

PERANCANGAN DAN REALISASI ANTENA MIKROSTRIP DENGAN PENCATUAN *DUAL FEED* ORTHOGONAL BERPOLARISASI SIRKULAR MENGGUNAKAN *FRONT-END* PARASITIK UNTUK *INTER SATELLITE LINK (ISL)* PADA SATELIT MIKRO 2U TU-SAT

DESIGN AND REALIZATION OF MICROSTRIP ANTENNA WITH DUAL FEED ORTHOGONAL CIRCULAR POLARIZATION USING FRONT-END PARASITIC FOR INTER SATELLITE LINK (ISL) IN MICRO 2U TU-SAT

Moh. Fery Akhsan¹, Bambang Setia Nugroho, S.T., M.T.², Agus Dwi Prasetyo, S.T., M.T.³

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

¹fery.akhsan@gmail.com, ²bambangsetianugroho@yahoo.com, ³surel.adp@gmail.com

Abstrak

Satelit mikro 2U merupakan satelit berukuran kecil berdimensi 10 x 10 x 20 cm. Misi satelit generasi pertama TU SAT hanya RSPL (*Remote Sensing Payload*). Kemudian diperbarui sistem SAR (*Synthetic Aperture Radar*), yaitu sebuah pengindraan jarak jauh menggunakan teknologi *radar imaging*. Dan generasi ketiga TU SAT direncanakan membawa sistem ISL (*Inter Satellite Link*), yaitu komunikasi data untuk menunjang pengembangan sistem SAR *Interferometry* (In SAR). In SAR merupakan pengembangan teknologi SAR untuk mengetahui parameter geografis seperti topografi permukaan, perubahan bentuk permukaan tanah dan pergerakan es (*gletser*).^[1] Salah satu *RF Device* sistem ISL adalah antena. Antena yang dirancang memiliki polarisasi sirkular, dikarenakan pada orbit LEO (600 – 1000 km) terdapat efek rotasi faraday yang mengakibatkan *polarization loss factor*.^[2] Dan antena yang dirancang menggunakan *front-end parasitic* untuk meminimalkan *backlobe* yang menyebabkan *gain* antena meningkat.^[3] Antena yang dirancang menggunakan substrat *Epoxy FR-4* ($\epsilon_r = 4,4$ dan $h=1,6$) mm. Antena bekerja pada frekuensi *S-Band* (2,38 - 2,42 GHz) yang menghasilkan $VSWR \leq 1,5$, polarisasi sirkular ($AR \leq 3$ dB), $Gain \geq 6$ dBi dan pola radiasi unidireksional ($HPBW \geq 70^\circ$). Dan Antena dapat terealisasi memiliki dimensi (60 x 60 x 35,5 mm) dengan *effective bandwidth* ≈ 40 MHz.

Kata Kunci : Satelit Mikro 2U, *Synthetic Aperture Radar (SAR)*, *Inter Satellite Link (ISL)*, SAR *Interferometry* (In SAR), *polarization loss factor*, Antena Mikrostrip Susun *front-end parasitic*.

Abstract

Micro satellite 2U is a small-sized satellite (10 x 10 x 20 cm). The first generation satellite mission TU SAT only RSPL (*Remote Sensing Payload*). Then the system is SAR (*Synthetic Aperture Radar*), is a remote sensing using radar imaging technology. After that the system is ISL (*Inter Satellite Link*), is a data communications system to support development of SAR *Interferometry* (In SAR). In SAR is the SAR technology to determine the geographic parameters such as surface topography, shifting land and glaciers.^[1] One of RF Device ISL is the antenna. The antenna was designed with circularly polarized, due to the LEO orbit (600 - 1000 km) faraday rotation effects are caused a *polarization loss factor*.^[2] And the antenna was designed with *front-end parasitic* to minimize *backlobe* and to increase gain.^[3] The antenna was designed with *Epoxy FR-4* substrate ($\epsilon_r = 4.4$ and $h = 1.6$) mm. The antenna works on *S-Band* frequencies (2.38 to 2.42 GHz) which produces $VSWR \leq 1.5$, circularly polarized ($AR \leq 3$ dB), $Gain \geq 6$ dBi and radiation pattern unidirectional ($HPBW \geq 70^\circ$). The dimensions of realized antenna of (60 x 60 x 35.5 mm) that has *effective bandwidth* ≈ 40 MHz.

Keywords: Micro Satellite 2U, *Synthetic Aperture Radar (SAR)*, *Inter Satellite Link (ISL)*, SAR *Interferometry* (In SAR), *Polarization Loss Factor*, Microstrip Antenna *Front-End Parasitic*.

