

PERANCANGAN DAN REALISASI PENGUAT DAYA PADA FREKUENSI S-BAND UNTUK RADAR PENGAWAS PANTAI

DESIGN AND REALIZATION OF HIGH POWER AMPLIFIER IN S-BAND FREQUENCY FOR COASTAL SURVIALLANCE RADAR

Bilqisthi Mulyadi¹, A Ali Muayyadi², Yuyu Wahyu³.

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

³ PPET-LIPI (Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia)

¹bilqisthi@students.telkomuniversity.ac.id, ²alimuayyadi@telkomuniversity.ac.id,

³yuyu@ppet.lipi.go.id

Abstrak

Radar Coastal S-Band adalah sebuah radar maritim buatan dalam negeri yang dibuat untuk dapat diaplikasikan di kapal dan pantai. Pengembangan radar ini memanfaatkan *Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW)*, yaitu suatu teknologi yang menghasilkan jarak jangkauan radar dengan daya pancar sangat rendah. Substitem yang mendukung komponen Radar Coastal adalah penguat daya atau *High Power Amplifier (HPA)*. HPA berfungsi untuk menguatkan sinyal keluaran yang dihasilkan oleh transmiter sebelum di kirim ke penerima oleh antenna, dimana penerimanya tersebut berupa kapal yang berada di perairan.

Pada tugas akhir ini dirancang dan direalisasikan penguat daya yang dapat beroperasi pada frekuensi 2,8 - 3 GHz. Teknik yang digunakan yaitu eksperimental. Penyempadan impedansi menggunakan single stub *open circuit*. Komponen aktif yang digunakan adalah *Monolithic Microwave Integrated Circuit GALI 84+*.

Pengujian kinerja penguat daya dilakukan dengan membandingkan data hasil pengukuran dengan spesifikasi awal dan simulasi. Dari hasil pengukuran pada frekuensi 2,9 GHz, penguat daya memiliki penguatan sebesar 29,7 dB, sementara pada pengukuran VSWR, didapat nilai VSWR *input* sebesar 1,476 dan VSWR *output* sebesar 1,53. Pada pengukuran *return loss*, didapat nilai *return loss input* sebesar -14,318 dB dan *return loss output* sebesar -13,576 dB.

Kata Kunci : *Air Surveillance Radar, Coastal, High Power Amplifier*, Penguatan, *Monolithic Microwave Integrated Circuit*

Abstract

Coastal Radar S-Band is a maritime radar domestically made to be applied in ship and shore. The development of this radar utilizes *Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW)*, which is a technology that produces the distance range radar with a very low emittance. Subsystem that supports component of Coastal Radar is a power amplifier or *High Power Amplifier (HPA)*. HPA serves to amplify the output signal generated by the transmitter before it is sent to the receiver by an antenna, wherein the recipient in the form of a ship in the waters.

In this final project designed and realized the power amplifier which can operate at a frequency of 2.8 to 3 GHz. The technique used is experimental. Matching impedance using single stub open circuit. The active component used is a *Monolithic Microwave Integrated Circuit GALI 84+*.

Power amplifier performance examination will be done by comparing the measurement result with outset specification. From measurement result, from 2.9 GHz, power amplifier have enhancement as big as 29.7 dB. While at VSWR measurements, VSWR input obtained a value of 1.476 and VSWR output of 1.53. In measuring return loss, return loss input values obtained amounted to -14.318 dB and return loss output amounted to -13.576 dB.

Keywords: *Air Surveillance Radar, Coastal, High Power Amplifiers, Strengthening, Monolithic Microwave Integrated Circuit*

1. Pendahuluan

Perkembangan teknologi komunikasi semakin cepat dan beragam, sehingga muncul standar teknologi yang baru dan semakin canggih. Di dalam suatu komunikasi umumnya terdapat antena. Dimana antena tersebut dibagi menjadi dua bagian, yaitu *transmitter* dan *receiver*. Sebelum sinyal masuk ke antena dan dipancarkan, ada sebuah sistem yang mengatur penguatan sinyal tersebut.

Radar mempunyai tiga komponen utama, yaitu *antenna*, *transmitter*, dan *receiver*. Oleh karena itu dibutuhkan perangkat yang dapat menjaga atau menguatkan sinyal agar mendapatkan *gain* yang ingin dicapai.

