

# RANCANG BANGUN LNA DENGAN *NOISE FIGURE* $\leq 2$ dB DI WILAYAH 800 MHz MENGGUNAKAN KOMPONEN PASIF DISKRIT BUATAN SENDIRI

Dwi Septiaji<sup>1</sup>, Soetamso<sup>2</sup>, Budi Prasetya<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Departemen Teknik Elektro, Institut Teknologi Telkom

<sup>1,2,3</sup>Jln Telekomunikasi No. 1, Bandung, 40275

Telp : (022) 7564108 ext. 2326, Fax: (022) 7565933

[aji\\_060986@yahoo.com](mailto:aji_060986@yahoo.com)<sup>1</sup>, [stm@ittelkom.ac.id](mailto:stm@ittelkom.ac.id)<sup>2</sup>, [bpy@ittelkom.ac.id](mailto:bpy@ittelkom.ac.id)<sup>3</sup>

## ABSTRACT

Pada proses transmisi informasi, keberadaan sebuah amplifier pada perangkat receiver merupakan hal yang sangat penting. Amplifier pada perangkat receiver berfungsi sebagai penguat daya, agar daya yang dibutuhkan terpenuhi sampai ke penerima. Akan tetapi sebuah penguat tidak hanya menguatkan sinyal informasi saja, tetapi juga sinyal noise (derau) yang ditimbulkan oleh penguat itu sendiri.

Pada penelitian ini telah dirancang dan direalisasikan sebuah prototipe Low Noise Amplifier (LNA) pada wilayah  $800 \pm 200$  MHz dengan Noise Figure  $\leq 2$  dB dan Gain  $\geq 10$  dB. LNA ini merupakan penguat stabil (satu tingkat) yang dirancang dengan menggunakan transistor yang tidak stabil (stabil bersyarat), yaitu transistor BFR 91-A yang tingkat kestabilannya harus diselidiki terlebih dahulu. Sedangkan komponen pasifnya (Induktor dan Kapasitor) sebagai penyepadan, akan direalisasikan dengan menggunakan komponen pasif diskrit (lumped element).

Untuk mengetahui kinerja LNA telah dilakukan suatu pengujian, yaitu membandingkan hasil pengukuran dengan spesifikasi perancangan. Dari hasil pengukuran, LNA yang telah dirancangkan dapat bekerja pada frekuensi 816 MHz dengan penguatan 9.02 dB dan NF 1.84 dB, hasil ini berbeda dengan perancangan yaitu pada frekuensi sekitar 800 MHz tersebut seharusnya menghasilkan penguatan sampai 10 dB. Untuk  $v_{swr} \leq 1.5$ , penguat ini dapat bekerja pada frekuensi 737 - 884 MHz atau mempunyai bandwidth sebesar 147 MHz.

**Kata Kunci:** LNA,  $800 \pm 200$  MHz, komponen diskrit

## PENDAHULUAN

Perkembangan telekomunikasi berkembang ke arah gelombang mikro (300 MHz – 300 GHz) karena mampu mentransmisikan kanal banyak dan *bandwidth* lebar serta miniaturisasi, baik yang bergerak maupun yang stasioner.

Komponen gelombang mikro dapat direalisasikan menggunakan komponen pasif (R, L, C) diskrit ( $f \leq 2000$  MHz) atau mikrostrip berkonstanta  $\epsilon_r \geq 10$  (miniaturisasi) dan  $\tan \delta$  kecil. Karena mikrostrip tersebut belum dapat dibuat oleh Indonesia dan mahal, maka akan digunakan komponen diskrit pasif buatan sendiri

Pada Penelitian ini, telah dirancang bangun sebuah prototipe *Low Noise Amplifier* (LNA) berbasis komponen diskrit pasif ber-*negative feedback* yang bekerja pada frekuensi  $800 \pm 200$  MHz sebagai salah satu komponen pembentuk perangkat *receiver* tersebut. LNA tersebut akan dirancang dengan *Noise Figure* serendah mungkin dengan *gain* yang tidak terlalu tinggi, karena sudah mencukupi untuk perangkat miniatur.