1. Pendahuluan

Teknologi satelit merupakan salah satu produk kemajuan teknologi yang merupakan solusi bagi banyak permasalahan. Masalah komunikasi yang mencakup wilayah geografi yang luas dengan jenis topografi yang menyulitkan sistem terestrial, seperti di Indonesia dengan bentuk kepulauan dapat diselesaikan dengan menggunakan teknologi komunikasi satelit. Sedangkan dalam misi satelit mikro 2U berikut adalah untuk RSPL (Remote Sensing Payload), yaitu sebuah muatan yang berfungsi untuk memonitor bumi dari satelit. Untuk lebih spesifik, RSPL yang akan direncanakan menggunakan sistem SAR (Synthetic Aperture Radar), yaitu sebuah penginderaan jarak jauh yang menggunakan teknologi radar imaging yang memanfaatkan propagasi GEM.

Fakultas Teknik Elektro Telkom University bersama IAXC mengembangkan teknologi satelit berukuran mikro 2U yang direncanakan akan diluncurkan tahun 2017. Jenis satelit mikro menjadi pilihan riset karena harga yang relatif terjangkau dan juga ukuran yang tidak terlalu besar. Bentuk yang akan dikembangkan TU SAT adalah cubesat dengan massa sekitar 50 kg. TU SAT yang akan dirancang akan mengorbit pada lintasan LEO (*Low Earth Orbit*) sekitar 600 – 1000 km di atas permukaan bumi. Satelit ini mempunyai fungsi utama untuk keperluan komunikasi data.

Direncanakan setelah payload SAR berhasil diterapkan pada TU SAT, akan dikembangkan sistem berbasis SAR Interferometry (In SAR). In SAR merupakan salah satu pengembangan teknologi penginderaan jarak jauh yang memiliki kedudukan sangat penting di teknik penginderaan jarak jauh dimana memungkinkan pengukuran akurasi yang tinggi untuk mengetahui parameter geografis. Seperti topografi permukaan, perubahan bentuk permukaan tanah dan pergerakan es (gletser).^[1] Pada teknologi tersebut dibutuhkan teknologi komunikasi antar dua satelit berbeda yang disebut ISL (Inter satellite Link). Oleh karena itu penulis akan membuat membuat antenna untuk diaplikasikan pada sistem ISL. Diperlukan teknik khusus untuk menjadikan dimensi antenna proporsional sesuai ruang yang disediakan untuk sistem ISL pada satelit mikro 2U yaitu 10 x 10 x 20 cm. Maka dibuatlah antenna mikrostrip dengan pencatutan Dual Feed Orthogonal yang berguna untuk menghasilkan axial ratio ≤ 3 yang mengindikasikan bahwa antenna memiliki polarisasi sirkular, dengan gain $\geq 6\text{dBi}$, dan dengan HPBW $> 70^\circ$.^[3] Perancangan antenna mikrostrip yang memiliki polarisasi sirkular pada sistem ISL bertujuan untuk menghindari terjadinya polarization loss factor akibat pengaruh kondisi atmosfer. Selain itu antenna mikrostrip tersebut dirancang agar memiliki pola radiasi unidirectional karena kebutuhan sistem ISL.

2. Teori

2.1 Synthetic Aperture Radar (SAR)

Synthetic Aperture Radar (SAR) yaitu instrumen aktif gelombang mikro yang menggunakan prinsip kerja radar (radio detection and ranging) yang digunakan untuk memproduksi citra beresolusi tinggi dari permukaan bumi dalam segala cuaca baik dalam kondisi siang maupun malam. Perangkat ini memanfaatkan gerak relatif antara perangkat pemindai terhadap obyek yang dipindai.^[4]

SAR bergerak dengan lintasan yang diketahui, dengan mengirim pulsa dan menerima gelombang hampur dari target. Sinyal yang diterima dari target dikombinasikan dengan pulsa kirim sedemikian rupa sehingga susunan antenna sintetis terbentuk. Kemudian sinyal-sinyal yang diterima oleh antenna SAR tersebut diolah ke dalam modul-modul atau perangkat SAR yang selanjutnya data image tersebut dikirim melalui antenna S-Band Transmitter ke stasiun bumi untuk diterima oleh perangkat *Software Defined Radio*.

Pada saat ini, sensor SAR dioperasikan dengan polarisasi linier dengan informasi yang terbatas. Karakteristik dari SAR konvensional adalah berdimensi sangat besar, butuh daya besar, sensitif dengan efek rotasi Faraday, dan sebagainya. Saat ini sedang dikembangkan sensor CP-SAR yang diharapkan dapat mengatasi efek rotasi Faraday. Karena dengan adanya sensor CP-SAR dibuat polarisasi sirkular maka, daya yang dibutuhkan untuk mengatasi efek rotasi Faraday tidak besar, sehingga dimensi satelit juga kecil.