High Power Amplifier berfungsi untuk menguatkan sinyal yang akan diterima kedua *antenna* tersebut.. Penguat daya ini berfungsi untuk meningkatkan sinyal level daya output dari *transmitter* agar daya yang sampai dapat masih diterima oleh *receiver*.

Dalam perancangannya, penguat daya akan menggunakan komponen aktif berupa *Microwave Integrated Circuit*. Penguat dibuat dengan dua tingkat dengan menggunakan komponen aktif yang sama.

Pada tugas akhir ini akan disimulasikan dan direalisasikan *High Power Amplifier* yang dapat digunakan untuk aplikasi Radar S-Band, rentang frekuensi nya adalah 2,8 - 3 GHz dengan bahan material Rogers Duroid 5870.

Penelitian sebelumnya mengenai penguat daya ini sebelumnya pernah dilakukan oleh [12] dan [13]. Pada referensi [12], HPA direalisasikan dengan dua tingkat pada SAR dengan rentang frekuensi dari 1,265 – 1,275 GHz. HPA yang direalisasikan 1 tingkat pada SAR dengan rentang frekuensi 1,265 – 1,275 GHz memiliki tingkat penguatan sebesar 16,025 dB, *VSWR input* sebesar 3,142 dan *VSWR output* sebesar 4,928. Sedangkan pada HPA 2 tingkat memiliki tingkat penguatan sebesar -8,188 dB, *VSWR input* sebesar 3,363 dan *VSWR output* sebesar 2,529. Penelitian yang dilakukan oleh [11] memakai komponen aktif IC GALI 74, sedangkan bahan substrat yang dipakai yaitu FR4. Pada referensi [13], HPA direalisasikan dengan dua tingkat pada *remote sensing payload* nanosatelit dengan rentang frekuensi dari 2,4 – 2,45 GHz. HPA yang direalisasikan 1 tingkat pada SAR dengan rentang frekuensi 2,4 – 2,45 GHz memiliki tingkat penguatan sebesar 0,439 dB, *VSWR input* sebesar 2,604 dan *VSWR output* sebesar 2,3652. Sedangkan pada HPA 2 tingkat memiliki tingkat penguatan sebesar 11,572 dB, *VSWR input* sebesar 2,7429 dan *VSWR output* sebesar 3,0437. Penelitian yang dilakukan oleh [13] memakai komponen aktif transistor BFP640F, sedangkan bahan substrat yang dipakai yaitu FR4.

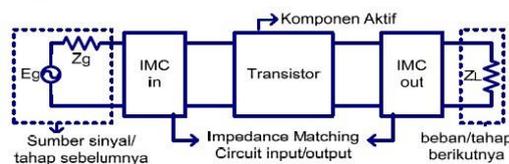
Penulis bermaksud untuk mengkaji ulang HPA pada referensi [12] dengan menggunakan komponen aktif yang berbeda, bahan substrat yang berbeda dan implementasi yang berbeda.

2. Landasan Teori

2.1 Penguat Daya

Penguat daya berfungsi untuk meningkatkan level daya sinyal pada masukan di rentang frekuensi yang telah di tentukan sampai dengan level daya yang di inginkan pada keluarannya.^[1] Penguat menerima daya inputan lalu daya tersebut diperkuat untuk dapat mengoperasikan suatu perangkat sehingga daya yang ditransmisikan bisa diterima pada sisi yang lain (*receiver*) dengan maksimal^[2]

Parameter yang penting dalam penguat daya yaitu *Gain*, *VSWR* (Voltage Standing Wave Ratio) serta *return loss*.



