

Perancangan Penyearah RF untuk Pemanenan Energi Elektromagnetik pada *Band* GSM 900 MHz

Enceng Sulaeman, Nabila Wardah

Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Bandung
Jl. Gegerkalong Hilir Ds. Ciwaruga, Bandung 40012, Indonesia
enceng.sulaeman@polban.ac.id

Abstrak

Penyearah RF yang merupakan bagian dari *rectenna* dapat menangkap radiasi gelombang RF dari BTS lalu diubah menjadi tegangan DC. Tegangan DC yang dihasilkan dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi untuk perangkat dengan daya rendah. Pada tulisan ini dibahas mengenai perancangan dan realisasi penyearah RF untuk pemanenan energi dari gelombang elektromagnetik yang berhambur tidak terpakai. Penyearah RF ini bekerja pada frekuensi GSM 900 MHz *downlink*. Rangkaian penyearah RF ini dibuat menggunakan dioda HSMS tipe 2850 yang disusun dengan metode pengganda tegangan bertingkat untuk menggandakan tegangan keluaran yang relatif kecil. Penyearah RF ini disusun dengan 5 tingkat pengganda tegangan. Berdasarkan hasil pengukuran didapatkan keluaran tegangan sebesar 1,2 V dengan level daya -1,1 dBm dengan efisiensi sebesar 1,56 %.

Kata Kunci: pemanenan energi, penyearah RF, pengganda tegangan, *clamper*

Abstract

RF rectifier which is part of *rectenna* can capture RF wave radiation from BTS, then converted to DC voltage. The generated DC voltage can be used as an energy source for low power devices. This paper discusses the design and realization of RF rectifier for harvesting energy from unused scattered electromagnetic waves. This RF rectifier works on the GSM 900 MHz *downlink* frequency. This RF rectifier circuit is made using HSMS diode type 2850 which is arranged by a multistage voltage multiplier method to double the relatively small output voltage. This RF rectifier is arranged with 5 stages of voltage multipliers. Based on the measurement results obtained an output voltage of 1.2 V with a power level of -1.1 dBm with an efficiency of 1.56%.

Keywords: energy harvesting, RF rectifier, voltage doubler, *clamper*

I. PENDAHULUAN

Rectenna (*rectifying antenna*) adalah sebuah teknologi yang digunakan untuk mengubah energi gelombang elektromagnetik ke daya DC. *Rectenna* adalah alat yang paling penting dalam pemanenan energi gelombang elektromagnetik [1], [2]. Kemampuan *rectenna* mengubah energi gelombang elektromagnetik menjadi daya DC dinyatakan dengan efisiensi yaitu besaran yang menyatakan seberapa besar daya *radio frequency* (RF) pada gelombang elektromagnetik diubah menjadi daya DC [3]. *Rectenna* terdiri dari dua bagian, yaitu antena dan penyearah RF. Antena berfungsi menerima gelombang elektromagnetik yang

dayanya sangat kecil, dalam orde microwatt, sedangkan penyearah RF berfungsi menyearahkan sinyal RF yang diterima menjadi tegangan DC. Antena dan penyearah RF dihubungkan oleh rangkaian penyesuai impedansi. Jadi, perancangan sebuah *rectenna* dapat dibagi menjadi perancangan antena, penyesuai impedansi, dan penyearah.

Ada beberapa teknik yang telah dilakukan untuk meningkatkan efisiensi penyearah RF. Parna, dkk. merancang penyearah RF menggunakan penyearah jembatan beserta penyesuai impedansi yang direalisasikan dengan saluran mikrostrip [3]. Issam, dkk. merancang penyesuai impedansi menggunakan komponen reaktif dan pengganda tegangan yang dilanjutkan dengan penyearah [4]. Rengalakshmi,

dkk merancang penyearah RF sebagai *charger* untuk elektronika medis [5]. M. A. Rosli, dkk. merancang penyearah RF untuk pemanenan energi pada frekuensi 900-2400 MHz [6]. Optimisasi tingkatan-tingkatan pengganda tegangan diteliti oleh Kavuri, dkk. [7]. Mansour dan Haruichi merancang dan mengimplementasikan sebuah rangkaian penyearah yang kompak dan berukuran kecil pada frekuensi 2,45 GHz [8]. Terakhir, Toth merancang penyearah RF yang efisien untuk pemanenan energi dan diaplikasikan pada *wireless dosimetry* [9].

Pada tulisan ini dibahas masalah perancangan dan realisasi penyesuai impedansi dan penyearah RF untuk pemanenan energi elektromagnetik pada frekuensi GSM 900 MHz. Frekuensi GSM 900 MHz dipilih karena BTS untuk frekuensi ini memancarkan daya yang lebih besar daripada frekuensi yang lain. Dengan demikian sensitivitas komponen yang digunakan diharapkan mampu menerima daya yang kecil.

