

Pemodelan Sistem Penguat Derau Rendah Melalui Pendekatan Analisis *Noise Figure* Untuk Aplikasi Teknologi *Wimax*

¹Budi Herdiana, ²Ivany Sarief, ³Topik Teguh Estu

¹Teknik Elektro, Jl. Dipatiukur 102 -116 Bandung 40132, Universitas Komputer Indonesia

²Teknik Elektro, Jl.PHH Mustopa No. 68 Bandung 40124, Universitas Sangga Buana

³Pusat penelitian Elektronika & Telekomunikasi, LIPI

Email:*budiherdiana77@gmail.com; ivansarief@gmail.com*

Abstrak - Setiap perangkat penerima dalam sistem telekomunikasi dapat menentukan kemampuan dan kualitas kerja perangkat dan teknologi telekomunikasi yang digunakan. Salah satunya yang sedang dikembangkan yaitu teknologi Wireless Broadband WiMAX (Worldwide interoperability for Microwave Access). Perangkat pendukung yang diperlukan untuk mendukung teknologi ini adalah sebuah penguat derau rendah (LNA) yang bisa beroperasi pada standar frekuensi berdasarkan standar IEEE 802.16a,b,..e. Komponen utama ini adalah sebuah penguat berbasis rangkaian terintegrasi menggunakan tipe MGA-72543 yang khusus diterapkan untuk kebutuhan teknologi WiMAX pada rentang frekuensi kerja 3,3-3,4 GHz dengan menghasilkan noise figure sebesar 1,58 dB dalam rentang lebar pita 110 MHz saat VSWR lebih kecil dari 1,5. Gambaran hasil yang diperoleh ini menunjukkan bahwa kriteria LNA yang dimodelkan mampu memberikan kontribusi terhadap teknologi WiMAX yang dikembangkan.

Kata Kunci: telekomunikasi, LNA, WiMAX, gain.

Abstract – *The receiver device in a telecommunications system can determine the capabilities and quality of the device and telecommunication technologies are used. One of them is being developed that technology Wireless Broadband WiMAX (Worldwide interoperability for microwave Access). Supporting devices required to support this technology is a low noise amplifier (LNA), which can operate at a frequency standard based on the IEEE 802.16a, b, .. e. The main component is an integrated circuit -based amplifier using a type MGA - 72543 is specifically applied to the needs of WiMAX technology in the working frequency range from 3.3 to 3.4 GHz with a yield of 1.58 dB noise figure in the range of 110 MHz bandwidth when VSWR smaller than 1.5. Overview of the results obtained shows that the criteria are modeled LNA able to contribute to WiMAX technology is developed.*

Keywords : telecommunications, LNA, WiMAX, gain.

I. PENDAHULUAN

WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) merupakan standar teknologi dari Metropolitan Area Network (MAN) wireless yang dibuat sebagai salah satu solusi permasalahan jaringan berbasis kabel (*wireline*). Tidak terlepas dari teknologi ini juga ternyata dibutuhkan sebuah perangkat penerima WiMAX yang menentukan kualitas sinyal yang diterima dengan baik berdasarkan standar alokasi frekuensi WiMAX yang digunakan. Salah satu sistem pendukung dari perangkat teknologi penerima WiMAX ini adalah penguat berdaya derau rendah yang memiliki tingkat kelinieritas tinggi karena jenis penguat ini dibentuk dari sebuah penguat kelas A sehingga memiliki kemampuan menghasilkan bentuk sinyal keluaran yang sama seperti sinyal masukannya dengan penekanan derau yang tinggi.