Gambar 1 Penguat Daya^[5]

2.2 Radar Pengawas Pantai

Pada zaman sekarang, *radar* berperan penting sebagai navigasi dan piranti keselamatan

pada alat transportasi, baik darat, udara maupun laut. Bahkan untuk transportasi laut, tidak ada perangkat penting selain *radar*. Dengan *radar*, nahkoda dapat mengetahui kondisi di sekeliling kapalnya meliputi garis pantai, kapal maupun objek lainnya. Kelebihan *radar* adalah dapat menampilkan objek di sekeliling radar tanpa terpengaruh cuaca.^[3]

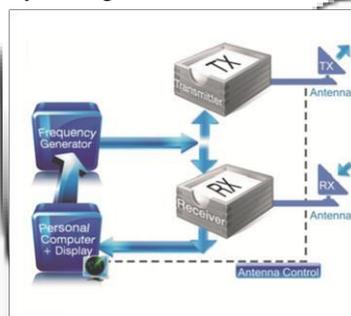
Radar pengawas pantai atau *Coastal Surveillance Radar* adalah sebuah *radar* maritim buatan dalam negeri yang dibuat untuk dapat diaplikasikan di kapal dan pantai. Pengembangan *radar* ini memanfaatkan *Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW)*, yaitu suatu teknologi yang menghasilkan jarak jangkauan radar dengan daya pancar sangat rendah (≤ 10 watt).

2.2.1 Prinsip Kerja Radar

Prinsip kerja *radar* adalah suatu pemancar memancarkan gelombang radio, yang direfleksikan oleh target dan dideteksi oleh alat penerima yang biasanya berlokasi ditempat yang sama dengan alat pemancar. Walaupun sinyal radio yang dikembalikan biasanya sangat lemah, sinyal radio tersebut dengan mudah dapat diperkuat. Hal ini memungkinkan radar dapat mendeteksi obyek pada jangkauan dimana pancaran lain seperti suara atau sinar, sangat lemah untuk dideteksi, oleh karena itu penggunaan Radar mempunyai keuntungan antara lain:

- Biaya operasional dan pemeliharaan (maintenance)
- Konsumsi daya yang rendah, ukuran yang relatif kecil
- Jangkauan deteksi yang cukup jauh,
- Pancaran sinyal *radar* tidak mudah diketahui oleh pihak lain.

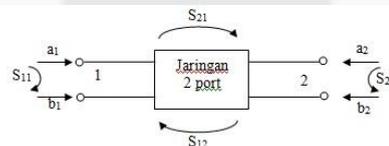
Blok diagram *radar Frequency Modulated-Continuous Wave (FM-CW)* yang digunakan pada prototip radar PPET-LIPI diperlihatkan pada Gambar2. Sistem Radar FM-CW ini terbagi atas dua bagian utama yaitu *transmitter* (pemancar) dan *receiver* (penerima). Pembangkit frekuensi (*frequency generator*) berfungsi untuk membangkitkan sinyal *sweep*, memberikan input sinyal osilator (*local oscillator*) frekuensi rendah dan tinggi ke bagian pemancar dan penerima, serta menghasilkan sinyal dengan frekuensi referensi.



Gambar 2. Blok Diagram Sistem Radar^[15]

2.3 Parameter S untuk Rangkaian Dua Port

Untuk mengukur tegangan dan arus pada frekuensi gelombang mikro, maka digunakan parameter S^[4].



Gambar 3 Rangkaian dua port dan Parameter S-nya^[6].

Gambar 3 memperlihatkan jaringan dua port dan parameter S-nya. Pada *input port (port 1)* tegangan gelombang datang dan tegangan gelombang pantul disimbolkan dengan a_1 dan b_1 . Pada *output port (port 2)*, tegangan gelombang datang dan tegangan gelombang pantul disimbolkan dengan a_2 dan b_2 . Parameter S adalah variabel kompleks yang merupakan perbandingan antara gelombang pantul dengan gelombang datang.

2.4 Faktor Kestabilan

Kestabilan pada perancangan penguat adalah hal pertama yang harus diperhatikan sebelum yang lainnya. Kestabilan dapat ditentukan dengan menghitung faktor kestabilan berdasarkan

parameter *scatter* (parameter S) yang diperoleh dari *data sheet* pada komponen aktif yang digunakan. Dalam jaringan dua port, osilasi akan terjadi jika magnitude koefisien pantul baik di input atau output lebih besar dari satu $|\Gamma_{in}| > 1$ atau $|\Gamma_{out}| > 1$.