II. METODE PENELITIAN

Penyearah RF yang dirancang terdiri dari penyesuai impedansi topologi L dengan komponen reaktif LC dan pengganda tegangan yang terdiri dari rangkaian *clammer* dan rangkaian penyearah, yang tersusun dari dioda dan kapasitor.

A. Rangkaian Penyesuai Impedansi

Penyesuai impedansi 2 elemen berbentuk seperti huruf L, karenanya disebut penyesuai impedansi topologi L. Ada dua penyesuai impedansi topologi L, seperti pada Gambar 1. $Z_L = R_L \pm jX_L$ adalah impedansi beban, $Z_S = R_S \pm jX_S$ impedansi sumber, dengan R_L dan R_S adalah masing-masing resistansi beban dan sumber. X_L dan X_S adalah reaktansi beban dan sumber. X_i , $i = 1, 2$, dst. adalah reaktansi seri dari penyesuai impedansi (Ω), dan B_i adalah suseptansi paralelnya (S) dari rangkaian penyesuai impedansi. Komponen penyesuai yang lebih dekat dengan impedansi beban diberi indeks 1, dan yang lebih dekat dengan sumber, diberi indeks 2. Gambar 1(a) berlaku untuk $R_L < R_S$ dan topologi pada Gambar 1(b) untuk $R_L > R_S$. Untuk topologi pada Gambar 1(a), elemen-elemen penyesuai impedansi diberikan oleh

$$X_1 = -X_L \pm R_L Q \quad (1)$$

$$B_2 = \frac{X_S \pm R_S Q}{R_S^2 + X_S^2} \quad (2)$$

dengan

$$Q = \sqrt{\frac{R_S}{R_L} - 1 + \frac{X_S^2}{R_S R_L}} \quad (3)$$

Sedangkan, untuk Gambar 1(b),

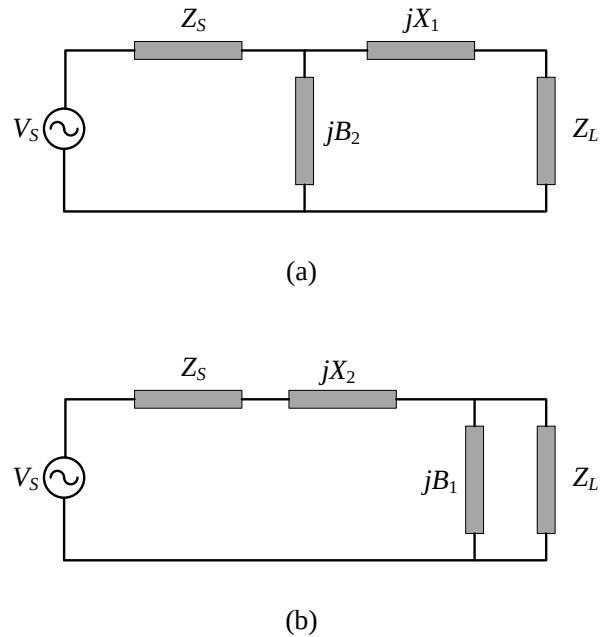
$$B_1 = \frac{X_L \pm R_L Q}{R_L^2 + X_L^2} \quad (4)$$

$$X_2 = -X_S \pm R_S Q \quad (5)$$

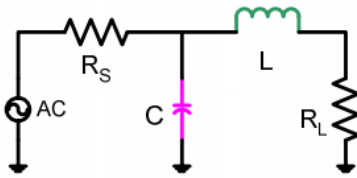
$$Q = \sqrt{\frac{R_L}{R_S} - 1 + \frac{X_L^2}{R_S R_L}} \quad (6)$$

Jika komponen seri berupa induktor dan komponen paralel kapasitor, maka penyesuai impedansi bersifat *lowpass filter* (LPF), jika sebaliknya bersifat *highpass filter* (HPF).

Metode yang digunakan dalam perancangan penyesuai impedansi adalah *lumped* elemen yaitu kapasitor dan induktor yang disusun secara topologi L. Langkah-langkah melakukan penyesuaian adalah dengan mencari impedansi masukan dari rangkaian penyearah dan impedansi sumber. Untuk menentukan besar kapasitor dan induktor, digunakan diagram Smith. Pada Gambar 2, rangkaian dipasang kapasitor secara paralel dan induktor secara seri, sehingga rangkaian *matching* bersifat *lowpass*.