II. METODE PENELITIAN

2.1 Pemodelan dan Prancangan LNA

Tahapan awal dalam memodelkan dan merancang sistem penguat berdaya rendah ini adalah melakukan perhitungan dan perancangan sistem supaya mampu menghasilkan sebuah penguatan maksimum dengan standar noise figure seminimal mungkin. Penguat jenis

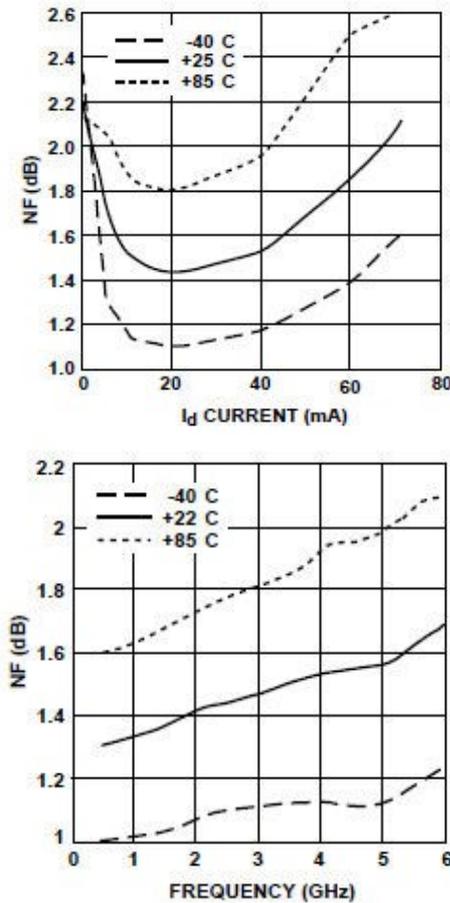
ini bukan seperti penguat daya biasa tetapi dibuat dengan sebuah tahapan yang benar-benar dilakukan secara detail dan hati-hati karena jika salah satu langkah ini tidak terpenuhi, maka kemungkinan hasil penguatannya tidak sesuai harapan. Secara detail, tahapan-tahapannya dimulai dari menghitung faktor kestabilan (K), penguatan daya sistem, penguatan dan lingkaran *noise figure* konstan dan memilih lingkaran penguatan daya sumber yang memotong lingkaran derau rendah serta menentukan rangkaian penyesuai impedansi masukan dan keluaran [2],[3].

Spesifikasi LNA yang dirancang adalah sebagai berikut :

- a) Frekuensi kerja : 3,3 GHz – 3,4GHz
- b) Frekuensi tengah : 3,35 GHz
- c) Noise Figure : ≤ 2 dB
- d) Gain : ≤ 12 dB
- e) VSWR : $\leq 1,5$
- f) Impedansi (Z_o) : 50 Ω
- g) Daya input minimum : ≤ -80 dBm
- h) Kelas penguat : kelas A

Perancangan penguat daya ini menggunakan Gas FET MGA-72543 karena pada data komponennya sudah memiliki informasi terinci terkait parameter S dan

alokasi frekuensinya sesuai spesifikasi yang sudah dicantumkan. Parameter S ini diperoleh dengan mempertimbangan kedudukan *Noise Figure* paling minimum seperti yang ditunjukkan grafik pada gambar 1 berikut ini:



Gambar 1. Grafik I_d dan frekuensi terhadap NF [1]

Agar memudahkan dalam perhitungan, maka merujuk pada data sheet MGA72543 diasumsikan nilai parameter S pada frekuensi kerja 3.35 GHz dengan harga $V_c = 3.0$ Volt dan $I_d = 20$ mA. Nilai-nilai ini digunakan untuk menentukan harga penguatan maksimum dan *noise figure* penguat derau rendah sesuai dengan yang akan dirancang. Langkah awal dari perancangan penguatan maksimum ini kita mengambil frekuensi pada nilai 3,35 GHz yang dijadikan sebagai referensi penguatan maksimum penguat ini dimana pada kedudukan tersebut harga noise figure mencapai nilai minimum.