Dalam menganalisis kestabilan penguat, terdapat beberapa definisi konstanta yang sering digunakan, yaitu^[3]:

- a. Determinan dari parameter S

$$\Delta = S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21} \dots \dots \dots (2.7)$$

- b. Faktor Kestabilan Rollet K :

$$K = \frac{1 + \Delta}{2|S_{21}S_{12}|} \dots \dots \dots (2.8)$$

Dari faktor di atas dapat diketahui jenis dan syarat kestabilan dari penguat, yaitu^{[2][7]} :

- a. Stabil tanpa syarat (*unconditional stable*) yaitu kondisi jika $K > 1$ dan $|\Delta| < 1$. Penguat selalu stabil untuk pemilihan Γ_S dan Γ_L sembarang pada *smithchart*. Selain itu, syarat untuk stabil tanpa syarat yaitu $|\Gamma_{in}| < 1$ atau $|\Gamma_{out}| < 1$

$$|\Gamma_{in}| = \left| \Gamma_1 + \frac{\Gamma_2 \Gamma_1}{1 - \Gamma_1} \right| < 1 \dots \dots \dots (2.9)$$

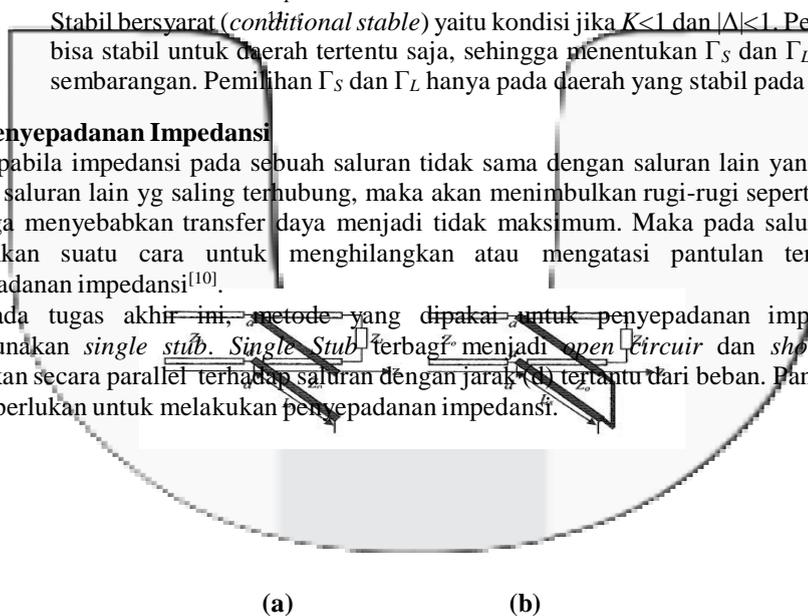
$$|\Gamma_{out}| = \left| \Gamma_2 + \frac{\Gamma_1 \Gamma_2}{1 - \Gamma_2} \right| < 1 \dots \dots \dots (2.10)$$

- b. Stabil bersyarat (*conditional stable*) yaitu kondisi jika $K < 1$ dan $|\Delta| < 1$. Penguat masih bisa stabil untuk daerah tertentu saja, sehingga menentukan Γ_S dan Γ_L tidak boleh sembarangan. Pemilihan Γ_S dan Γ_L hanya pada daerah yang stabil pada *smithchart*.

2.5 Penyepadanan Impedansi

Apabila impedansi pada sebuah saluran tidak sama dengan saluran lain yang terhubung dengan saluran lain yg saling terhubung, maka akan menimbulkan rugi-rugi seperti daya pantul sehingga menyebabkan transfer daya menjadi tidak maksimum. Maka pada saluran transmisi dibutuhkan suatu cara untuk menghilangkan atau mengatasi pantulan tersebut, yaitu penyepadanan impedansi^[10].

Pada tugas akhir ini, metode yang dipakai untuk penyepadanan impedansi yaitu menggunakan *single stub*. *Single Stub* terbagi menjadi *open circuit* dan *short circuit* yg disisipkan secara paralel terhadap saluran dengan jarak tertentu dari beban. Panjang stub (L) juga diperlukan untuk melakukan penyepadanan impedansi.