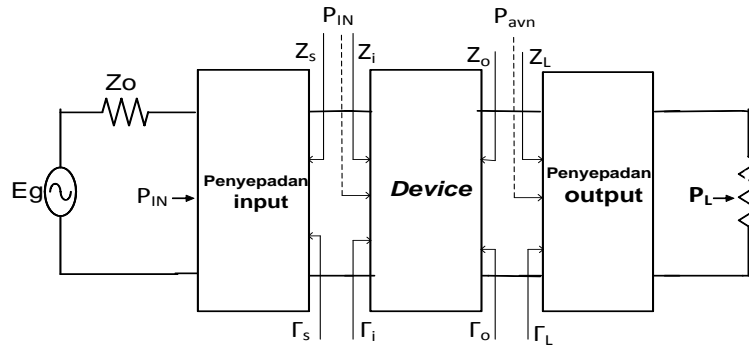
Tujuan dalam penyusunan proyek akhir ini adalah merancang bangun serta menguji prototipe Penguat Berderau Rendah (LNA) pada wilayah frekuensi 600 - 1000 MHz sehingga dihasilkan sebuah LNA berbasis komponen pasif diskrit yang ber NF rendah dan bergain memadai dan diharapkan dapat menjadi alat pembelajaran teknik gelombang mikro di IT Telkom.

Spesifikasi penguat yang dirancang bangun :

- a) Frekuensi kerja : 600 – 1000 MHz.
- b) Frekuensi tengah : 800 MHz.
- c) *Noise Figure* (NF) :  $\leq 2$  dB.
- d) *Gain* (G) :  $\geq 10$  dB (tergantung kemampuan transistor dan struktur penguat).
- e) VSWR :  $\leq 1,5$  (untuk frekuensi kerja).
- f) Impedansi ( $Z_o$ ) :  $50 \Omega$  *unbalanced*.
- g) Kelas penguat : Kelas A (*High linearity*).
- h) *Operating voltage* : + 15 Volt.
- i) Minimum daya input RF : - 80 dBm.
- j) Maksimum daya output RF : -20 dBm.

### Penguat Sinyal Lemah

Penguat gelombang mikro merupakan salah satu komponen penting dalam sistem komunikasi radio. Penggunaan penguat bertujuan agar daya yang ditransmisikan bisa diterima pada sisi yang lain dengan maksimal. Kemampuan dari suatu penguat tergantung dari karakteristik komponen yang digunakan.



Gambar 1 Diagram Umum Penguat Gelombang Mikro<sup>[9]</sup>

### Kestabilan Penguat <sup>[9]</sup>

Ada dua tipe stabilitas yaitu :

1. Stabil bersyarat ( *Conditional Stability* )

Suatu rangkaian akan stabil bersyarat jika bagian nyata dari impedansi input dan impedansi output lebih besar dari nol untuk beberapa impedansi positif nyata dari sumber dan beban pada frekuensi tertentu.<sup>[7]</sup>

2. Stabil mutlak / tanpa syarat ( *Unconditional Stability* )

Suatu rangkaian akan stabil mutlak / tanpa syarat jika bagian nyata dari impedansi input dan impedansi output lebih besar dari nol untuk semua impedansi positif nyata dari sumber dan beban pada frekuensi tertentu.<sup>[7]</sup>

Harus diperhatikan bahwa sumber nyata yang positif dan impedansi beban positif berarti  $|\Gamma_s| \leq 1$  dan  $|\Gamma_L| \leq 1$ .

Menurut Roller, kestabilan sebuah transistor dapat diketahui dengan memperhitungkan faktor kestabilan  $K$  yang dinyatakan oleh persamaan berikut ini<sup>[9,10]</sup> :

$$K = \frac{1 + |\Delta|^2 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2}{2|S_{12} \cdot S_{21}|} \quad (1)$$

dimana  $\Delta = S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}$

### Penentuan Daerah Kestabilan dari Lingkaran Kestabilan<sup>[9]</sup>

1. Lingkaran kestabilan sumber  
(Jari-jari lingkaran  $\Gamma_s$ )

$$r_s = \frac{|S_{12} \cdot S_{21}|}{|S_{11}|^2 - |\Delta|^2} \quad (2)$$

(Pusat lingkaran  $\Gamma_s$ )

$$c_s = \frac{S_{11}^* - \Delta^* S_{22}}{|S_{11}|^2 - |\Delta|^2} \quad (3)$$

2. Lingkaran Kestabilan beban  
(Jari-jari lingkaran  $\Gamma_l$ )

$$r_l = \frac{|S_{12} \cdot S_{21}|}{|S_{22}|^2 - |\Delta|^2} \quad (4)$$

(Pusat lingkaran  $\Gamma_l$ )

$$c_l = \frac{S_{22}^* - \Delta^* S_{11}}{|S_{22}|^2 - |\Delta|^2} \quad (5)$$

Kriteria Kestabilan terdiri dari :