2.2 Perhitungan Sistem LNA

2.2.1 Faktor Kestabilan (K)

Tujuan perhitungan faktor kestabilan penguat derau rendah ini adalah menentukan ukuran ada tidaknya gejala osilasi dalam penguat. Sehingga ada beberapa syarat utama yang harus dipenuhi dan termasuk katagori syarat pilihan agar perangkat penguat ini dapat diwujudkan dengan baik. Tahapan perhitungannya adalah sebagai berikut:

a. Menentukan nilai faktor delta (Δ) menggunakan pendekatan persamaan berikut ini:

$$\Delta = S_{11} \cdot S_{22} - S_{21} \cdot S_{12} \tag{1}$$

b. Selanjutnya, menentukan nilai faktor kestabilan (K) menggunakan pendekatan persamaan:

$$K = \frac{1 + |\Delta|^2 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2}{2|S_{12}S_{21}|} \tag{2}$$

Sehingga dari hasil perhitungan persamaan (1) dan (2) diperoleh harga $|\Delta| < 1$ dan $K > 1$ yang mana hasil ini menunjukkan bahwa perangkat penguat memiliki kestabilan tanpa syarat [2],[5].

2.2.2 Lingkaran Kestabilan

Ada 2 tahapan perhitungan parameter lingkaran kestabilan ini yaitu Lingkaran Kestabilan Sumber dan Lingkaran Kestabilan Beban dimana nilai keduanya ditentukan besarnya oleh hasil perhitungan jari-jari lingkaran dan pusat lingkaran yang besarnya masing – masing dinyatakan oleh persamaan:

$$r_s = \frac{|S_{12} \cdot S_{21}|}{|S_{11}|^2 - |\Delta|^2} \tag{3}$$

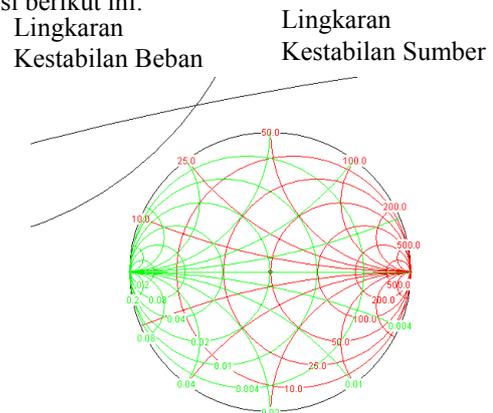
$$c_s = \frac{S_{11}^* - \Delta^* S_{22}}{|S_{11}|^2 - |\Delta|^2} \tag{4}$$

$$r_L = \frac{|S_{12} \cdot S_{21}|}{|S_{22}|^2 - |\Delta|^2} \tag{5}$$

$$c_L = \frac{S_{22}^* - \Delta^* S_{11}}{|S_{22}|^2 - |\Delta|^2} \tag{6}$$

dimana r_s dan r_L adalah jari-jari Lingkaran Kestabilan Sumber dan Beban sedangkan C_s dan C_L menunjukan Pusat Lingkaran Kestabilan Sumber dan Beban.

Hasil dari perhitungan kestabilan sumber dan beban dapat digambarkan dengan menggunakan smith chart simulasi berikut ini:



Gambar 2. Lingkaran kestabilan input dan output dengan menggunakan *software smith chart 2.0*

2.2.3 Penguatan Daya Operasi Maksimum

Perhitungan nilai penguatan daya maksimum dipergunakan persamaan berikut [2],[5]:

$$G_{Pmax} = \left| \frac{S_{21}}{S_{12}} \right| K - \sqrt{(K^2 - 1)} \tag{7}$$

Dari nilai $G_{p(max)}$ tersebut diperoleh :

$$g_p = \frac{G_p}{|S_{21}|^2} = 1,57 \tag{8}$$

Berdasarkan perhitungan jarak dari pusat *Smith Chart* ke pusat lingkaran penguatan diperoleh dari persamaan:

$$dp_\ell = \frac{g_p \times C_\ell^*}{|1 + g_p (|S_{22}|^2 - |\Delta|^2)|} \tag{9}$$

dimana : $C_\ell^* = S_{22}^* - \Delta^* \cdot S_{11}$

2.2.4 Perhitungan Lingkaran NF Konstan

Cara menentukan dan menggambarkan *Noise figure* konstan diambil dari nilai sesuai yang tercantum pada data sheet yaitu frekuensi 3.35 GHz sehingga diperoleh data sebagai berikut:

$NF_{min} : 1.46 \text{ dB} = 1.4$

$\Gamma_{opt} : 0.17 \angle 110^\circ$

$R_n : 7.8 \ \Omega$

$r_n : R_n/Z_o = 7.8/50 = 0.156$

Penentuan lingkaran *noise figure* untuk nilai *noise figure* tertentu terlebih dahulu perlu didefinisikan parameter suatu *noise figure* noise input (N_i) sebesar [2],[5]:

$$N_i = \frac{F_i - F_{min}}{4r_n} |1 + \Gamma_o|^2 \tag{10}$$

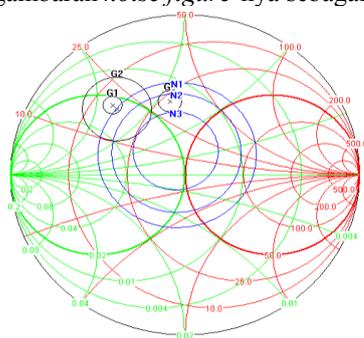
Pusat dan radius lingkaran *noise figure* diperoleh sebesar [2],[5]:

$$c_{Fi} = \frac{\Gamma_o}{1 + N_i} \tag{11}$$

sedangkan nilai r_{Fi} diperoleh sebesar,

$$r_{Fi} = \frac{1}{1 + N_i} [N_i^2 + N_i(1 + |\Gamma_o|^2)]^{1/2} \tag{12}$$

Jika divisualisasikan ke dalam *smith chart*, maka diperoleh gambaran *noise figure*-nya sebagai berikut:



Gambar 3 Lingkaran *Noise Figure* dan Penguatan Konstan Input dan Output

2.3 Penyesuai Impedansi

Ada 2 rangkaian penyesuai impedansi yang akan dirancang yaitu Penyesuai Impedansi Sumber (Z_{in}) dan Penyesuai Impedansi Beban (Z_L).

2.3.1 Penyesuai Impedansi Sumber (Z_{in})

Persamaan untuk penyesuai impedansi sisi sumber pada *noise figure* minimum adalah sebagai berikut [2],[5]:

$$Z_{in} = \frac{Z_o(1 - |\Gamma_o|^2) + j2Z_o|\Gamma_o| \sin \angle \Gamma_o}{1 - |\Gamma_o|^2 - 2|\Gamma_o| \cos \angle \Gamma_o} \tag{13}$$

Kemudian untuk memperoleh nilai impedansi sisi sumber, Z_{in} harus dikonversi ke Y_{in} menggunakan persamaan:

$$Y_{in} = \frac{1}{Z_{in}} \tag{14}$$

Sehingga dari persamaan (13) dan (14) diatas, diperoleh impedansi sumber sebesar:

$$Z_s = \frac{1}{\text{Im}(Y_{in})} \tag{15}$$

2.3.2 Penyesuai Impedansi Beban (Z_L)

Persamaan untuk impedansi beban pada *noise figure* minimum adalah sebagai berikut [2]:

$$Z_L = \frac{Z_o(1 - |\Gamma_l|^2) + j2Z_o|\Gamma_l| \sin \angle \Gamma_l}{1 - |\Gamma_l|^2 - 2|\Gamma_l| \cos \angle \Gamma_l} \tag{16}$$

