus, John D. And Marhefka, Ronald J. "*Third edition Antennas for All Applications*".
- [8] R. Garg, P. Bhartia, I. Bahl, and A. Ittipiboon, "*Microstrip Antenna Design Handbook*", Artech House, London, 2001.
- [9] Priyambodo, Tri Kuntoro; dkk. 2011. *IINUSAT-1 : SATELIT-NANO PERDANA DI INDONESIA UNTUK PENELITIAN DAN PENDIDIKAN*. Jurnal Ilmiah KURSUSOR, Vol.6, No. 1, hal. 45.
- [10] Setyo Prabowo, Gunawan. 2010. *AIT DAN RESIK PENGEMBANGAN STUDENT SATELIT*. Presentasi disajikan dalam Nanosatelit Workshop 2010, IT Telkom, Bandung – Indonesia,26 Maret 2010.
- [11] Kumar, Amit. Kaur, Jaspreet. 2013. "*Performance Analysis of Different Feeding Techniques*". Khurukshetra : Khuruksetra University
- [12] Balanis, Constantine A. 2005. "*Antena Theory Analisis and Desain 3rd edition*". United Stated: Wiley InterScience
- [13] Yohandri, H. Kuze, J.T. Sri Sumantyo. "*Development of Circularly Polarized Microstrip Antennas for CP-SAR System Installed on Unmanned Aerial Vehicle*". Dissertation Chiba University.2011
- [14] Fahrazal, Muhammad. "Rancang Bangun Antena Mikrostrip Triple Band Linear Array 4 Elemen Untuk Aplikasi WIMAX". Thesis Universitas Indonesia.2008
- [15] Fanny Octaviany. Wijanto, Heroe. Prasetyo, Agus Dwi 2016. "Perbandingan Antena Mikrostrip Patch Lingkaran dan Persegi Polarisasi Sirkular Untuk *Synthetic Aperture Radar* Frekuensi 1.27 GHz". Bandung : Universitas Telkom.
- [16] Tim Dosen. 2007. Diktat Kuliah Mata Kuliah Antena dan Propagasi "Pengukuran dan Antena". Bandung : STT Telkom.
- [17] Natale, Antonio, et al. "Demonstration and analysis of the applications of S-band SAR." *Synthetic Aperture Radar (APSAR)*, 2011 3rd International Asia-Pacific Conference on. IEEE, 2011.
- [18] Yohandri, V. Wissan, I. Firmansyah, P.Rizki Akbar, J.T. Sri Sumantyo, Hiroaki Kuze. "*Development of Circularly Polarized Array Antenna for Synthetic Aperture Radar Installed on UAV*". PIERC.2011

- [19] Rizki Akbar, P., J.T. Sri Sumantyo, Hiroaki Kuze. "A Novel Circularly Polarized Synthetic Aperture Radar (CP-SAR) System Onboard A Spaceborne Platform". International Journal of Remote Sensing.2010
- [20] Stutzman, Warren L., and Garry A. Thiele. "Antenna Theory and Design", John Wiley & Sons.2012.
- [21] Haneishi, M., Y. Suzuki. *Circular Polarization and Bandwidth - in Handbook of Microstrip Antennas, Vol. 1, J. R. James and P. S. Hall (Eds.)*. London: Peregrinus.1989.
- [22] Merna Baharuddin, Victor Wissan, J.T. Sri Sumantyo, Hiroaki Kuze. "Equilateral Triangular Microstrip Antenna for Circularly Polarized Synthetic Aperture Radar". Elsevier GmbH.2010.
- [23] Merna Baharuddin, Victor Wissan, J.T. Sri Sumantyo, Hiroaki Kuze. "Elliptical Microstrip Antenna for Circularly Polarized Synthetic Aperture Radar". Elsevier GmbH.2010.
- [24] Merna Baharuddin, Victor Wissan, J.T. Sri Sumantyo, Hiroaki Kuze. "Equilateral Triangular Microstrip Antenna for Circularly Polarized Synthetic Aperture Radar". Elsevier GmbH.2010.
- [25] Merna Baharuddin, J.T. Sri Sumantyo. "Circularly Polarized Microstrip Antennas with Proximity Coupled Feed for Circularly Polarized Synthetic Aperture Radar". PIERC.2010
- [26] Yohandri, Hiroaki Kuze, J.T. Sri Sumantyo. "A New Triple Proximity-fed Circularly Polarized Microstrip Antenna". Elsevier GmbH.2011.
- [27] Haneishi, M., S. Yoshida. "A Design Method of Circularly Polarized Rectangular Microstrip Antenna by One-Point Feed - in Microstrip Antenna Design, K. C. Gupta and A. Benalla (Eds.)". Norwood: Artech House, pp. 313-321. 1988.