2.2 Inter Satellite Link (ISL)

Inter Satellite Link (ISL) merupakan komunikasi yang dilakukan oleh dua satelit atau lebih. Penggunaan ISL antar satelit memungkinkan pengiriman data berupa *attitude data* dan *control signal* dll. Salah satu jenis ISL yaitu menggunakan Wireless Communication, dimana komunikasi yang dilakukan menggunakan Radio Frequency. Dimana penggunaan Radio Frequency muncul ketika adanya *Orbiting Low-Frequency Antennas for Radio Astronomy (OLFAR) project*, yaitu salah satu pengembangan teknologi modern yang menginisiatifkan untuk melakukan komunikasi dengan *low frequency radio* di luar angkasa, dengan tujuan untuk memberikan kontribusi di bidang ilmu pengetahuan dan juga memberikan tantangan baru untuk para engineering.^{[3][4]}

Pemilihan *Wireless Communication* pada ISL memberikan beberapa kemudahan dalam hal pengembangan blok sistem komunikasi. Dan juga dapat mengefisiensi energi yang dibutuhkan.

2.3 SAR Interferometry (In SAR)

SAR Interferometry (In SAR) merupakan salah satu pengembangan teknologi penginderaan jarak jauh yang memiliki kedudukan sangat penting di teknik penginderaan jarak jauh dimana memungkinkan pengukuran akurasi yang tinggi untuk mengetahui parameter geografis. Seperti topografi permukaan, perubahan bentuk

permukaan tanah dan pergerakan es (gletser).^[1] Hal yang paling penting di In SAR yaitu membandingkan fasa di suatu tempat dengan dua atau lebih dari hasil gambar yang diambil dari radar yang diperoleh dari perbedaan posisi atau perbedaan waktu yang sangat sempit.

2.4 Antena Mikrostrip

Antena mikrostrip terdiri atas tiga bagian, yaitu *patch*, substrat, dan *groundplane*. Pada umumnya, *patch* terbuat dari logam konduktor seperti tembaga atau emas dan memiliki bentuk yang bermacam-macam seperti segi empat, segi tiga, lingkaran, dan lain-lain. *Patch* berfungsi sebagai pemancar (radiator). Substrat terbuat dari bahan-bahan dielektrik, yang biasanya mempunyai tinggi (h) antara 0.003λ - 0.05λ . *Groundplane* berfungsi sebagai pemantulan sempurna, mengembalikan energi kembali melalui substrat menuju udara bebas.

Antena mikrostrip merupakan antena yang memiliki massa ringan, mudah fabrikasi, dengan sifatnya yang *low profile* sehingga dapat ditempatkan pada hampir semua jenis permukaan dan ukuran yang kecil dibandingkan dengan jenis lain. Karena sifat yang dimilikinya, antena mikrostrip sangat sesuai dengan kebutuhan saat ini sehingga dapat diintegrasikan dengan peralatan telekomunikasi lain yang berukuran kecil termasuk satelit mikro. Akan tetapi antena mikrostrip juga memiliki beberapa kekurangan, yaitu *bandwidth* yang sempit, *gain*, dan *directivity* yang kecil, serta efisiensi yang rendah.

2.5 Pencatuan Dual Feed Orthogonal

Pencatuan *Dual Feed Orthogonal* Polarisasi Sirkular adalah salah satu jenis dari pencatuan *stripline* yang dapat dimodifikasi untuk menghasilkan polarisasi sirkular pada antena mikrostrip.^[10] Cara untuk menghasilkan polarisasi sirkular pada antena mikrostrip adalah dengan dua catuan yang saling *orthogonal* dan memiliki beda fasa sebesar 90° ^[11]. Untuk membuat dua catuan dengan beda fasa 90° dibutuhkan *power divider* atau *hybrid 90°* .

2.6 Single Stub Series Matching Impedance

Matching impedance merupakan penyepadanan pada saluran transmisi yang dilakukan agar impedansi *input* sama dengan impedansi beban ($Z_0 = Z_L$). Pematchingan dilakukan agar tidak terjadi pantulan pada sumber (*transmitter*) sehingga terjadi transfer daya maksimum pada saluran. Salah satu jenis *matching impedance* yaitu *Single Stub Series Matching Impedance*.

Single Stub Series Matching Impedance sangat cocok digunakan karena pematchingan ini bisa difabrikasi sebagai bagian dari rangkaian media transmisi. Parameter yang mempengaruhi pematchingan ini ada dua, yaitu panjang posisi stub dari impedansi beban (d) dan panjang stub (l).^[11]

2.7 Antena Susunan (Stacked)

Suatu gabungan *patch* antena dapat dibuat dua atau lebih *patch* antena pada mikrostrip. Pada dua antena *patch* yang ditumpuk dapat dilihat sebagai *single wideband* di antena mikrostrip dapat digunakan secara tunggal atau susun (*array*). *Gain* antena akan sedikit lebih besar dari sebuah *patch* berlapis tunggal karena terjadi peningkatan pada ketinggian di atas *groundplane* dan dikendalikan oleh panjang gelombang antena tersebut. Semakin tinggi dari konfigurasi yang ditumpuk, semakin besar *gain* nya. Hal ini adalah keuntungan yang didapat selain *bandwidth* impedansi juga meningkat. Sehingga dalam beberapa kasus dapat dikatakan bahwa dengan menggabungkan *patch* antena dapat meningkatkan *gain* dan *bandwidth* secara signifikan.^[12]

