Disain dan Implementasi *Rectifier Antenna* Untuk Jaringan 4G LTE

Asriyadi^a*, Mohammad Fadhli^a, Ali Nurdin^a

^a Politeknik Negeri Sriwijaya, Jln. Sriwijaya Negara Bukit Besar Palembang 30139

*Email : asriyadi@polsri.ac.id

(Diterima 11 November 2020; Disetujui 18 Juli 2021; Dipublikasikan 15 Oktober 2021)

Abstrak

Perangkat teknologi telekomunikasi yang menggunakan wireless sebagai media pembawa sinyal dapat menjadi sumber gelombang elektromagnetik yang dapat dimanfaatkan. Di sisi lain, kebutuhan energi listrik berdaya rendah semakin meningkat di masa depan. Gelombang elektromagnetik dapat digunakan untuk memperoleh energi listrik berdaya rendah melalui teknologi *radio frequency* (RF) *harvesting*. Salah satu bagian sistem dalam teknologi RF *harvesting* adalah *rectifier antenna* (rectenna) perangkat yang mengkonversi energi gelombang menjadi energi listrik, sehingga memungkinkan transmisi daya secara *wireless*. Pada penelitian ini, dilakukan perancangan dan implementasi rectenna menggunakan antena mikrostrip untuk menerima gelombang elektromagnetik dari jaringan 4G-LTE 1,8 GHz, yang kemudian dikonversi menjadi keluaran DC berdaya rendah. Perangkat rectenna yang dibuat terdiri dari rangkaian *rectifier* yang diintegrasikan dengan antena mikrostrip. Rancang bangun rectenna dilakukan dengan memperhitungkan parameter *voltage standing wave ratio* (VSWR), *return loss*, *gain*, dan pola radiasi. Selain itu, dilakukan pula beberapa pengujian berupa pengukuran efisiensi, sensitivitas, dan pengujian lapangan. Hasil pengujian yang dilakukan menunjukan bahwa nilai VSWR diperoleh sebesar 1,6, *return loss* sebesar -11,7 dB, *gain* sebesar 3,2 dBi, dan radiasi diketahui berpola *omnidirectional*. Pengukuran efisiensi menunjukkan bahwa daya input tertinggi diperoleh sebesar 2 dBm dengan efisiensi sebesar 46,94%. Nilai ini akan meningkat apabila daya input ditambah. Pengukuran sensitivitas pada rectenna menunjukkan nilai output 0,2 mV untuk nilai input power paling kecil sebesar -80 dBm. Pengujian lapangan menunjukkan nilai maksimum tegangan yang dihasilkan adalah 270 mV untuk jarak 37 m dan nilai minimum yang diperoleh adalah 81 mV untuk jarak 300 m.

Kata kunci: rectenna, LTE, 4G, microstrip.

1. Latar Belakang

Perkembangan teknologi komunikasi saat ini mengalami kemajuan yang sangat pesat dengan ditandai semakin banyaknya perangkat teknologi yang memanfaatkan media *wireless* sebagai media transmisi. Diantara perangkat tersebut adalah ponsel, *radio frequency identification* RFID, dan lain sebagainya [1]. Teknologi telekomunikasi yang menggunakan media *wireless* sebagai pembawa sinyal informasi dapat menjadi sumber dari gelombang elektromagnetik, sehingga menyebabkan gelombang elektromagnetik ini melimpah di lingkungan sekitar manusia [2]. Banyak sinyal-sinyal *radio frequency* (RF) lain yang tidak diketahui berasal dari militer, polisi, pemerintah dan radio amatir. Sinyal-sinyal RF ini selalu tersedia setiap saat, dan menjadi sumber yang bebas untuk digunakan [3]. Seiring dengan hal tersebut, energi listrik berdaya rendah yang semakin meningkat di masa depan juga semakin tinggi. Hal ini mendorong upaya untuk memperoleh energi listrik melalui

teknologi RF *harvesting* dan gelombang elektromagnetik sebagai objek energi tersebut [4].