1. Stabil :  $K > 1$  dan  $|\Delta| < 1$

a. Stabil tanpa syarat:

$$|C_s| - r_s > 1 \text{ untuk } |S_{22}| < 1$$

$$|C_l| - r_l > 1 \text{ untuk } |S_{11}| < 1$$

b. Stabil Bersyarat:

$$|C_s| - r_s < 1 \text{ untuk } |S_{22}| < 1$$

$$|C_l| - r_l < 1 \text{ untuk } |S_{11}| < 1$$

2. Tidak stabil (berpotensi stabil):

$$K > 1 \text{ dan } |\Delta| > 1$$

### Penguatan Daya Operasi ( $G_p$ )

Penguatan daya operasi suatu penguat gelombang mikro didefinisikan sebagai perbandingan daya yang diberikan ke beban ( $P_l$ ) dengan daya input pada rangkaian yang diberikan oleh sumber ( $P_{in}$ ).

$$G_p = \frac{P_l}{P_{in}} = \frac{1}{1 - |\Gamma_{in}|^2} |S_{21}|^2 \frac{1 - |\Gamma_l|^2}{|1 - S_{22}\Gamma_l|^2} \quad (6)$$

Pada kondisi stabil tanpa syarat, persamaan penguatan daya operasi dapat dituliskan ;

$$G_p = |S_{21}|^2 g_p$$

dimana :

$$g_p = \frac{1 - |\Gamma_l|^2}{|1 - S_{22}\Gamma_l|^2 - |S_{11} - \Delta\Gamma_l|^2}$$

Sedangkan pada kondisi transistor berpotensi tidak stabil/stabil bersyarat, dimana  $K < 1$  maka digunakan persamaan  $G_{ms} = \frac{|S_{21}|}{|S_{12}|}$  untuk menentukan penguatan daya stabil maksimum

( $G_{msp}$ ) sehingga dapat ditentukan nilai  $G_p < G_{msp}$  agar tetap stabil. Dari nilai  $G_p$  diperoleh :

$$g_p = \frac{G_p}{|S_{21}|^2}$$

Jari-jari lingkaran penguatan dapat diperoleh dari persamaan :

$$rp_\ell = \frac{\sqrt{(1 - 2K|S_{12} \cdot S_{21}|g_p + |S_{12} \cdot S_{21}|^2 \cdot g_p^2)}}{|1 + g_p (|S_{11}|^2 - |\Delta|^2)|} \quad (7)$$

Jarak dari pusat *Smith chart* ke pusat lingkaran adalah :

$$dp_\ell = \frac{g_p \times C_\ell^*}{|1 + g_p (|S_{22}|^2 - |\Delta|^2)|} \quad (8)$$

dimana :

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

### Lingkaran Noise Figure Konstan

Satu parameter penting dalam perancangan penguat gelombang mikro adalah faktor derau. Faktor derau didefinisikan sebagai perbandingan sinyal terhadap *noise* pada inputan dibagi dengan sinyal terhadap *noise* pada output.

$$F = \frac{S_{in}/N_{in}}{S_o/N_o} = \frac{S_{in}N_o}{S_oN_{in}}$$

$$F = F_{min} + \frac{4r_n|\Gamma_s - \Gamma_o|^2}{(1 - |\Gamma_s|^2)(1 + |\Gamma_o|^2)}$$

dimana  $\Gamma_o$  = faktor pantul sumber optimum untuk  $F_{min}$

Lingkaran faktor derau konstan untuk nilai faktor derau tertentu dapat ditentukan dengan mendefinisikan parameter faktor derau ( $N_i$ ) sebagai :

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

Pusat dan jari-jari lingkaran derau konstan diberikan oleh :

$$c_{Fi} = \frac{\Gamma_o}{1 + N_i} \quad r_{Fi} = \frac{1}{1 + N_i} \sqrt{N_i^2 + N_i(1 - |\Gamma_o|^2)} \quad (9)$$