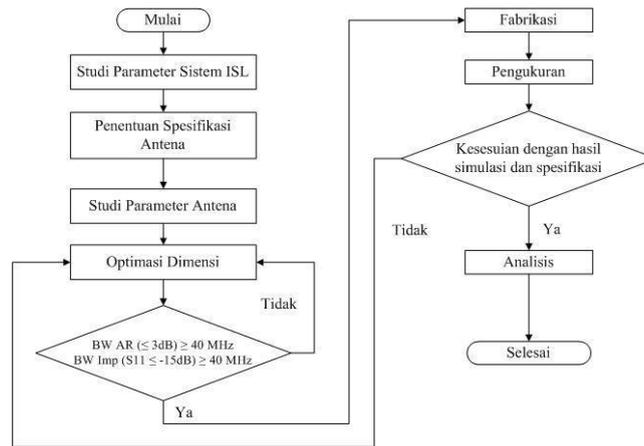
Struktur antena yang ditumpuk telah banyak digunakan dalam berbagai aplikasi karena koefisien kopling yang ditimbulkan dari jarak ketinggian antara antena yang digabungkan dapat disesuaikan dengan cara menyesuaikan ketinggian jarak antena tersebut. Selain itu ukuran *patch* dan parameter substrat juga dapat disesuaikan. Pada antena ini terjadi peningkatan *bandwidth* impedansi sebesar 10-30 % dengan nilai VSWR ≤ 1.5 .

Pada tugas akhir ini ketinggian jarak untuk memisahkan antena adalah udara atau yang disebut dengan *air gap*. Merupakan celah yang diinginkan sebagai jarak pemisah antena substrat dengan *groundplane*. Sehingga dapat membuat *groundplane* menjadi reflektor bagi *backlobe* dari antena. Pengaruh dari *air gap* sendiri dapat memantulkan *back lobe* dan dapat memunculkan frekuensi resonansi rendah pada suatu antena.

3. Perancangan

3.1 Tahap Perancangan

Langkah – langkah perancangan antena adalah sebagai berikut:



Gambar 1. Diagram Alir Perancangan Antena

3.2 Penentuan Spesifikasi Antena

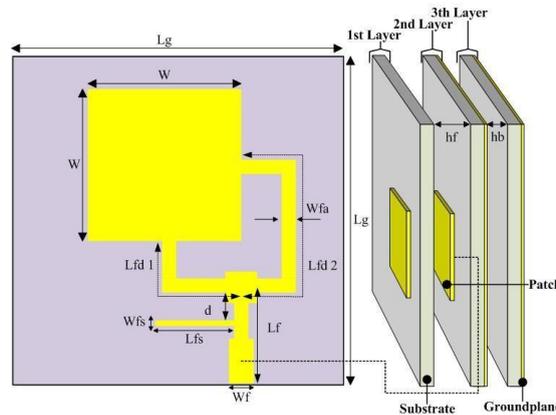
Dalam menentukan spesifikasi antena yang akan digunakan pada sistem ISL memerlukan perhitungan *Link Budget*. Agar sistem ISL dapat bekerja dengan baik sesuai kebutuhan. Dari *link budget* didapatkan spesifikasi antena pada sistem ISL berikut ini ,

- Frekuensi Kerja : 2,4 GHz
- VSWR : $\leq 1,5$
- Impedansi Bandwidth : 40 MHz
- Polarisasi : *Circularly Polarized (Left Handed Circularly Polarized / LHCP or Right Handed Circularly Polarized / RHCP)*
- Axial Ratio Bandwidth : 40 MHz (*Axial Ratio $\leq 3\text{ dB}$*)
- Gain : $\leq 6\text{ dBi}$
- HPBW : $\geq 70^\circ$

3.3 Perancangan Mikrostrip

Setelah ditentukan spesifikasi antena kemudian dilakukan perhitungan dimensi mikrostrip seperti *patch*, *feedline*, substrat, *groundplane*, jarak *front-end parasitic*, dan jarak antar antena dengan *prototype* struktur satelit. Dimensi tersebut dihasilkan dari perhitungan secara matematis. Dengan frekuensi kerja sebesar 2,38 – 2,42 GHz.