Gambar 5 Penyepadanan Impedansi dengan Stub^[9]

Gambar “a” menunjukkan *Stub Open Circuit*, sedangkan gambar “b” menunjukkan *Stub Short Circuit*

3. Perancangan Penguat

3.1 Spesifikasi Penguat Daya

Penguat daya yang akan dirancang mempunyai spesifikasi sebagai berikut :

1. Frekuensi kerja : 2,8 – 3 GHz
2. Frekuensi tengah : 2,9 GHz
3. VSWR : ≤ 1,5
4. Impedansi : 50 Ω
5. Penguatan satu tingkat : ≥ 14 dB
6. Penguatan dua tingkat : ≥ 28 dB
7. Return Loss input : ≤ -15 dB
8. Return Loss output : ≤ -15 dB

3.2 Pemilihan Substrat

Pada pembuatan penguat daya untuk aplikasi radar S-Band digunakan untuk bahan dielektrik atau substrat jenis Rogers - Duroid 5870. Karakteristik dari substrat Rodgers – Duroid yaitu sebagai berikut :

Tabel 1 Spesifikasi substrat Rogers – Duroid 5870

Jenis Substrat	Rogers – Duroid 5870
Permetifitas Relatif (ϵ_r)	2,3
Tinggi Substrat (h)	0,51 mm
Tebal Konduktor (t)	0,0012 mm
Faktor Disipasi ($\tan \delta$)	0,02

3.3 Penyepadanan Impedansi

Pada bagian penyepadanan impedansi, setelah melakukan perhitungan, didapat $K > 1$ yaitu sebesar 1,568, dari nilai tersebut maka IC tersebut termasuk stabil tanpa syarat. Lalu didapat nilai : $Z_L = 126,612 + j25,842$

$Z_s = 73,63 + j2,598$

Pada datasheet diketahui $V_D = 5,8$ Volt dan $I_c = 100$ mA, dan akan digunakan $V_{cc} = 12$ Volt, dan untuk komponen L dan C yang berfungsi sebagai DC feed dan DC Block. Setelah melakukan perhitungan pada persamaan (2.20) dan (2.21), maka didapatkan hasil $C = 10,98$ pF dan $L = 27,4$ nH

Melalui perhitungan pada persamaan (2.22) – (2.25), maka di dapatkan hasil $A = 1,105$, $\frac{w}{d} = 3,394$, $w = 1,730$ mm , $l = 8,42$ mm

3.4 Konversi Dimensi Saluran Transmisi

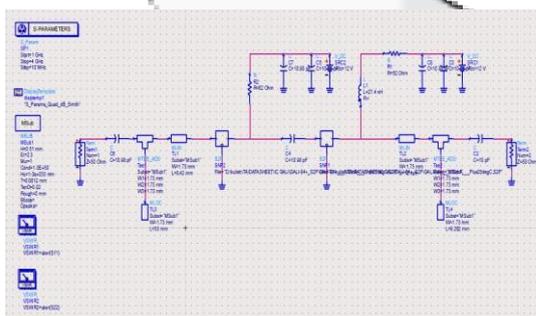
Impedansi yang diinginkan pada stub dan jalur penghubung antar stage HPA adalah 50 Ω . Untuk menghitung lebar jalur stub dapat dilakukan menggunakan rumus (2.23) hingga didapatkan nilai $W = 1,730$ mm. Perhitungan dimensi saluran mikrostrip juga dilakukan dengan simulasi *Line Calculation* pada ADS yang hasilnya sebesar $W = 1,541$ mm.

Tabel 2 Panjang Saluran dan Stub

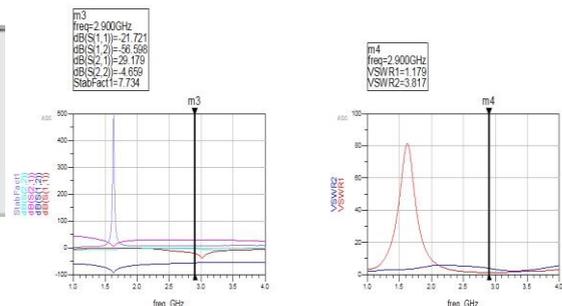
	Masukan	Keluaran
Panjang Saluran	8,42 mm	12 mm
Panjang Stub	33 mm	9,282 mm

3.5 Perancangan Penguat

Setelah selesai melakukan perhitungan dengan beberapa persamaan , maka langkah selanjutnya ialah merancang penguat. Penguat yang akan dirancang secara keseluruhan terdiri dari dua tingkat, Desain rangkaian HPA dua tingkat dapat dilihat pada gambar di bawah:

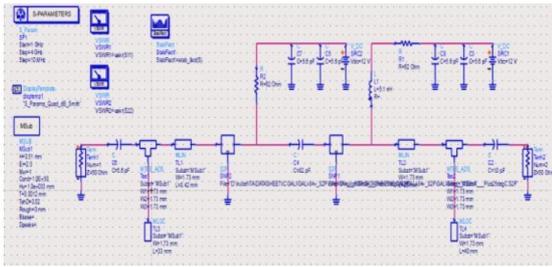


Gambar 6 Skematik HPA Dua Tingkat

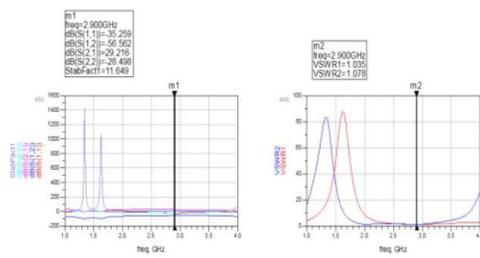


Gambar 7 Hasil Simulasi HPA Dua Tingkat

Dari simulasi dapat dilihat bahwa penguatan pada perancangan dua tingkat telah memenuhi spesifikasi, tetapi nilai VSWR *output* masih dirasa terlalu besar atau terlalu jauh dari spesifikasi awal, maka dari itu dilakukan lah optimasi agar mendapatkan hasil yg sesuai target.



Gambar 8 Skematik Optimasi Dua Tingkat

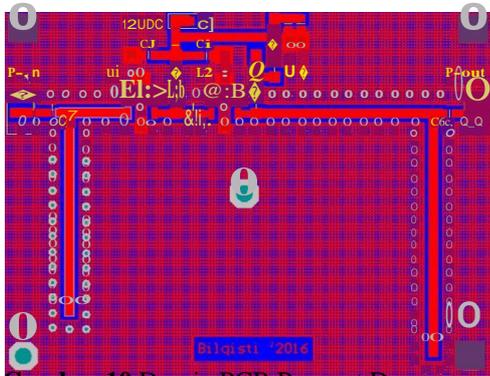


Gambar 9 Hasil Simulasi Optimasi Dua Tingkat

Dari Gambar 3.8 dapat dilihat bahwa hasil simulasi setelah dilakukan optimasi rangkaian menjadi lebih baik. Dengan penguatan sebesar 29,216 dB dan nilai VSWR masukan dan keluaran berada dibawah 1.5.

3.6 Perancangan dan Reaisasi PCB

Gambar PCB dari rangkaian penguat daya dengan menggunakan software Altium Designer dapat dilihat pada Gambar 3.9.



Gambar 10 Desain PCB Penguat Daya

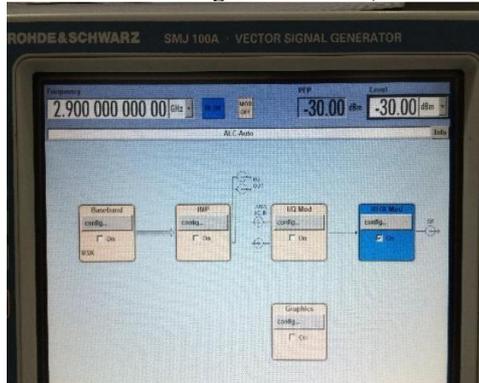


Gambar 11 Realisasi Penguat Daya

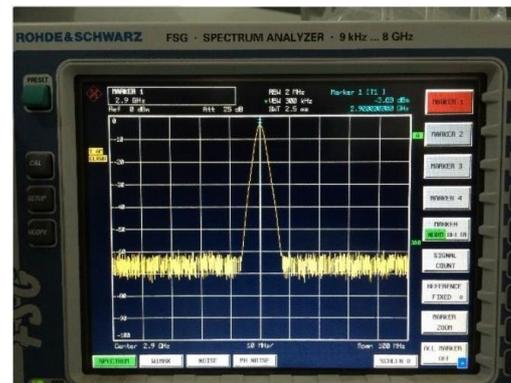
4. Pengukuran dan Analisis

Pada bab ini akan dibahas mengenai hasil dari pengukuran karakteristik dan dimensi fisik antenna hasil fabrikasi. Pengukuran dimensi fisik penguat bertujuan untuk membandingkan antara performansi penguat hasil simulasi dengan performansi penguat realisasi atau hasil fabrikasi. Pengukuran beberapa parameter ini dilakukan di Pusat Penelitian Elektronika dan Telekomunikasi (PPET) – Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI) Bandung.