RF *energy harvesting* merupakan teknologi berkembang yang dimanfaatkan untuk mengurangi atau mengeliminasi ketergantungan sebagian besar perangkat-perangkat *wireless* dan rangkaian terintegrasi berdaya rendah yang memiliki sumber daya kabel atau sumber daya nonotomatis. Dengan perpaduan antena yang benar, pencocokkan rangkaian, serta perbaikan rangkaian dan perangkat penyimpanan energi, energi RF yang tersedia dapat digunakan untuk memberi daya pada (sebagian atau seluruhnya) perangkat nirkabel [5].

Penggunaan transmisi *wireless* digunakan untuk menjangkau beban tanpa kabel sehingga dibutuhkan suatu teknologi yang sering disebut *wireless power transmission* (WPT) yang merupakan transmisi energi secara *wireless*. Salah satu dari bentuk teknologi tersebut adalah *rectifier antenna* (rectenna), yang merupakan salah satu teknologi WPT yang berguna untuk mengatasi permasalahan tersebut [6][7].

Rectenna merupakan perpaduan dari dua kata yang berbeda yaitu *rectifier* dan *antenna*. *Rectifier* berfungsi untuk mengkonversi energi RF menjadi tegangan DC, sedangkan antenna (jenis mikrosstrip) berfungsi untuk menerima energi RF. Radiasi gelombang elektromagnetik yang berasal dari berbagai perangkat seperti *access point* (AC), Wifi atau *base transceiver station* (BTS) dapat menjadi sumber tegangan untuk perangkat lain tanpa baterai [8]. Tegangan DC keluaran dari rectenna mampu untuk menjalankan beban listrik seperti sensor, kapal tanpa awak, LED dan lain-lain [9][10].

Penelitian ini dilakukan dalam tiga tahapan. Tahap pertama adalah perancangan rectenna dan tahap kedua adalah simulasi menggunakan software CST Suite 2016. Dua tahap ini dilakukan pada di laboratorium. Tahapan terakhir pada penelitian adalah pengujian di lapangan.

2. Rancang Bangun Alat

Dalam penelitian ini, perancangan alat dilakukan dalam beberapa tahapan sebagai berikut.

2. A. Penentuan Parameter Antena

Tahapan awal perancangan antenna adalah menentukan parameter antenna yang diinginkan. Parameter yang dimaksud adalah frekuensi, *return loss*, VSWR, gain dan pola radiasi. Selain itu, pada perancangan ini, digunakan juga substrat Epoxy-FR4 dengan konstanta dielektrik 4,3 dan ketebalan substrat 1.6 mm.

Tabel 2.1 menyajikan spesifikasi parameter antenna yang telah ditentukan. Dari data ini, akan dilakukan simulasi menggunakan Simulator CST Suite 2016 untuk memperoleh *layout* gambar antenna yang sesuai dengan spesifikasi yang dibuat.

Table 2.1. Spesifikasi parameter antenna

Parameter	Spesifikasi
Frekuensi	1,8 GHz
Rentang Frekuensi	1,6 – 1,8 GHz
<i>Return Loss</i>	≤ 10 dB
Pola Radiasi	<i>omnidirectional</i>
VSWR	≤ 2
Gain	≤ 2 dB

2. B. Perhitungan Dimensi Antena dan Simulasi Rancangan Antena

Dimensi antenna merupakan hal yang perlu diperhatikan sebelum melakukan rancangan dan simulasi menggunakan *software* Simulator CST

Suite 2016. Dalam menentukan dimensi antenna, terdapat beberapa bagian antenna yang perlu dihitung yaitu bagian *patch*, bagian *ground plane*, dan bagian lebar pencatu. Perhitungan ini digunakan untuk menetapkan panjang dan lebar bagian-bagian tersebut. Berikut ini adalah perhitungan panjang dan lebar dari masing-masing bagian tersebut.