Dibawah ini merupakan hasil perhitungan dimensi antena dan hasil optimalisasi antena :



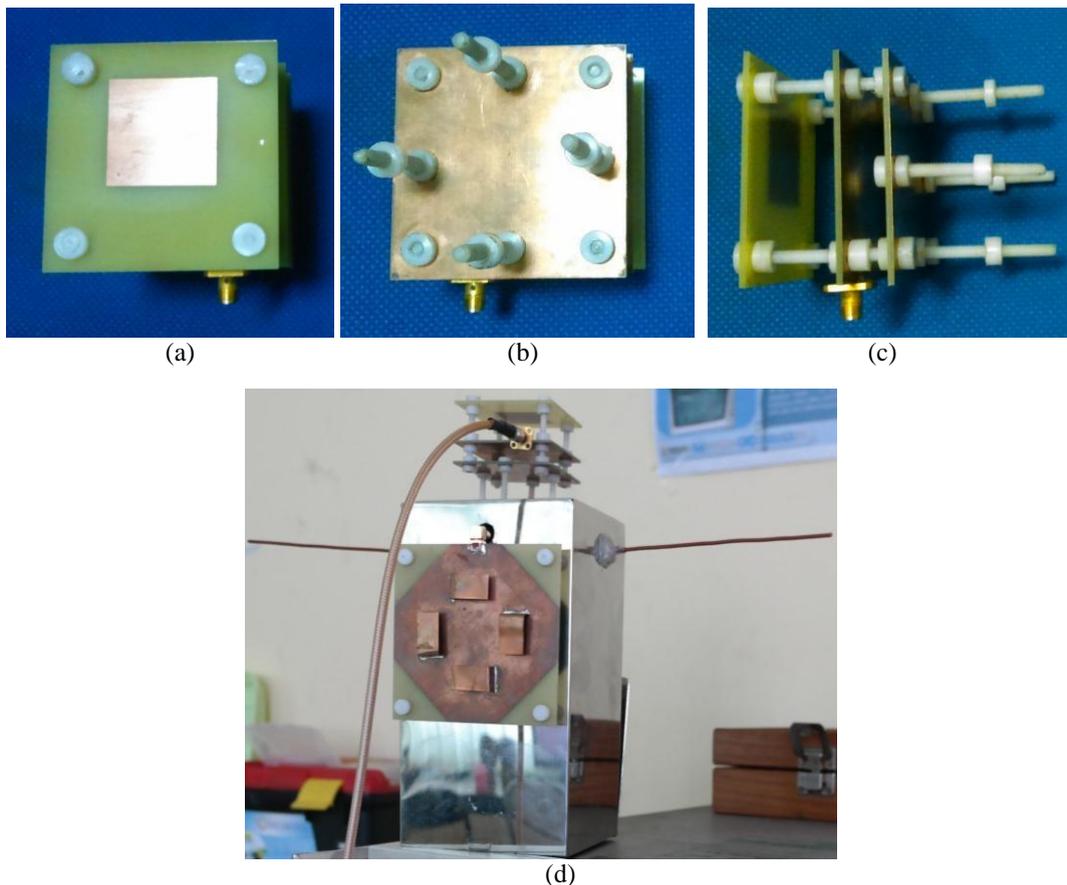
Gambar 2. Stuktur Antena

Tabel 1. Tabel Dimensi Antena Hasil Perhitungan dan Optimalisasi

| Parameter | Dimensi Hasil Perhitungan (mm) | Dimensi Hasil Optimalisasi (mm) | Keterangan |
|-----------|--------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| W | 29,73 | 28,4 | Panjang Sisi Patch |
| Wf | 3,1142 | 4 | Lebar Pencatuan Utama |
| Lf | 17,275 | 18,8 | Panjang Pencatuan Utama |
| $Lfd\ 1$ | 17,2 | 16,6 | Panjang Pencatuan Pembagi pertama |
| $Lfd\ 2$ | 21,5 | 28,6 | Panjang Pencatuan Pembagi kedua |
| Wfs | 0,65 | 0,5 | Lebar Stub |
| Lfs | 5,9 | 14 | Panjang Stub |
| d | 5,9 | 6,15 | Jarak Beban ke Stub |
| Wfa | 1,6 | 1,6 | Lebar Pencatuan Pembagi |
| Lg | 60 | 60 | Panjang <i>Groundplane</i> |
| hb | - | 13 | Tinggi Celah Bawah |
| ht | - | 22,5 | Tinggi Celah Atas |
| hs | - | 25 | Tinggi Antena Terhadap Struktur |

3.4 Realisasi Antena

Tahap Selanjutnya antena yang telah dirancang dan disimulasikan dengan perangkat lunak bantu CST Microwave Studio 2010, kemudian direalisasikan dengan menggunakan bahan yang sudah ditentukan sebelumnya yaitu substrat *Epoxy FR-4* di pabrik pencetakan dengan menggunakan jasa pencetakan *Antenna Printed Circuit Board (PCB)*.



Gambar 3. Hasil Realisasi Antena Mikrostrip (a) Atas, (b) Bawah, (c) Samping, dan (d) Dengan *prototype* struktur satelit

4. Pengukuran dan Analisis

Setelah dilakukan realisasi antena hasil optimal dari simulasi maka dilakukan tahap selanjutnya yaitu pengukuran. Pengukuran dilakukan pada medan dekat dan medan jauh. Pengukuran medan dekat menggunakan perangkat *Network Analyzer* untuk melihat nilai *VSWR*, *return loss*, *bandwidth* dan impedansi antena.