Gambar 1. Penyesuai impedansi topologi L: (a) untuk $R_L < R_S$, (b) untuk $R_L > R_S$



Gambar 2. Rangkaian *matching* topologi L

B. Dioda Schottky

Rangkaian utama untuk penyearah RF adalah dioda yang disusun membentuk pengganda tegangan, karenanya rangkaian penyearah ini terdiri dari *clamper* dan penyearah. Dioda yang digunakan adalah dioda Schottky karena memiliki *drop* tegangan yang rendah dan kecepatan *switching* yang tinggi. Dengan demikian, dioda ini memiliki kerugian daya yang rendah. Dioda Schottky memiliki *drop* tegangan antara 0,15 – 0,45 V [10]. Akibat *drop* tegangan yang rendah menghasilkan *switching* yang lebih cepat dan efisien.

Berbeda dengan dioda pada umumnya, dioda Schottky hanya menggunakan bahan semikonduktor tipe N yang disambung dengan bahan logam atau tipe P yang disambung dengan logam. Dioda Schottky memiliki karakteristik yang berbeda seperti daerah frekuensi kerja, kecepatan *switching*, hingga tegangan yang lebih rendah dari pada dioda silikon atau germanium. Perbedaan yang paling penting antara sambungan P-N dengan dioda Schottky adalah pada proses baliknya waktu pemulihan, ketika beralih dari keadaan tidak menghantarkan ke keadaan menghantarkan dan sebaliknya.

C. Clamper

Rangkaian *clamper* digunakan untuk menempatkan puncak positif atau negatif sinyal pada level yang diinginkan [11]. Rangkaian *clamper* terdiri dari dioda, kapasitor, dan resistor yang dihubungkan seperti diperlihatkan pada Gambar 3. Ada dua jenis rangkaian *clamper* yaitu *clamper* positif dan *clamper* negatif. Gambar 3 memperlihatkan sebuah rangkaian *clamper* negatif. Cara kerja rangkaian tersebut adalah sebagai berikut.

Pada setengah periode positif, untuk $0 \leq t \leq T/2$, dioda akan dalam keadaan ON sehingga dioda tersebut menjadikan resistor hubung singkat. Akibatnya konstanta waktu $\tau = RC$ menjadi sangat kecil (resistensi rangkaian ditentukan oleh resistansi inheren dioda) sehingga kapasitor akan dimuati hingga tegangan dengan cepat. Pada setengah periode ini tegangan keluaran $v_o = 0$ V.

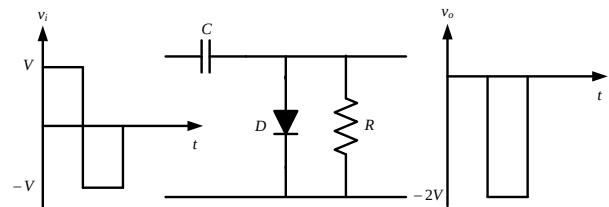
Ketika tegangan masukan berpindah menjadi negatif, dioda akan OFF dan merupakan rangkaian hubung terbuka. Sekarang konstanta waktu $\tau = RC$

cukup besar pada setengah periode $T/2 \leq t \leq T$, dapat diasumsikan tidak ada pengosongan muatan semula pada kapasitor, karenanya tegangan keluaran sekarang menjadi $v_o = -2V$, seperti diperlihatkan pada Gambar 3 tersebut. Jika arah dioda dibalik, maka akan menjadi rangkaian *clamper* positif dengan tegangan keluaran $v_o = 2V$.

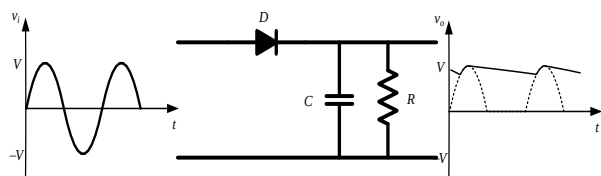
D. Rangkaian Penyearah

Penyearah berfungsi mengubah sinyal AC (*Alternating Current*) menjadi sinyal DC (*Direct Current*) atau sinyal searah. Komponen utama dari sebuah penyearah adalah dioda. Untuk penyearah setengah gelombang ideal diperlihatkan pada Gambar 4.

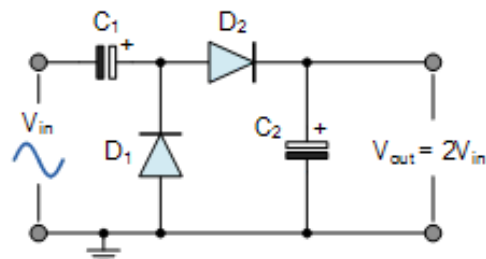
Pada periode positif, dioda ON sedangkan pada periode negatif OFF sehingga keluaran dioda menjadi seperti diperlihatkan pada Gambar 4. R dan C berfungsi sebagai LPF dan berguna untuk menyearahkan sinyal keluaran. Konstanta waktu $\tau = RC$ harus cukup besar untuk menjamin kerataan sinyal DC yang dihasilkan. Gambar 5 adalah gabungan antara *clamper* dan penyearah yang digunakan sebagai penyearah RF, tanpa resistor.