2. B. 1. Bagian Patch

Patch adalah bagian yang terletak paling atas dari antenna dan terbuat dari bahan konduktor. Sebelum menghitung panjang *patch*, terlebih dahulu dihitung lebar *patch*, W_p , menggunakan

$$\begin{aligned}
 W_p &= \frac{c}{2f_0 \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}} \\
 &= \frac{3 \times 10^8}{2 \times 18 \times 10^8 \sqrt{\frac{(4,3 + 1)}{2}}} \\
 &= 51,2 \text{ mm}
 \end{aligned} \quad (1)$$

Selanjutnya, ϵ_{reff} dihitung dengan persamaan

$$\begin{aligned}
 \epsilon_{reff} &= \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W_p} \right]^{-\frac{1}{2}} \\
 &= \frac{4,3 + 1}{2} + \frac{4,3 - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{1,6}{51,2} \right]^{-\frac{1}{2}} \\
 &= 4,05
 \end{aligned} \quad (2)$$

Setelah nilai ϵ_{reff} diperoleh, pertambahan panjang *patch*, ΔL , dihitung dengan persamaan berikut

$$\begin{aligned}
 \Delta L &= 0,412 h \frac{(\epsilon_{reff} + 0,3) \left(\frac{W_p}{h} + 0,265 \right)}{(\epsilon_{reff} - 0,258) \left(\frac{W_p}{h} + 0,8 \right)} \\
 &= 0,412 \times 1,6 \frac{(4,05 + 0,3) \left(\frac{51,2}{1,6} + 0,265 \right)}{(4,05 - 0,258) \left(\frac{51,2}{1,6} + 0,8 \right)} \\
 &= 0,733
 \end{aligned} \quad (3)$$

Selanjutnya, panjang *patch* efektif, L_{eff} , dihitung dengan

$$\begin{aligned}
 L_{eff} &= \frac{c}{2f_0 \sqrt{\epsilon_{reff}}} \\
 &= \frac{3 \times 10^8}{2 \times 18 \times 10^8 \sqrt{4,05}} \\
 &= 41,4 \text{ mm}
 \end{aligned} \quad (4)$$

Akhirnya, panjang *patch*, L_p , diperoleh melalui

$$\begin{aligned} Lp &= L_{eff} - 2\Delta L \\ &= 41,4 - 2(0,733) \\ &= 39,94 \text{ mm} \end{aligned} \quad (5)$$

2. B. 2. Bagian Groundplane

Groundplane adalah lapisan paling bawah yang berfungsi sebagai reflektor yang menentukan sinyal yang tidak diinginkan. Panjang, Lg , dan lebar, Wg , *groundplane* dihitung dengan persamaan

$$\begin{aligned} Lg &= 6(1,6) + 39,94 \text{ mm} \\ &= 6h + Lp \\ &= 49,54 \text{ mm} \end{aligned} \quad (6)$$

Dan

$$\begin{aligned} Wg &= 6h + Wp \\ &= 6(1,6) + 51,2 \\ &= 60,8 \text{ mm} \end{aligned} \quad (7)$$

2. B. 3. Bagian Lebar Pencatu

Panjang pencatu L_f dihitung dengan persamaan

$$\begin{aligned} L_f &= \frac{Wp}{2} \\ &= \frac{51,2}{2} \\ &= 25,6 \text{ mm} \end{aligned} \quad (8)$$

Untuk mendapatkan nilai lebar pencatu, terlebih dahulu dihitung nilai Z_0 dan nilai B dengan

$$\begin{aligned} Z_0 &= \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{reff}}} \ln \left[\frac{8h}{W} + \frac{W}{4h} \right] \\ &= \frac{60}{\sqrt{4,05}} \ln \left[\frac{8(1,6)}{51,2} + \frac{51,2}{4(1,6)} \right] \\ &= 63,30 \Omega \end{aligned} \quad (9)$$

dan

$$\begin{aligned} B &= \frac{60\pi^2}{Z_0\sqrt{\epsilon_r}} \\ &= \frac{60\left(\frac{22}{7}\right)^2}{63,30\sqrt{4,3}} \\ &= 4,51 \text{ mm} \end{aligned} \quad (10)$$