Pengukuran medan jauh untuk mengukur polaradiasi, polarisasi, dan *gain*. Perangkat yang digunakan saat medan jauh yaitu *Signal Generator*, *Spectrum Analyzer*, AUT, *Dipole*, dan *Antena Horn*.

Tabel 2. Tabel Hasil VSWR Simulasi dan Pengukuran

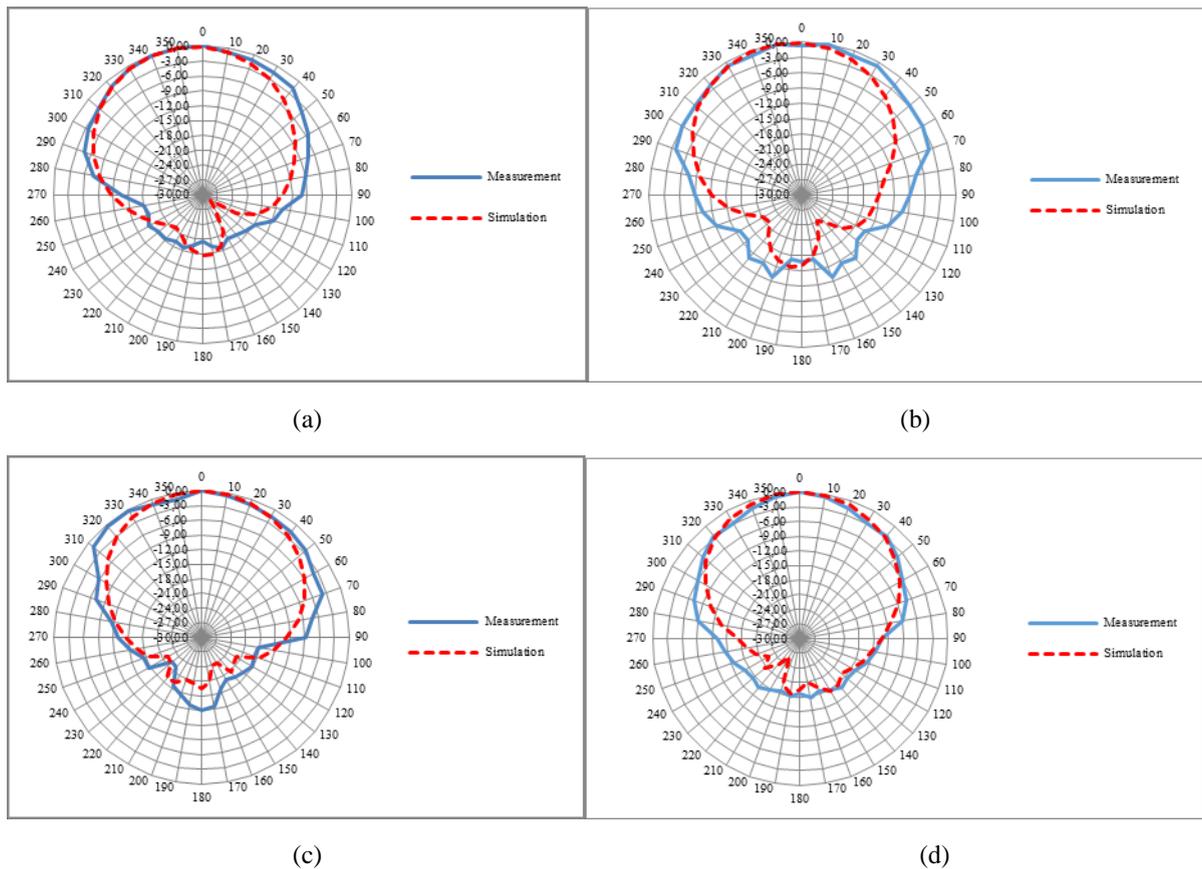
| Frekuensi | Tanpa <i>Prototype</i> | | Dengan <i>Prototype</i> | |
|-----------|------------------------|------------|-------------------------|------------|
| | Simulasi | Pengukuran | Simulasi | Pengukuran |
| 2,38 GHz | 1,12 | 1,15 | 1,10 | 1,14 |
| 2,4 GHz | 1,04 | 1,17 | 1,03 | 1,21 |
| 2,42 GHz | 1,14 | 1,14 | 1,13 | 1,11 |