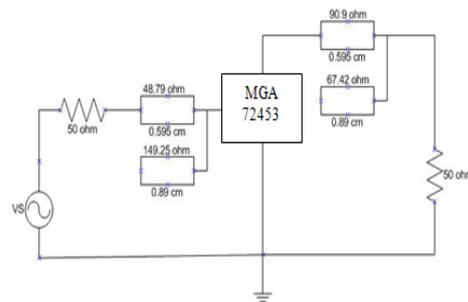
Kemudian untuk memperoleh nilai impedansi sisi sumber, Z_L harus dikonversi ke Y_{in} menggunakan persamaan:

$$Y_{in} = \frac{1}{Z_L} \tag{17}$$

Sehingga diperoleh impedansi beban sebesar,

$$Z_{o1} = \frac{1}{Y_o} = \frac{1}{\text{Im}(Y_{in})} \tag{18}$$

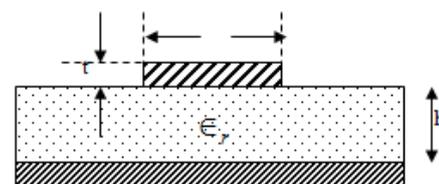
Oleh karena itu, rangkaian keseluruhan penyesuai impedansi LNA ini ditunjukkan sebagai berikut:



Gambar 4 Rangkaian Penyesuai Impedansi

2.4 Rangkaian Penyesuai Impedansi (mikrostrip)

Mikrostrip yang digunakan mempunyai $\epsilon_r = 4.4$ dan $h = 0.8 \text{ mm}$ dengan impedansi karakteristik saluran yang diinginkan adalah 50 ohm. Tetapi sebelumnya dihitung nilai berikut ini:



Gambar 5. Microstrip Line

$$\lambda_g = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_r}} \tag{19}$$

$$H' = \frac{Z_0\sqrt{2(\epsilon_r + 1)}}{119.9} + \frac{1}{2} \left(\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \right) \left(\ln \frac{\pi}{2} + \frac{1}{\epsilon_r} \ln \frac{4}{\pi} \right) \tag{20}$$

$$\frac{w}{h} = \left(\frac{(\exp H')}{8} - \frac{1}{4 \exp H'} \right)^{-1} \tag{21}$$

Diperoleh nilai w/h yang mungkin agar $Z_0 = 50$ ohm adalah 1.912 sehingga $w = h \times 0.738 = 1.6 \text{ mm} \times 1.912 = 1.529 \text{ mm}$ kemudian setelah itu menentukan panjang λ menggunakan persamaan:

$$\lambda = \frac{\lambda_g}{\sqrt{\epsilon_r}} \left[\frac{\epsilon_r}{1 + 0.63(\epsilon_r - 1)(w/h)^{0.1255}} \right]^{1/2} \tag{22}$$

2.5 Perhitungan Komponen Pasif Penguat LNA

a. Penentuan komponen kapasitor penguat sebesar:

$$X_C \leq 0.01 R_{bias}$$

dimana R_{bias} diperoleh dari persamaan:

$$R_{bias} = \frac{964}{I_d} (1 - 0.112\sqrt{I_d}) = 47.44 \Omega$$

$X_C \leq 0.01 R_{bias} = 0.01 \times 47.44 \Omega = 0.4744 \Omega$, sehingga diperoleh:

$$C_E \geq \frac{1}{2\pi f X_C} = 100 \text{ pF}$$

b. Penentuan komponen induktor penguat sebesar:

$$L_{RFC} \rightarrow 2\pi L_f \geq R_{Bias}$$

III. PENGUKURAN & ANALISIS

3.1 Respon Frekuensi Penguat LNA

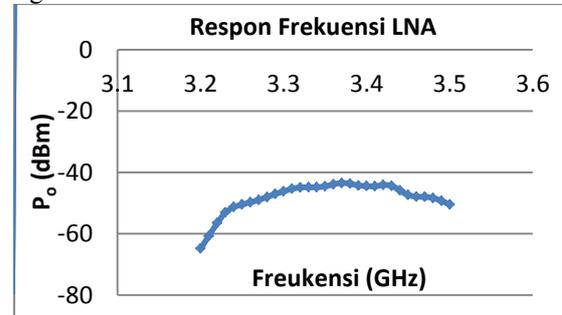
Hasil pengukuran respon LNA terhadap perubahan frekuensi masukannya seperti yang ditunjukkan tabel 1 berikut ini:

Tabel 1. Pengukuran P_o terhadap Frekuensi Input

No	Frekuensi (GHz)	P_o (dBm)	No	Frekuensi (GHz)	P_o (dBm)
1	3.2	-64.86	16	3.36	-43.88
2	3.21	-60.71	17	3.37	-43.44
3	3.22	-56.52	18	3.38	-43.66
4	3.23	-53.07	19	3.39	-44.26
5	3.24	-51.29	20	3.4	-44.46
6	3.25	-50.46	21	3.41	-44.53
7	3.26	-49.75	22	3.42	-44.07
8	3.27	-48.95	23	3.43	-44.36

9	3.28	-48.02	24	3.44	-45.9
10	3.29	-47.06	25	3.45	-47.37
11	3.3	-46.16	26	3.46	-47.91
12	3.31	-45.39	27	3.47	-47.98
13	3.32	-44.91	28	3.48	-48.33
14	3.33	-44.85	29	3.49	-49.3
15	3.34	-44.81	30	3.5	-50.48

Grafik respon frekuensi dari table 1 di atas ditunjukkan sebagai berikut:



Gambar 6. Respon Frekuensi LNA

3.2 VSWR Penguat Derau Rendah

Hasil pengukuran VSWR untuk penguat LNA ini ditunjukkan seperti gambar berikut ini:



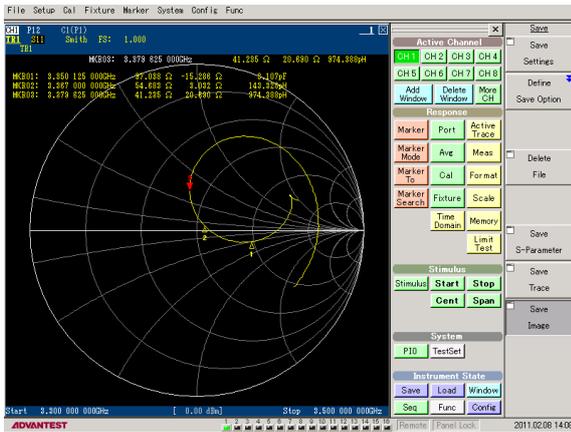
Gambar 6. Pengukuran VSWR

Dari hasil pengukuran VSWR menunjukkan :

- Marker 1, pada 3.310 GHz didapatkan SWR sebesar 4.306
- Marker 2, pada 3.350 GHz didapatkan SWR sebesar 2.423
- Marker 3, pada 3.375 GHz didapatkan SWR sebesar 1.285
- Marker 4, pada 3.390 GHz didapatkan SWR sebesar 2.156

3.3 Impedansi Penguat Derau rendah

Hasil pengukuran penyesuaian impedansi rangkaian LNA ini ditunjukkan seperti gambar berikut:



Gambar 7 Hasil Pengukuran Impedansi

Hasil pengukuran menunjukkan :

- Marker 1, pada frekuensi 3.350 GHz diperoleh $Z = 97,038 \Omega - j15,286 \Omega$
- Marker 2, pada frekuensi 3.367 GHz diperoleh $Z = 54,668 \Omega + j3,032 \Omega$
- Marker 3, pada frekuensi 3.378 GHz diperoleh $Z = 41,235 \Omega + j974,388 \Omega$