Gambar 3. Rangkaian *clamper* positif sebagai pengganda tegangan



Gambar 4. Penyearah setengah gelombang



Gambar 5. Pengganda tegangan sebagai penyearah RF

Penyearah RF yang dirancang diharapkan memiliki spesifikasi sebagai berikut:

- Frekuensi kerja : 947 MHz
- tegangan *output* : $\geq 1,2$ V
- Jenis rangkaian : *Voltage Doubler*

Perancangan rangkaian penyearah bertujuan untuk mendapatkan spesifikasi yang diinginkan. Untuk mengoptimalkan rangkaian penyearah, dikaji jenis-jenis dioda yang digunakan, jumlah *stage voltage doubler*, besar resistansi beban.

Berdasarkan spesifikasi tersebut, maka dipilihlah dioda Schottky HSMS 2850 dengan karakteristik sebagai berikut:

- Tegangan *threshold* 0,15 V
- *Junction capacitance* 0,18 pF
- Resistansi seri 25 Ω
- Arus balik 3 μ A
- Daya RF masukan < -20 dBm
- Frekuensi $< 1,5$ GHz
- TTS (*Typical Tangential Sensitivity*) – 57 dBm

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

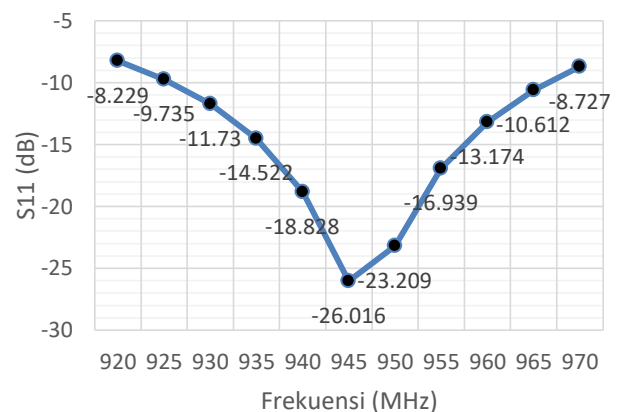
A. Simulasi Menggunakan ADS

Untuk memperoleh hasil yang baik, perancangan dilakukan dengan simulasi, yaitu menggunakan *software* ADS (lisensi: SERVER DESKTOP-OA4KTSF C8D3FF6BC82B DAEMON agilesofd USE_SERVER) sebagai alat bantu untuk mensimulasikan hasil perancangan rangkaian penyearah sebelum akhirnya direalisasikan. Simulator ini dibutuhkan agar dalam tahapan realisasi tidak terlalu banyak dilakukan perbaikan-perbaikan yang pada akhirnya menambah biaya fabrikasi. Simulasi dilakukan untuk pengganda tegangan sekaligus dengan rangkaian penyesuai impedansinya. Untuk pengganda tegangan satu tingkat skema simulasi diperlihatkan pada Gambar 6. Gambar tersebut memperlihatkan skema rangkaian penyesuai impedansi dan penyearah satu tingkat untuk simulasi pada ADS. Rangkaian penyesuai

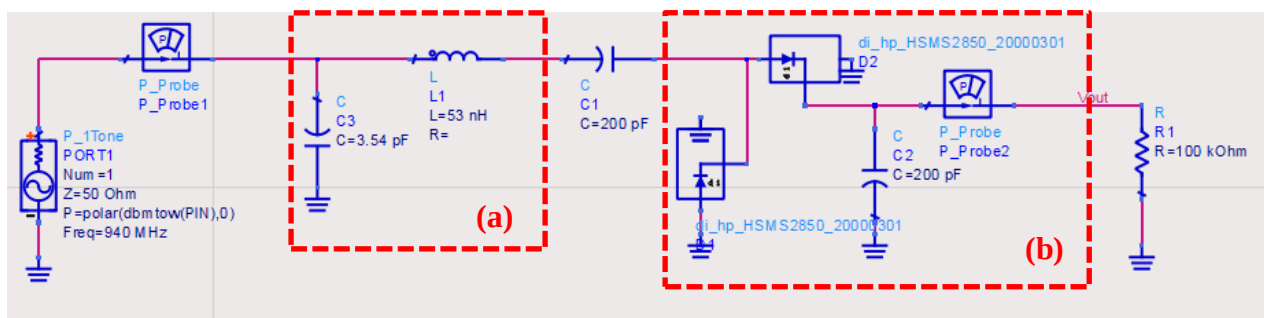
impedansi diperlihatkan dengan tanda garis terputus (a), sedangkan rangkaian penyearah satu tingkatnya ditandai dengan garis terputus (b).