Tabel 3. Tabel Hasil Impedansi Simulasi dan Pengukuran

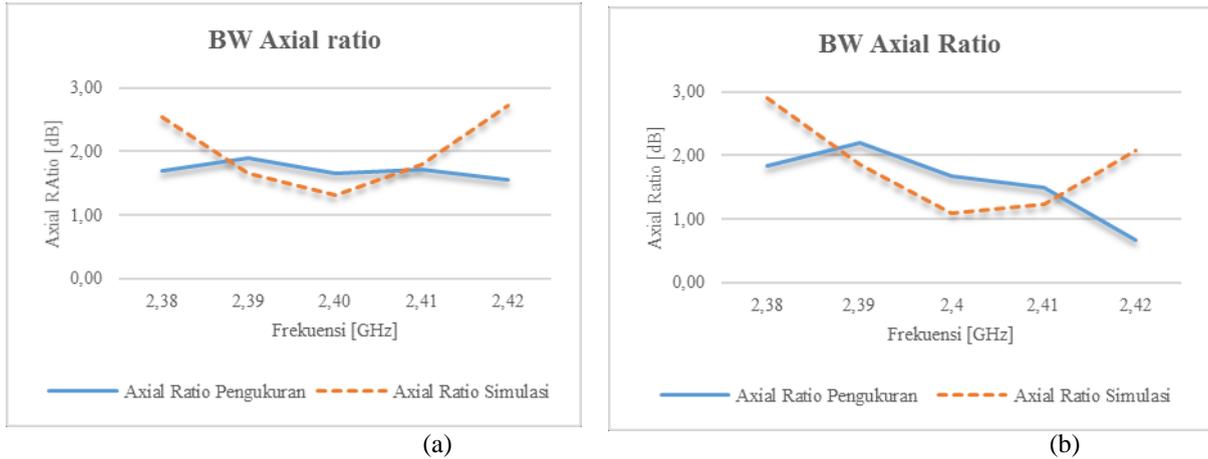
| Frekuensi | Tanpa <i>Prototype</i> | | Dengan <i>Prototype</i> | |
|-----------|------------------------|---------------|-------------------------|----------------|
| | Simulasi | Pengukuran | Simulasi | Pengukuran |
| 2,38 GHz | 56,10-j1,565 | 55,18-j4,002Ω | 55,01+j1,941 Ω | 53,73-j5,938 Ω |
| 2,4 GHz | 50,70-j1,901 | 57,49-j7,464Ω | 50,33+j1,634 Ω | 58,04-j2,966 Ω |
| 2,42 GHz | 43,98-j2,146 | 53,61-j2,380Ω | 44,12+j1,012 Ω | 54,73-j4,687 Ω |

Tabel 4. Tabel Hasil BW Simulasi dan Pengukuran VSWR

| Parameter | Simulasi | Pengukuran |
|---|---------------------|---------------------|
| <i>Antena tanpa Prototype Struktur Satelit</i> | 2,3415 – 2,444 GHz | 2,2328 - 2,5069 GHz |
| <i>Antena dengan Prototype Struktur Satelit</i> | 2,3374 – 2,4439 GHz | 2,3315 - 2,2484 GHz |



Gambar 4. Hasil Pengukuran Polaradiasi (a) Arah Azimuth tanpa Struktur, (b) Arah Elevasi dengan Struktur (c) Arah Azimuth dengan Struktur, (d) Arah Elevasi dengan Struktur



Gambar 5. Hasil Pengukuran BW Axial Ratio (a) Antena tanpa Struktur , (b) Antena dengan Struktur

Tabel 5. Tabel Hasil Pengukuran Gain Antena

| | Simulasi (dBi) | Pengukuran (dBi) |
|---|----------------|------------------|
| Antena tanpa <i>prototype</i> struktur satelit | 6,421 | 6,118 |
| Antena dengan <i>prototype</i> struktur satelit | 6,453 | 6,713 |

5. Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari seluruh proses perancangan dan realisasi antena mikrostrip susun *front-end parasitic*, adalah teknik *dual feedline orthogonal* dengan pembeda fasa antar kedua *feedline* nya sebesar 90⁰ dapat menghasilkan polarisasi sirkular. Dari antena yang telah dirancang dan realisasikan didapatkan *effective bandwidth* yang bekerja pada saat $VSWR \leq 1,5$ dan saat $AR \leq 3$ dB sebesar 40 MHz. Kemudian teknik front end parasitic dengan celah udara dapat meningkatkan gain sekitar 2-3 dBi serta bandwidth sekitar 10 % terhadap antena konvensional. Dengan kata lain metode ini dapat meningkatkan *gain* dan *bandwidth* tetapi metode antena susunan mempunyai kekurangan yaitu menambah dimensi antena. Dari semua parameter yang sudah dihasilkan pada simulasi dan pengukuran, antena tersebut sudah bisa digunakan untuk sistem ISL pada mikro 2 μ TU-SAT.