### Penyepadan Impedansi

Satu fungsi dari suatu saluran gelombang mikro adalah sebagai penyesuai impedansi. Suatu saluran gelombang mikro dikatakan ideal bila penyaluran dalam saluran tersebut memenuhi beberapa kriteria sebagai berikut :<sup>[8]</sup>

1. Tidak ada pantulan, yaitu bila impedansi pada sumber, beban, dan impedansi karakteristiknya sepadan.
2. Terjadi pemindahan daya maksimum.
3. Tidak terjadi rugi (*loss*) selama berlangsungnya penyaluran.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Pemilihan Komponen Aktif

Komponen aktif yang digunakan dalam perancangan penguat berderau rendah ini adalah transistor BRF- 91A dengan pemilihan parameter S pada frekuensi 800 MHz ,  $V_c = 8$  Volt dan  $I_c = 5$  mA :

$$S_{11} = 0.30 \angle -138.4^\circ$$

$$S_{12} = 0.09 \angle 63.7^\circ$$

$$S_{21} = 4.30 \angle 85.7^\circ$$

$$S_{22} = 0.59 \angle -36.3^\circ$$

### Perhitungan Kestabilan

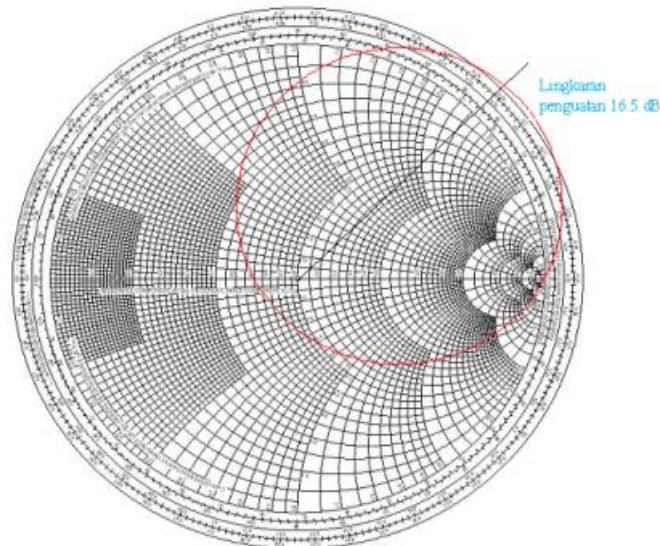
$$\Delta = 0.263 \angle -53.48^\circ; K = \frac{1 + |\Delta|^2 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2}{2|S_{12} \cdot S_{21}|} = \frac{0.631}{0.774} = 0.8152$$

### Lingkaran Penguatan

Berdasarkan Persamaan di atas maka diperoleh:

$$G_{ms} = \frac{|S_{21}|}{|S_{12}|} = \frac{4.30}{0.09} = 47.78 = 16.5 \text{ dB}; g_p = \frac{16.5}{|4.30|^2} = 0.89 \quad C_l^* = 0.627 \angle 41.81^\circ$$

$$dp_\ell = 0.447 \angle 41.81^\circ \quad rp_\ell = 0.54$$



Gambar 2 Lingkaran Penguatan  $G_m$

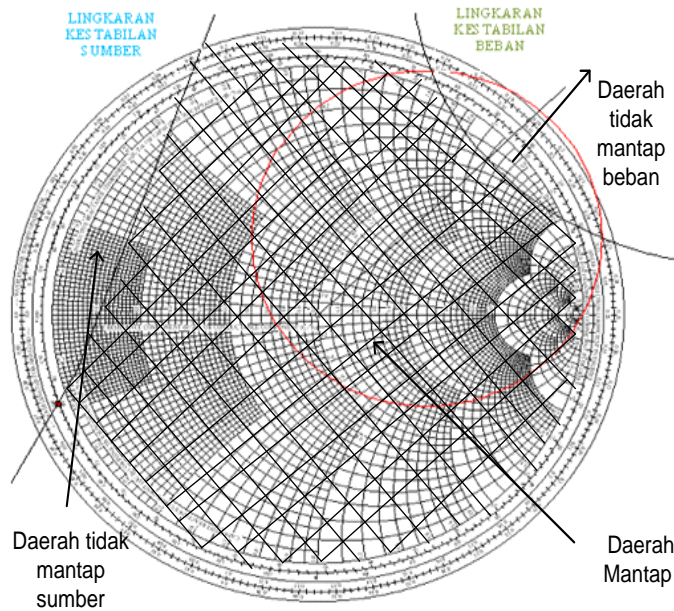
### Lingkaran Kestabilan Sumber dan Beban:

Pusat dan jari-jari lingkaran kestabilan beban :

$$C_L = 1.93 \angle 42.4^\circ; R_L = \frac{0.387}{0.278} = 1.39$$

Pusat dan jari-jari lingkaran kestabilan sumber :

$$C_S = 19.32 \angle -22.48^\circ; R_S = \frac{0.387}{0.020} = 19.35$$



**Gambar 3** Lingkaran Kestabilan

### Rangkaian Penyepadan

Untuk merealisasikan rangkaian penyepadan, terlebih dahulu kita menentukan nilai  $Z_L$  yang dapat dipilih dari sepanjang lingkaran penguatan maksimum yang masuk ke dalam daerah stabil seperti **Gambar 4**

Adapun nilai yang dipilih adalah :

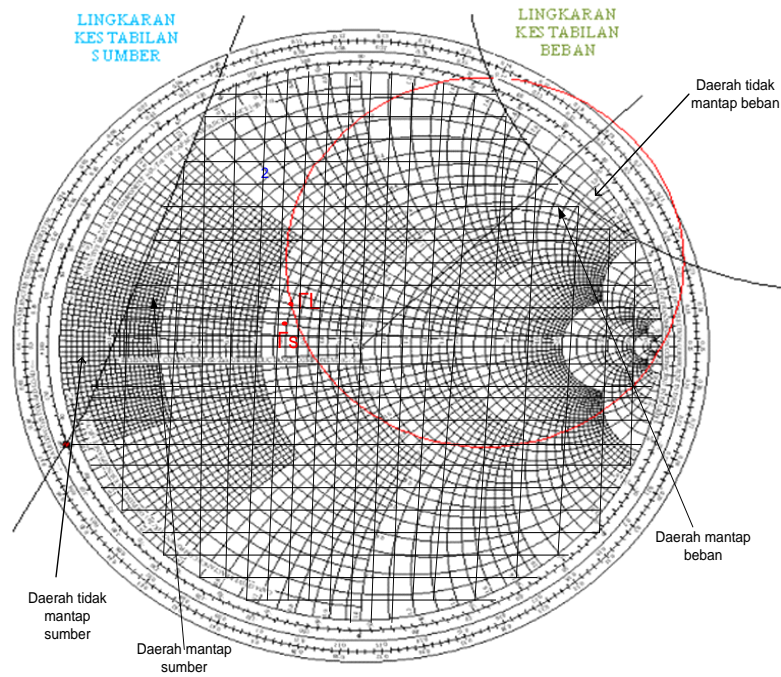
$$Z_L = 0.6 + j0.2; \Gamma_L = \frac{1 - 0.6 - j0.2}{1 + 0.6 + j0.2} = 0.227 \angle -33.68^\circ = 0.23 - j0.15$$

Dari nilai  $\Gamma_L$  yang diperoleh dapat diketahui :

$$\Gamma_S = \Gamma_{in}^* = \left( S_{11} + \frac{S_{12} \cdot S_{21} \Gamma_L}{1 - S_{22} \cdot \Gamma_L} \right)^* = 0.271 \angle 159.96^\circ$$

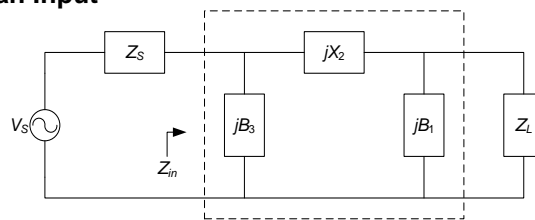
Dari gambar Smithchart dapat diketahui bahwa nilai  $\Gamma_S$  masih berada di daerah stabil, sehingga pemilihan nilai  $\Gamma_S$  dapat digunakan. Dari nilai  $\Gamma_S$  dapat diperoleh nilai  $Z_S$  :

$$Z_S = \frac{1 - 0.254 + j0.093}{1 + 0.254 - j0.093} = 0.597 \angle 11.347^\circ = 0.585 + j0.117$$