3.4 Analisis Hasil Pengukuran VSWR dan Impedansi

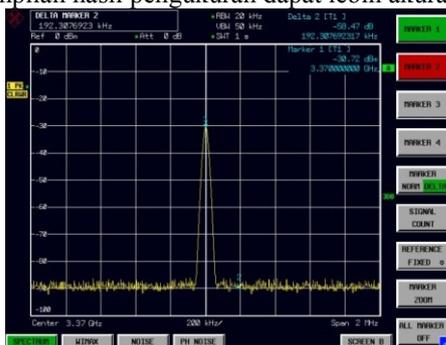
Hasil pengukuran SWR memperlihatkan nilai SWR terendah terjadi pada frekuensi 3.375 GHz yaitu sebesar 1.285. Nilai SWR pada frekuensi 3.375 MHz sudah terpenuhi sesuai dengan perancangan, hal ini menunjukkan bahwa daya yang dipantulkan sangat kecil. Jadi, pengaruh SWR adalah:

$$|\Gamma| = \frac{VSWR - 1}{VSWR + 1} = \frac{0.285}{2.285} = 0.1247$$

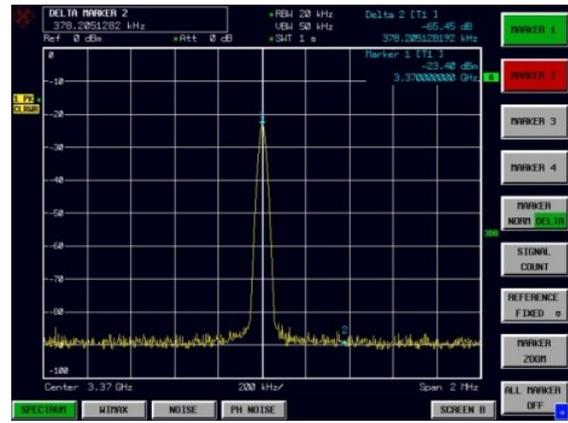
Daya yang dipantulkan sebesar $P_r = |0.1247|^2 P_{in} = 0.01555\% P_{in}$ sedangkan daya yang ditransmisikan diperoleh sebesar 98.445% P_{in} . Hal ini menunjukan bahwa Impedansi penguat mendekati 50Ω yaitu sebesar $54,668 \Omega + j3,032 \Omega$ pada frekuensi 3.367 GHz.

3.5 Noise Figure (NF)

Nilai NF diperoleh dengan terlebih dahulu melakukan tahapan pengukuran daya input (Pi), daya output (Po), noise input (Ni) dan noise output (No). Syarat utama dalam mengukur parameter ini yaitu kita harus menggunakan kabel (*feeder*) yang berkondisi baik agar tampilan hasil pengukuran dapat lebih akurat.



(a)



(b)

Gambar 8. a) Pengukuran Pi dan Ni;
b) Pengukuran Po dan No

Hasil pengukuran noise figure menunjukkan:

- $P_{i(dB)} = -30.72 \text{ dBm}$
- $N_{i(dB)} = -86.40 \text{ dBm}$
- $P_{o(dB)} = -23.40 \text{ dBm}$
- $N_{o(dB)} = -84.50 \text{ dBm}$

Setelah nilai P_i , N_i , P_o dan N_o diperoleh, maka *Gain* perangkat dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$Gain_{(dB)} = 10 \log \frac{P_o(mW)}{P_i(mW)}$$

$$= (P_{o(dBm)} - P_{i(dBm)})$$

$$= -23.40 - (-30.72) \text{ dB}$$

$$= 7.32 \text{ dB}$$

Noise Figure perangkat dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$NF_{(dB)} = 10 \log \frac{S_i / N_i}{S_o / N_o}$$

$$= 10 \log \frac{S_i(mw)}{S_o(mw)} + 10 \log \frac{N_o(mw)}{N_i(mw)}$$

$$= (-30.72 - (-23.40)) + (-84.50 - (-86.4)) \text{ dB}$$

$$= 1.58 \text{ dB}$$

Dari hasil pengukuran, pada frekuensi perancangan 3.37 GHz terjadi penguatan 7,32 dB. Wilayah frekuensi kerja dari penguat ini adalah 3.32GHz – 3.44 GHz. Penguatan terbesar terjadi pada frekuensi 3.37 GHz dikarenakan nilai VSWR pada frekuensi tersebut sangat kecil, yaitu sebesar 1,285. Dari hasil pengukuran *noise figure*, diketahui bahwa penguat yang telah direalisasikan mempunyai $NF < 2 \text{ dB}$. Dengan mengacu pada pengukuran daerah linier dan *noise figure* dapat diketahui bahwa penguat ini dapat difungsikan sebagai LNA.