Hasil *return loss* yang memperlihatkan kadar kesesuaian antara impedansi sumber dan impedansi penyearah diperlihatkan pada Gambar 7. Dari Gambar 7 terlihat bahwa rangkaian penyesuai sudah bekerja dengan baik, yaitu *return loss* 26 dB ($S_{11} = -26$ dB) pada frekuensi 945 MHz. Dengan nilai *return loss* 26 dB, koefisien pantulnya adalah $S_{11} = 10^{-26/20}$ atau 0,05. Daya yang dipantulkan kembali ke sumber oleh beban adalah $0,05^2$ dari daya yang diberikan oleh sumber atau 0,25% dari daya yang diberikan sumber.

Penentuan tingkat pengganda tegangan didasarkan dari efisiensi keseluruhan rangkaian sebagai penyearah. Simulasi dilakukan untuk beberapa tingkat penyearah. Tabel 1 memperlihatkan efisiensi pada simulasi hingga delapan tingkat penyearah. Dari Tabel 1 tersebut terlihat bahwa efisiensi tidak bertambah dengan bertambahnya tingkat penyearah. Efisiensi paling tinggi diperoleh untuk jumlah tingkat 5. Dengan demikian, pada penelitian ini di gunakan jumlah tingkat penyearah adalah 5.



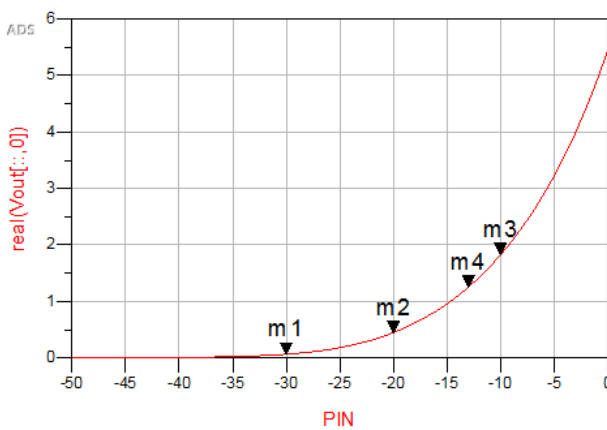
Gambar 7. Respon *return loss* rangkaian penyesuai impedansi



Gambar 6. Simulasi penyearah RF satu tingkat

Tabel 1. Efisiensi penyearah RF untuk berbagai tingkat penyearah

Jumlah Stage	RL (Ω)	Minimal daya untuk mencapai 1,2 V (dBm)	Efisiensi
1	100 k	-7	8.5%
2	100 k	-11	21%
3	100 k	-13	29%
4	100 k	-13	33%
5	100 k	-13	35%
6	100 k	-13	33%
7	100 k	-13	33%
8	100 k	-13	31%

**Gambar 8. Tegangan keluaran DC dari hasil simulasi sebagai fungsi daya RF masukan**

Pada penyearah 5 tingkat diperoleh nilai komponen penyesuai impedansi $C = 10,5$ pF dan $L = 12,7$ nH.

B. Hasil Simulasi Tegangan Keluaran

Data hasil simulasi tegangan keluaran (V_{out}) untuk penyearah RF 5 tingkat sebagai fungsi daya RF masukan (P_{IN}) diperlihatkan pada Gambar 8. Grafik tersebut menunjukkan tegangan keluaran DC naik dengan naiknya daya RF masukan. Pada daya masukan -30 dBm tegangan keluarannya sebesar $0,063$ V, diberikan dengan penanda m_1 . Untuk daya masukan -10 dBm tegangan keluaran yang didapat sebesar $1,8$ V, ditandai dengan m_3 . Sesuai dengan spesifikasi penyearah bertegangan keluaran sebesar $1,2$ V dibutuhkan daya masukan RF minimal -13 dBm, pada grafik diberi tanda m_4 .