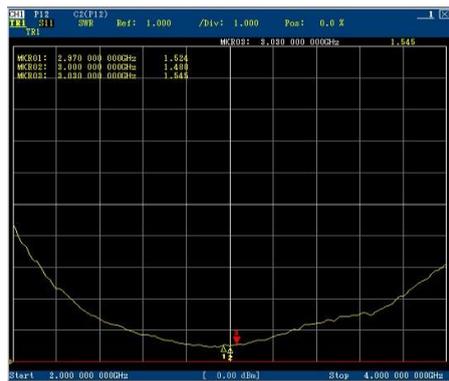
4.1 Hasil Pengukuran Gain, VSWR dan Return Loss



Gambar 12 Level Input Diberikan Sebesar -30 dBm



Gambar 13 Pengukuran Gain



Gambar 14 VSWR input



Gambar 15 VSWR output



Gambar 16 Hasil Pengukuran ReturnLoss Input



Gambar 17 Hasil Pengukuran Return Loss Output

Berdasarkan gambar 12 dan 13 menunjukkan hasil pengukuran *Gain* pada frekuensi 2,9 GHz. *Gain* tertinggi memang terdapat jika diberi *level* input -80 dBm, tetapi jika dilihat melalui *spektrum analyzer*, nilai nya masih terlalu mirip dengan noise. Dikarenakan *driver* HPA hanya akan bisa menggerakkan atau mengaktifkan RF HPA dengan masukan atau *input* maksimal (*level* daya *output*) -5dBm, maka *level* *input* yang dipakai yaitu -34 dBm, dengan nilai *level* *output* -4,3 dBm, dengan nilai penguatan 29,7 dB. Pada pengukuran di atas, dapat disimpulkan bahwa semakin besar *input* yang diberikan, maka semakin kecil pula *gain* nya. Dari Gambar 14 dan 15 penguat daya pada frekuensi 2,9 GHz hanya bisa mendapatkan $VSWR_{input} = 1,476$ dan $VSWR_{output} = 1,530$. Ini masih sedikit kurang dari nilai yang diinginkan pada saat perancangan, yaitu $\leq 1,5$. Sedangkan *VSWR* terbaik pada sisi input bernilai 1,475 pada frekuensi 2,91 GHz dan *VSWR* terbaik pada sisi output bernilai 1,038 pada frekuensi 2,8 GHz. Pada gambar 16 dan 17 didapatkan hasil pengukuran *return loss* input bernilai -14,318 dB dan *return loss* output bernilai -13,576 dB. Semakin kecil nilai daya yang dipantulkan, maka semakin bagus pula kinerja dari penguat tersebut.

5. Kesimpulan dan Saran

5.1 Kesimpulan

Setelah melakukan perancangan penguat daya, dapat disimpulkan bahwa :

1. Hasil realisasi *gain* pada frekuensi kerja 2,9 GHz sudah memenuhi spesifikasi HPA dimana *gain* yang dihasilkan lebih besar dari 28 dB, yaitu 29,7 dB.
2. Nilai *VSWR* input pada frekuensi kerja 2,9 GHz lebih kecil dari 1,5 sehingga memenuhi spesifikasi HPA dimana nilai *VSWR* pada frekuensi 2,9 GHz yaitu 1,476.
3. Nilai *VSWR* output pada frekuensi kerja 2,9 GHz sedikit lebih besar dari 1,5 sehingga tidak memenuhi spesifikasi HPA dimana nilai *VSWR* output pada frekuensi 2,9 GHz yaitu 1,530.
4. *Return loss* input yang dihasilkan pada frekuensi kerja 2,9 GHz bernilai -14,318 dB dan *return loss* output yang dihasilkan pada frekuensi kerja 2,9 GHz bernilai -13,576 dB. Nilai ini berada sedikit lebih besar dari spesifikasi HPA dimana nilai yang diinginkan itu ≤ -15 dB.
5. Perbedaan hasil simulasi dan hasil pengukuran terjadi dikarenakan oleh banyak faktor. Pada saat simulasi, kondisi semua dalam keadaan sempurna. Tetapi tidak pada saat