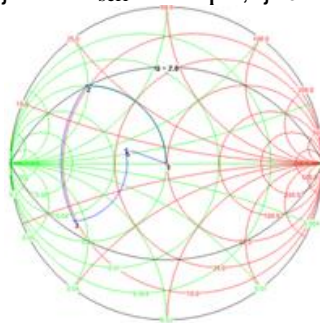
**Gambar 4** Nilai  $Z_L$  dan  $Z_S$  di Daerah Stabil / Mantap

**Rangkaian Penyepadan Input**



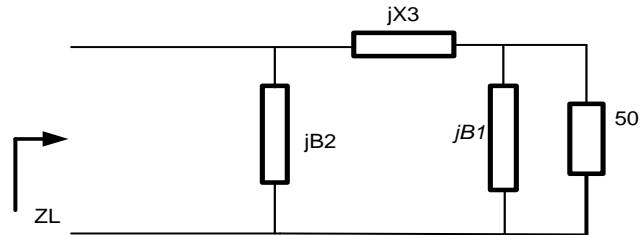
**Gambar 5** Penyepadan Input Topologi  $\Pi$

Berdasarkan **Gambar 5** dan **6**, dari nilai  $z_s = 0.585 + j0.117$  diperoleh :  
 $jB_1 \rightarrow L_{shunt} = 4.9 \text{ nH}$ ;  $jX_2 \rightarrow C_{seri} = 5.9 \text{ pF}$ ;  $jB_3 \rightarrow L_{shunt} = 3.6 \text{ nH}$



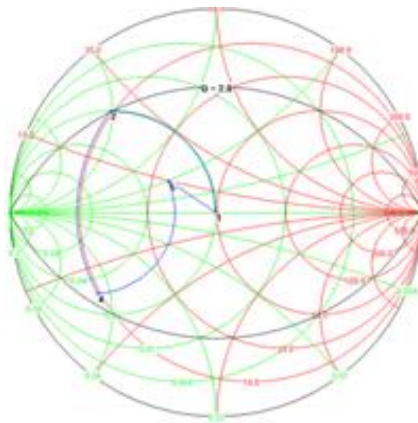
**Gambar 6** Smith chart Penyepadan Input

### Rangkaian Penyepadan Output



Gambar 7 Penyepadan Output Topologi  $\Pi$

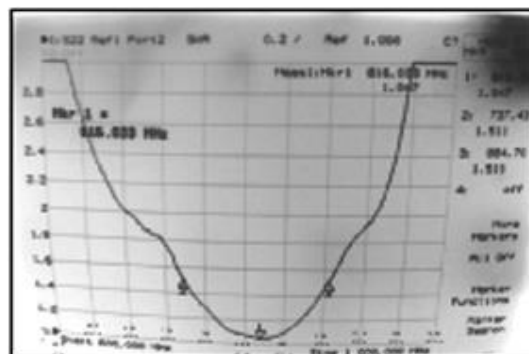
Berdasarkan Gambar 7 dan 8, dari nilai  $Z_L = 0.6 + j0.2$  diperoleh :  
 $jB_1 \rightarrow L_{shunt} = 4.9 \text{ nH}$ ;  $jX_2 \rightarrow C_{seri} = 5.7 \text{ pF}$ ;  $jB_3 \rightarrow L_{shunt} = 3.6 \text{ nH}$



Gambar 8 Smith Chart Penyepadan Output

### Pengukuran VSWR dan Impedansi

Pengukuran VSWR dan Impedansi dilakukan dengan menggunakan *Network Analyzer*. Proses pengukuran dilakukan dengan terlebih dahulu melakukan kalibrasi pada *Networ Analyzer* agar saluran yang digunakan *match* dengan port input dan output dari alat ukur.