C. Hasil Simulasi Efisiensi Penyearah

Efisiensi rangkaian menunjukkan besar daya yang digunakan untuk mencapai hasil yang diharapkan. Untuk menghitung besar efisiensi dari

rangkaian konversi RF-DC digunakan rumus sebagai berikut:

$$\eta = \frac{P_{DC}}{P_{RF}} \quad (7)$$

$$P_{DC} = \frac{V_{DC}^2}{R_L} \quad (8)$$

dengan,

P_{DC} : Daya Output DC

P_{RF} : Daya RF yang Diterima

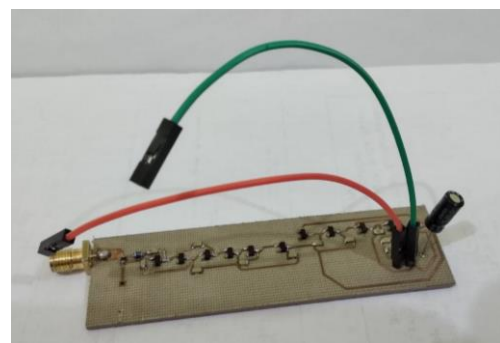
V_{DC} : Tegangan Output DC

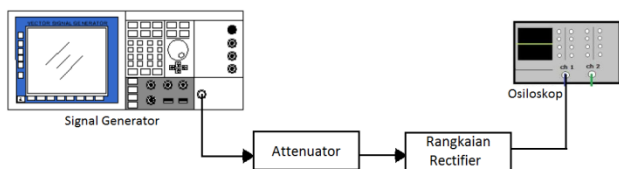
R_L : Resistansi Pada Output

Tabel 3 menunjukkan nilai efisiensi rangkaian terhadap daya masukan RF hasil simulasi. Terlihat dari tabel tersebut, bahwa efisiensi naik dengan naiknya daya masukan RF. Tetapi, jika daya masukan RF terlalu besar, efisiensi kembali turun, meskipun tegangannya naik.

Tabel 2. Pengukuran efisiensi yang dilakukan pada simulasi

Daya input (dBm)	Daya input (mW)	Output DC (V)	Efisiensi
-30	0,0010	0,063	3,9 %
-25	0,0032	0,18	10 %
-22	0,0063	0,316	15,8 %
-20	0,01	0,446	19,8 %
-19	0,0125	0,525	22 %
-18	0,0158	0,615	23,9 %
-17	0,0199	0,716	25,7 %
-16	0,0251	0,83	27,4 %
-15	0,0316	0,956	28,9 %
-14	0,0398	1,097	30,2 %
-13	0,05	1,252	31,3 %
-12	0,063	1,424	32,1 %
-11	0,079	1,614	32,9 %
-10	0,1	1,823	33,2 %
-8	0,158	2,306	33,6 %
-5	0,316	3,221	32,8 %
-2	0,63	4,43	31,1 %
0	1	5,448	29,6 %

**Gambar 9. Realisasi penyearah RF dengan 5 tingkat pengganda tegangan**



Gambar 10. Set up pengukuran penyearah RF

Tabel 3. Tegangan keluaran tiap tingkat penyearah

Tingkatan voltage double	Output DC pengukuran (V)
1	0,36
2	0,454
3	0,928
4	1,46
5	1,986

Tabel 4. Hasil pengukuran tegangan keluaran sebagai fungsi daya RF masukan

Daya input (dBm)	Daya yang diterima (mW)	Output DC yang terukur (mV)
0,97	1,25	1986
-1,87	0,65	1330
-2,6	0,55	1080
-3,56	0,44	952
-4,68	0,34	780
-5,68	0,27	678
-6,9	0,2	554
-7,95	0,16	452
-9,2	0,12	360
-10,45	0,09	294
-12,2	0,06	230

Berdasarkan hasil simulasi tersebut, maka direalisasikan penyearah RF dengan 5 tingkat pengganda tegangan dengan nilai komponen penyesuai impedansi berupa pendekatan. Berdasarkan nilai komponen yang ada di pasaran, diperoleh $L = 12,5 \text{ nH}$ dan $C = 10 \text{ pF}$ dengan resistansi beban $100 \text{ k}\Omega$. Alat yang dirancang diperlihatkan pada Gambar 9.

D. Pengukuran Output DC

Pada tahap ini dilakukan pengukuran tegangan output DC pada rangkaian penyearah RF pada frekuensi sesuainya. Rangkaian penyesuai tidak dapat diukur tersendiri, tetapi dicari dengan cara mengatur frekuensi di sekitar frekuensi yang diinginkan pada daya masukan tertentu dan dilihat tegangan keluarannya yang paling besar. Alat ukur yang digunakan adalah sinyal generator dengan frekuensi yang dapat diatur. Sebagai sumber daya RF, powermeter digunakan untuk mengukur daya yang diberikan oleh sumber dengan atenuator untuk menjadikan daya keluaran RF dapat divariabelkan.