pengukuran. Faktor peralatan, kualitas komponen, ketidak sempurnaan dalam *matching impedance*, ketidaksempurnaan dalam penyolderan dan faktor pada saat pabrikasi dapat mempengaruhi hasil dari pengukuran tersebut, sehingga hasil realisasi HPA berbeda dengan hasil simulasi.

5.2 Saran

Penelitian lebih lanjut diharapkan dapat memperbaiki kekurangan yang ada dan diharapkan dapat mengembangkan yang apa yang telah dilakukan pada penelitian ini. Untuk itu disarankan hal-hal berikut.

1. Menguasai penggunaan *software* ADS 2015 dengan baik agar hasil simulasi dapat mendekati hasil realisasi
2. Untuk mendapatkan hasil penguat yang lebih baik, disarankan untuk lebih teliti lagi dalam memilih bahan yang akan digunakan agar mempermudah proses penentuan dimensi penguat daya.
3. Proses fabrikasi penguat daya sebaiknya dilakukan lebih teliti dan lebih presisi agar mendapatkan hasil yang sesuai dengan spesifikasi

Daftar Pustaka

- [1] Colantino, Paolo, Franco, Ernesto. *High Efficiency RF and Microwave Solid State Power Amplifier*. United Kingdom: John Wiley and Sons, Ltd. 2009.
- [2] Pozar, David M. 2011. *Microwave Engineering*. 4th Edition. John Wiley & Sons
- [3] Pul Wagener (2011). “*Real Time Realistic Radar Simulation*”, Netherland.
- [4] Chang, Kai. 1994. *Microwave Solid-State Circuits And Applications*. New York: John Wiley & Sons
- [5] Prasetya, Budi. 2007. *Penguat Frekuensi Tinggi dengan Parameter S*. Bandung: Sekolah Tinggi Teknologi Telkom.
- [6] Rahmi, Mira Hanafiah. 2013. *Perancangan dan Implementasi Penguat Berderau Rendah untuk Aplikasi Stasiun Bumi Penerima Satelit Nano pada Frekuensi 2,4-2,45 GHz Berbasis Mikrostrip*. Bandung: Institut Teknologi Telkom.
- [7] Gonzales, Guilermo. 1997. *Microwave Transistor Amplifiers: Analysis and Design*. 2nd Edition. Prentice-Hall.
- [8] Bharata, Endon. *Penguat Daya Microwave 6 GHz untuk Stasion Bumi Kecil*. ITB. 1995
- [9] Sanchez, Rafael Hernando Medina. 2003. *Design Of Tunable Balanced Amplifier Using Ferroelectric Materials*. University Of Puerto Rico Mayaguez.
- [10] Bowick, Christ. *RF Circuit Design*. 1982.
- [11] Valiansyah, Fakhri. 2016. *Simulasi dan Realisasi Power Splitter untuk Aplikasi Radar X-Band*. Bandung: Telkom University.
- [12] Maulina, Hani. 2015. *Penguat Daya pada Frekuensi 1,265 – 1,275 GHz untuk Synthetic Aperture Radar*. Bandung: Telkom University.
- [13] Anggriani, Wiwit Emilia. 2013. *Perancangan dan Realisasi High Power Amplifier (HPA) pada Frekuensi 2,4 – 2,45 GHz untuk Aplikasi Remote Sensing Payload Nanosatelit*. Bandung: Institut Teknologi Telkom.
- [14] Devendra, K. Misra, “*Radio-Frequency and Microwave Communication Circuit Analysis and Design Second Edition*”, New Jersey 2004.
- [15] Mashuri Wahab dan Tim Radar ISRA. ‘Buku Teknis Referensi Untuk FMCW ISRA Radar’, Bandung November 2014
- [16] <http://www.minicircuits.compdfsGALI-84+.pdf>