Gambar 9 Hasil Pengukuran VSWR





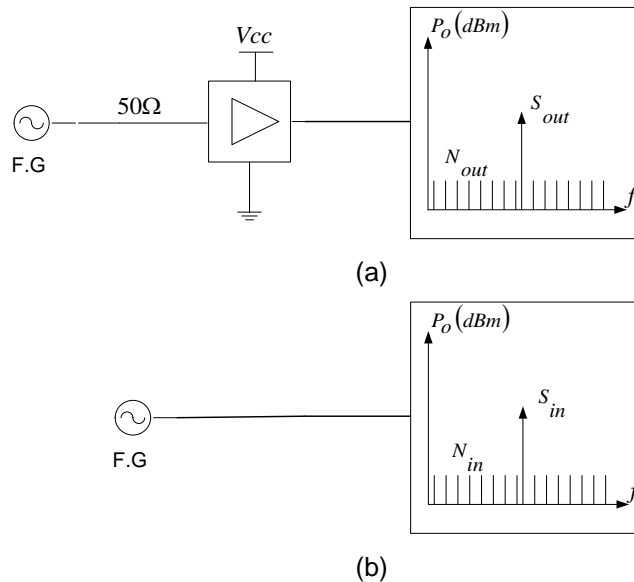
**Gambar 10** Hasil Pengukuran Impedansi

**Pengukuran Daya Input dan Daya Output**

**Tabel 1** Hasil Pengukuran Pin dan Pout Pada frekuensi 800 MHz

NO	Pin(dBm)*	Pout(dBm)**	GAIN (dB)
1	-71.32	-62.14	9.18
2	-69.55	-60.34	9.21
3	-67.86	-58.68	9.18
4	-63.76	-54.86	8.90
5	-56.32	-47.16	9.16
6	-52.48	-43.57	8.91
7	-49.20	-39.93	9.27
8	-46.82	-38.17	8.65
9	-43.13	-33.53	9.60
10	-41.33	-32.10	9.23
11	-38.44	-29.16	9.28
12	-35.77	-26.43	9.34
13	-32.86	-23.62	9.24
14	-30.57	-21.44	9.13
15	-29.45	-20.26	9.19
16	-28.06	-19.29	8.77
17	-26.46	-19.34	7.12
18	-24.08	-19.46	4.62
19	-23.58	-19.76	3.82
20	-21.25	-19.71	1.54
			gain rata-rata = 9.02 dB (Sebelum Saturasi)

### Hasil Pengukuran Noise Figure



**Gambar 11** Blok pengukuran *Noise Figure*. Pengukuran  $S_{out}$  terhadap  $N_{out}$ (a) Pengukuran  $S_{in}$  terhadap  $N_{in}$  (b)

Langkah-langkah pengukuran :

1. Function Generator (FG), LNA, dan Spectrum Analyzer dirangkai seperti Gambar 11 (a)
2. FG diset pada frekuensi yang diinginkan seperti halnya spektrum analyzer.
3. FG diset pada level keluaran tertentu sebagai sinyal masukan DUT ( $S_{in}$ ) sehingga spektrum analyzer menampilkan sinyal keluaran DUT ( $S_{out}$ ).
4. Level daya keluaran FG diturunkan hingga sinyal yang ditampilkan oleh spektrum analyzer menyamai *noise* disekitarnya. Level daya yang terbaca pada spektrum merupakan *noise* keluaran ( $N_{out}$ ).
5. Lepaskan LNA, kemudian hubungkan FG dan SA seperti Gambar 11 (b).
6. Atur level daya keluaran FG pada  $S_{in}$  sehingga SA menampilkan level daya masukan ( $S_{in}$ ) kemudian turunkan level daya keluaran FG hingga sinyal yang ditampilkan SA menyamai *noise* disekitarnya. Level daya yang terbaca merupakan *noise* masukan ( $N_{in}$ ).

Setelah nilai  $S_{in}$ ,  $N_{in}$ ,  $S_{out}$  dan  $N_{out}$  diperoleh, maka *Noise Figure* perangkat dapat dihitung dengan menggunakan persamaan :

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

$$= (P_{i(dbm)} - P_{o(dbm)}) + (N_{o(dbm)} - N_{i(dbm)})$$

Dari hasil pengukuran diperoleh :

**Tabel 2** Hasil Pengukuran *Noise Figure*

Po (dBm)	-47,67
No (dBm)	-64,33
Pi (dBm)	-52,83
Ni (dBm)	-71,33

$$\begin{aligned} \text{Sehingga } NF_{(dB)} &= (-52,83 - (-47,67)) + (-64,33 - (-71,83)) \\ &= 1.84 \text{ dB} \end{aligned}$$