Tabel 5. Efisiensi penyearah RF sebagai fungsi daya masukan RF

Daya yang diterima		Output DC terukur (V)	Efisiensi (Pengukuran)
dBm	mW		
0,97	1,25	1,986	3,15 %
-1,87	0,65	1,33	2,72 %
-2,6	0,55	1,08	2,12 %
-3,56	0,44	0,952	2,06 %
-4,68	0,34	0,78	1,78 %
-5,68	0,27	0,678	1,7 %
-6,9	0,2	0,554	1,53 %
-7,95	0,16	0,452	1,27 %
-9,2	0,12	0,36	1,08 %
-10,45	0,09	0,294	0,96 %
-12,2	0,06	0,23	0,88 %

Tegangan DC keluaran dapat diukur menggunakan osiloskop atau voltmeter. Set up pengukuran tegangan keluaran dari penyearah RF diperlihatkan pada Gambar 10.

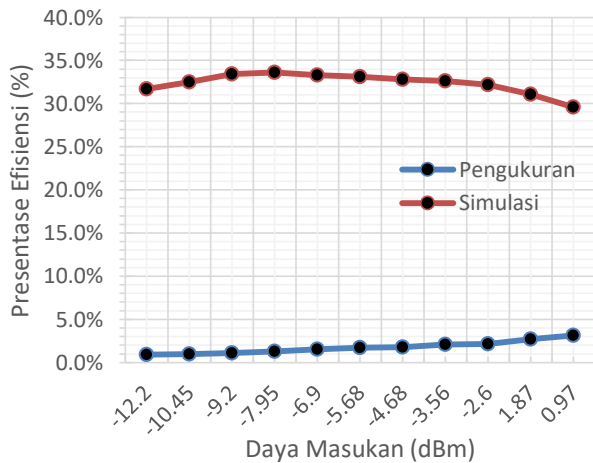
Dari hasil pengukuran ternyata diperoleh frekuensi yang menghasilkan tegangan keluaran terbesar adalah 920 MHz, bukan pada 947 MHz. Dengan demikian untuk memperoleh hasil yang terbaik, maka pengukuran dilakukan pada frekuensi 920 MHz. Pengukuran tegangan keluaran dilakukan selain pada keluaran penyearah RF, juga dilakukan pada tiap tingkat pengganda tegangan dengan daya masukan 0,97 dBm. Hasilnya diperlihatkan pada Tabel 3.

Dari Tabel 3 di atas terlihat bahwa tegangan keluaran DC tiap tingkat tidak seperti yang diharapkan, yaitu dua kali tegangan tingkat sebelumnya. Hal ini terjadi mungkin karena tegangan *threshold* yang tidak sama untuk tiap dioda. Jika dilihat dari hasil tersebut, hanya pengganda tingkat ketiga yang hasil tegangannya dua kali tingkat kedua. Pengganda tegangan yang lain tidak demikian.

Hasil pengukuran tegangan keluaran penyearah RF 5 tingkat sebagai fungsi dari daya masukan RF diperlihatkan pada Tabel 4. Dari Tabel 4 terlihat sistem penyearah RF untuk catu daya sebesar 1,2 V bekerja apabila diberikan daya masukan minimal -1,1 dBm.

E. Pengukuran Efisiensi Penyearah

Pengukuran ini dilakukan dengan menghitung efisiensi dari nilai yang didapatkan pada saat pengukuran. Tabel 5 menunjukkan hasil pengukuran efisiensi alat. Dengan menggunakan perhitungan efisiensi penyearah RF dihitunglah persentase efisiensi. Efisiensi terbesar yang didapatkan saat pengukuran sebesar 3,15 % pada saat daya masukan 0,97 dBm, sedangkan efisiensi



Gambar 11. Grafik pengukuran efisiensi penyearah

saat tegangan keluaran 1,3 V sebesar 2,72 %. Gambar 11 memperlihatkan perbandingan efisiensi alat antara simulasi dan pengukuran.

F. Analisis

Pada pengukuran tegangan keluaran diperoleh tegangan sebesar 1,986 V untuk *input* daya sebesar 0,97 dBm. Tegangan *output* alat naik seiring ditambahkannya *input* daya pada alat. Untuk memperoleh tegangan *output* $\geq 1,2$ V sesuai dengan spesifikasi alat, maka diperlukan *input* daya sekitar $-1,87$ dBm. Nilai ini masih jauh dari yang diharapkan. Jika digabung dengan antenna, maka alat ini tidak dapat berfungsi karena daya masukan dari antenna lebih kecil dari $-1,87$ dBm.

Keadaan ini terjadi kemungkinan besar karena penyesuai impedansi yang tidak bekerja sebagaimana mestinya. Terlihat dari hasil pengukuran, selain frekuensinya bergeser, juga keluaran tegangan pada tingkat pertama sangat kecil yaitu hanya 0,36 V. Kesulitannya adalah respon *return loss* dari penyesuai impedansi ini tidak dapat diukur karena sudah bergabung dengan rangkaian pengganda tegangan.