Daftar Pustaka

- [1] A. Moreira, P. P. Iraola, M. Younis, G. Krieger, I. Hajnsek dan K. P. Papathanassiou, "A Tutorial on Synthetic Aperture Radar," dalam *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, Microwave and Radar Institute of German Aerospace Center (DLR), March 2013.
- [2] V. W. Yohandri, I. Frimansyah, J. S. S. P. Rizki Akbar dan H. Kuze, "Development of Circularly Polarized Array Antenna for Synthetic Aperture Radar Installed on UAV," dalam *PIERC*, 2011.
- [3] Supriyanto, W. Toto, Gunawan dan dkk, "Peningkatan Gain Antena Mikrostrip Lingkaran Menggunakan Front-End Parasitik Substrat untuk Aplikasi LTE," dalam *SMAP*, 2012.
- [4] M. Bentumt, R. Grootjans, M. Brethouwer dan R. Vries, *Inter-Satellite Communication Link for Space Based Interferometer*, Twente: University of Twente.
- [5] A. D. Prasetyo, *Perancangan Dual Antena Polarisasi Sirkular RHCP-LHCP untuk Circularly Polarized Synthetic Aperture Radar Onboard Microsatellite (uSAT CP-SAR)*, Bandung: Institut Teknologi Telkom, 2013.
- [6] T. J. Willink, *Antenna system design for OLFAR's inter-satellite link*, Twente: University of Twente, 2012.
- [7] J. D. Kraus dan R. J. Marhefta, Third edition *Antennas for All Applications*.
- [8] A. Fauzi, *Antena Mikrostrip Slot Lingkaran untuk Memperlebar Bandwidth dengan Teknik Pencatutan Coplanar Waveguide pada Frekuensi 2,3 GHz*, Depok: Universitas Indonesia, 2012.
- [9] J. Wiley dan Sons, *Balanis 6th Microstrip Design*, 2005.
- [10] B. Merna, M. Victor, S. Sri dan K. Hiroaki, *Equilateral Triangular Microstrip Antenna for Circularly Polarized Synthetic Aperture Radar*, Elsevier GmbH, 2010.
- [11] F. T. Ulaby, E. Michielssen dan U. Ravaioli, *Fundamentals of Applied Electromagnetics*.
- [12] M. F. Iskander, *Electromagnetics Fields and Waves*, Prentice-Hall, 1992.
- [13] V. R. Laksmil, M. Sravani dan G. S. N. Raju, *Parametric Study of a Novel Stacked Patch Antenna*, International Journal of Advances in Engineering & Technology, Januari 2012.
- [14] A. Hidayatullah, *Perancangan dan Realisasi Antena Mikrostrip Rectangular Wideband Pada Frekuensi 2,3 – 2,39 GHz untuk LTE dengan Celah U dan Teknik Perturbasi*, Bandung: Institut Teknologi Telkom, 2013.
- [15] M. Sharkeeb dan A. Sebak, *Circularly Polarized Microstrip Antenna*, Canada: Thesis Concordia University Canada, 2010.
- [16] P. R. P. Putra, *Perancangan Dan Realisasi Susunan Antena Mikrostrip Berpolarisasi Sirkular Menggunakan Front-End Parasitik Untuk S-Band Transmitter Sistem Synthetic Aperture Radar (SAR) pada Space Segment*, Bandung: Telkom University, 2014.
- [17] K. Nirun, N. Chalermopol dan T. Taspong, "Parametric Study of the Rectangular Microstrip Antenna with Air Gap," *R&D Journal*, vol. 2, no. 24, pp. 131-142, 2001.
- [18] C. A. Balanis, *Antena Theory Analisis and Design 3rd Edition*, United Science: Wiley Inter Science, 2005.
- [19] A. R. Hakim, *Perancangan dan Realisasi Antena Mikrostrip Polarisasi Sirkular dengan Catuan Proximity Coupled untuk Circularly Polarized Synthetic Aperture Radar (CP-SAR)*, Bandung: Telkom University, 2014.
- [20] J. D. Krauss, *Antennas*, United States: Wiley Inter Science, 1998.
- [21] Amrithesh, Singh dan K. Milan, *Design of Square patch Microstrip Antena for Circular Polarization Using IE3D Software*, India: National Institute of Technology Rourkela.
- [22] J. T. S. Sumantyo, "Development of Circularly Polarized Synthetic Aperture Radar Onboard Microsatellite for Earth Diagnosis," dalam *IGARSS*, 2011.
- [23] J. T. S. Sumantyo, "Development of Circularly Polarized Synthetic Aperture Radar Onboard UAV for Earth Diagnosis," dalam *EUSAR*, 2012.
- [24] Yohandri, K. H. dan S. S. J.T., *Development of Circularly Polarized Microstrip Antennas for CP-SAR System Installed on Unmanned Aerial Vehicle*, Chiba: Dissertation Chiba University, 2011.
- [25] Yohandri, V. Wissan, I. Firmansyah, P. R. Akbar, J. S. Sumantyo dan H. Kuze, *Development of Circularly Polarized Array Antenna for Synthetic Aperture Radar Installed on UAV*, PIERC, 2011.