## KESIMPULAN

1. Dari hasil pengukuran, LNA yang telah dirancang bangun dapat bekerja pada frekuensi 816 MHz dengan penguatan 9,02 dB dan *Noise Figure* 1,84 dB. Hasil ini berbeda dengan perancangan yaitu pada frekuensi 800 MHz seharusnya menghasilkan penguatan minimal 10 dB.
2. *Bandwidth* yang didapatkan pada batas  $V_{SWR} \leq 1,5$  pada proyek akhir ini sebesar 147 MHz dengan prosentase *bandwidth* 18,375 %. Sehingga *bandwidth* yang didapatkan pada proyek akhir ini hanya 36,75 % dari *bandwidth* spesifikasi sebesar 400 MHz.
3. Nilai impedansi LNA pada saat  $V_{SWR \text{ minimum}}$  yaitu pada frekuensi 816,03 MHz sebesar  $(49,84 - j 2,35) \Omega$  masih bersifat kapasitif.

Untuk dapat menghasilkan perangkat LNA yang baik maka parameter-parameter utama yang harus diperhatikan saat melakukan perancangan awal adalah frekuensi kerja penguat, kestabilan komponen, *noise figure* yang diinginkan serta kemampuan penguatan maksimum dari transistor yang digunakan. Bahan atau substrat yang digunakan untuk mikrostrip sangat mempengaruhi hasil perancangan. Untuk pembuatan alat atau broadband aktif frekuensi tinggi, harus digunakan substrat yang memiliki kemampuan tinggi dan data-data yang akurat misalnya besarnya redaman. Faktor yang menyebabkan bergesernya wilayah frekuensi kerja penguat adalah tingkat akurasi pembuatan jalur mikrostrip yang tidak dapat diabaikan untuk frekuensi tinggi serta penggunaan nilai kapasitor dan induktor yang tidak sesuai dengan hasil perancangan penyepadan impedansi, nilai induktor yang dibuat hanya didasarkan pada teori praktis disebabkan keterbatasan alat ukur LCR meter.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Aris Dwiyanto, Soetamso, Th.Tearalangi. *Rancang Bangun Penguat Berderau Rendah Dengan Noise Figure  $\leq 2$  dB Wilayah  $2000 \pm 500$  MHz*, STT TELKOM.2007.
- [2] Bahl, Inder. *Lumped Elements for RF and Microwave Circuits*, Artech House, Inc. Canton Street, Norwood. 2003.
- [3] Bowick, Christ; *RF Circuit Design*, 1982.
- [4] Chang, Kai. *Microwave Solid-State Circuits And Applications*, JWS.1994.
- [5] Chang, Kai. *RF and Microwave Circuit and Component Design for Wireless Systems*. JWS, New York, USA. 2002.
- [6] Collin, Robert E., "*Foundations for Microwave Engineering*", Mc Graw Hill Book Company, 2<sup>nd</sup> Ed, 1992.
- [7] Ibrahim. *Perancangan dan Realisasi Penguat Daya Untuk Frekuensi Kerja 1,5 GHz*. STT Telkom. Bandung. 1996.
- [8] Liao, Samuel Y., *Microwave Circuit Analysis and Amplifier Design*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey. 1987.
- [9] Pozar, David M. *Microwave Engineering*. 2<sup>nd</sup> Ed, JWS, Singapore. 2003.
- [10] Soetamso. *Diktat Kuliah Teknik Gelombang Mikro*. STT Telkom Bandung. 2004.
- [11] Soetamso. *Jurnal Ilmiah "Rencana Penerapan Metode Pembelajaran Riset Untuk Teknik Gelombang Mikro di STT Telkom"*. Bandung. 2005.
- [12] Team Dosen Elkom. *Diktat Elektronika Komunikasi*. STT Telkom. Bandung. 2004.
- [13] Tearalangi T. *Diktat Kuliah Teknik Gelombang Mikro*. STT Telkom Bandung. 2003.
- [14] Fooks, E H., dan R A Zakarevicius. *Microwave Engineering Using Microstrip Circuit*. Prentice Hall, Inc. 1990.
- [15] Orfanindis, J Sophocles. *Electromagnetic Wave and Antennas*. Rutger University. 2004.