Ada dua hal yang menyebabkan rangkaian penyesuai impedansi tidak bekerja dengan baik, yaitu nilai komponen penyesuai atau impedansi pengganda tegangan yang tidak akurat, baik tiap tingkat maupun keseluruhan, yang tidak sesuai dengan yang ada di simulasi. Selain rangkaian penyesuai impedansi, kemungkinan lain yang menyebabkan penyearah RF ini tidak bekerja dengan baik adalah tidak semua tingkat pengganda tegangan berfungsi dengan baik. Terlihat dari hasil pengukuran tiap tingkat dari pengganda tegangan. Dari Tabel 3 dapat dilihat bahwa tegangan untuk satu tingkat tidak dua kali lipat dari tegangan tingkat sebelumnya. Hal ini dapat disebabkan diodanya yang tidak bekerja atau tegangan

threshold untuk tiap dioda tidak sama sehingga hasilnya tidak sesuai dengan yang diharapkan.

IV. KESIMPULAN

Perancangan dan pengukuran penyearah untuk sistem penyearah RF pada GSM 900 MHz telah berhasil dilakukan. Tegangan keluaran $\geq 1,2$ V diperoleh jika daya masukan $\geq -1,1$ dBm dengan efisiensi maksimum 2,3%. Rangkaian penyesuai impedansi tidak bekerja dengan baik, sedangkan pengganda tegangan sudah bekerja dengan baik. Kekurangan pada perancangan ini diakibatkan oleh tidak bekerjanya rangkaian penyesuai impedansi. Hal ini dikarenakan tidak diketahuinya impedansi masukan pengganda tegangan, sehingga rangkaian penyesuai impedansi hanya mengandalkan hasil simulasi. Oleh sebab itu disarankan untuk menghitung impedansi masukan dari pengganda tegangan untuk berbagai tingkat pengganda tegangan supaya rangkaian penyesuai impedansi dapat dirancang dengan benar.

REFERENSI

- [1] S. Jinwoo, S. Mihui, C. Junho, S. Joonho, and C. Changyul, "A Compact and Wideband Circularly Polarized Rectenna with High Efficiency at X-Band," *Electromagnetics Research*, vol. 145, pp. 163-173, 2014.
- [2] H. Wen, Z. Biao, C. Xing, H. Kama, and L. Changjun, "Study on an s-band rectenna array for Wireless microwave power transmission", *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 135, pp. 747-758, 2013.
- [3] K. Parna, A. Juin, and M. Kaushik, "Design of an Efficient Penyearah Circuit for RF Energy Harvesting System", *International Journal of Advanced Engineering and Management*, Vol. 2, No. 4, pp. 94-97, 2017.
- [4] C. Issam, F. Ahmed, and K. Olf, "Enhanced Passive RF-DC Converter Circuit Efficiency for Low RF Energy Harvesting", *Sensors*, vol. 17, p. 546, 2017.
- [5] P. Rengalakshmi and R. Brinda, "Rectifier for RF Energy Harvesting", *International Journal of Computer Applications* (0975 – 8887), vol. 143, No. 10, pp. 14-17, 2016.
- [6] M. A. Rosli, S. A. Z. Murad, and R. C. Ismail, "A 900-2400 MHz AC-DC Rectifier Circuit for Radio Frequency Energy Harvesting", *MATEC Web of Conferences* 78 01096, pp. 1-7, 2016.
- [7] K. K. A. Devi, N. M. Din, and Chandan Kumar Chakrabarty, "Optimization of the Voltage Doubler Stages in an RF-DC Converter Module for Energy Harvesting", *Circuits and Systems*, vol. 3, pp. 216-222, 2012.

- [8] M. M. Mansour and H. Kanaya, "Compact RF Penyearah Circuit for Ambient Energy Harvesting", *RFIT conference paper*, pp. 220-222, 2017.
- [9] S. Toth, "An Efficient RF Rectifier for Energy Harvesting Systems with Applications to Wireless Dosimetry", *Thesis Master of Applied Science in Electrical Engineering*, University Ottawa, 2014.
- [10] T. Elektronika, "Pengertian Penyearah (Penyearah Gelombang) dan Jenis-jenisnya," 2015.[Online].Available: <https://teknikelektronika.com/> [Diakses Mei 2019].
- [11] R. L. Boylestad and L. Nashelsky, *Electronic Devices and Circuit Theory*, 11th ed., R.M. Anthony, Ed., New Jersey, America: Prentice Hall, 2012.