3.6 Perbandingan Hasil Perancangan dan Realisasi

Dari hasil pengukuran dan perancangan perangkat, diperoleh perbandingan pada tabel berikut:

Tabel 2. Hasil Perbandingan perancangan dan realisasi LNA

Parameter	Rancangan	Realisasi	Ket.
Frekuensi Tengah	3.35 GHz	3.37 GHz	Sudah terpenuhi
Frekuensi	3.3 GHz –	3.32GHz	Sudah

Kerja	3.4 GHz	-3.44 GHz	terpenuhi
Bandwidth	BW= 100 Mhz	BW= 110 Mhz	BW terpenuhi
VSWR \leq 1,5	VSWR \leq 1,5	VSWR \leq 1,5	VSWR terpenuhi
Gain (pada 1800 MHz)	\leq 12 dB	7,36dB	Gain terpenuhi
Impedansi	$f_{3.35\text{ GHz}}: 50 \Omega$ (Resistif murni)	$f_{3.37\text{ GHz}}: 54,688 \Omega + j3,302 \Omega$	Impedansi mendekati 50 Ω ,tetapi masih memiliki nilai reaktif (kapasitif dan induktif).
NF	$<2\text{ dB}$	1.58 dB	Terpenuhi

[4] Pozar, David M. *Microwave Engineering*. 2nd Ed, JWS, Singapore. 2003

[5] Soetamso. *Jurnal Ilmiah “Rencana Penerapan Metode Pembelajaran Riset Untuk Teknik Gelombang Mikro di STT Telkom”*. Bandung. 2005

[6] Lemuel Artios L. Tobing. *Analisis Karakteristik Saluran Transmisi Mikrostrip*. Universitas Sumatera Utara. 2009.

IV. KESIMPULAN

Dari perancangan, realisasi, hingga pengukuran dapat disimpulkan:

- a) LNA yang realisasikan ini dapat bekerja pada frekuensi 3.32 GHz-3.44 GHz memiliki penguatan 7.32 dB dan *Noise Figure* 1.58 dB dengan *bandwidth* sebesar 110 MHz pada $VSWR \leq 1,5$.
- b) Hasil ukur VSWR mengalami perbedaan di setiap titik wilayah frekuensi kerja 3.32 GHz sampai dengan 3.44 GHz dimana idealnya nilai VSWR pada setiap titik tersebut bernilai sama. Hal ini disebabkan oleh perancangan yang hanya mengacu pada frekuensi tengah saja yaitu pada frekuensi 3.35 GHz.
- c) Nilai impedansi mendekati 50 Ω (impedansi koaksial) tetapi masih memiliki nilai reaktif yang besarnya $54,688 \Omega + j3,302 \Omega$
- d) Perbedaan lebar mikrostrip antara perancangan dan realisasi menyebabkan nilai impedansi karakteristik saluran tidak tepat. Hal ini dikarenakan nilai impedansi karakteristik berbanding terbalik dengan lebar mikrostrip.
- e) Nilai *noise figure* yang diperoleh menunjukkan bahwa penguat adalah katagori *low noise amplifier* dengan nilai NF dibawah 2 dB.

DAFTAR PUSTAKA

[1] *AVAGO Technology*, MGA-72543 PHEMT* Low Noise Amplifier with Bypass Switch. United State. 2009

[2] Liao, Samuel Y., *Microwave Circuit Analysis and Amplifier Design*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey. 1987

[3] Kai Chang. *RF and Microwave Circuit and Component Design for Wireless Systems*. JWS, New York, USA. 2002