Akhirnya, nilai Wf diperoleh dengan persamaan

$$\begin{aligned} Wf &= \frac{2h}{\pi} \left[B - 1 - \ln(2B - 1) \right. \\ &\quad \left. + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \{\ln(B - 1)\} \right. \\ &\quad \left. + 0,39 - \frac{0,61}{\epsilon_r} \right] \\ &= \frac{2 \times 1,6}{\left(\frac{22}{7}\right)} \left[4,64 - 1 \right. \\ &\quad \left. - \ln(2(4,51) - 1) \right. \\ &\quad \left. + \frac{4,3 - 1}{2,4,3} \{\ln(4,51 - 1)\} + 0,39 \right. \\ &\quad \left. - \frac{0,61}{4,3} \right] \\ &= 2,05 \text{ mm} \end{aligned} \quad (10)$$

Dari perhitungan yang telah dilakukan, diperoleh dimensi antenna yang akan digunakan untuk membuat desain antenna (Tabel 1). Nilai yang diperoleh ini akan dijadikan acuan dalam desain antenna dengan menggunakan *software* CST Studio Suite 2016.

Tabel 1. Nilai hasil perhitungan dimensi antenna

Variabel	Deskripsi	Ukuran
Wp	Lebar Patch	51,2 mm
ϵ_{reff}	Permittivitas efektif substrat	4,05
Lp	Panjang Patch	39,94 mm
Lg	Panjang Groundplane	49,54 mm
Wg	Lebar Groundplane	60,8 mm
ϵ_r	Permittivitas relatif substrat	4,3
H	Tebal Substrat	1,6 mm
Z_0	Impedansi Pencatu	63,30 Ω
Wf	Lebar Saluran Pencatu	2,05 mm
Lf	Panjang Saluran Pencatu	25,6 mm
P	Panjang PCB	10,5 cm
L	Lebar PCB	10 cm

Gambar 1. Antena tampak depan

Gambar 2. Antena tampak belakang

Gambar 1 dan 2 merupakan hasil simulasi perancangan antenna dengan menggunakan *simulator CST Studio Suite 2016*. Gambar 1 menunjukkan hasil simulasi antenna tampak depan sedangkan Gambar 2 adalah simulasi tampak belakang.

C. Perancangan Rectifier

Rangkaian *rectifier* atau penyearah gelombang, pada umumnya, menggunakan dioda sebagai komponen utamanya. Gambar 3 menunjukkan rancangan rangkaian *rectifier* yang akan diaplikasikan kepada antenna *omnidirectional*.

Rangkaian penyearah terdiri dari *low pass filter* (LPF), rangkaian penyearah (*rectifier*), rangkaian pengali tegangan (*voltage doubler*), dan beban. LPF digunakan sebagai tapis frekuensi agar nilai yang masuk sesuai dengan frekuensi resonansi yang digunakan, yaitu 1,8 GHz. Selain itu, perangkat ini juga berfungsi sebagai penyesuai impedansi antara antenna dan rangkaian penyearah. Rangkaian LPF terdiri dari komponen C_m 1 nF dan L_m 18 nH terhubung secara seri-paralel.

D. Perakitan Rectifier dan Antena

Tahapan terakhir dari penelitian ini adalah perakitan rectenna yang merupakan penggabungan antara *rectifier* dan antenna *rectifier* yang telah dibuat dengan menambahkan beberapa komponen kemudian disambungkan ke antenna *microstrip* yang telah dipabrikan menggunakan kabel. Gambar 4 menunjukkan sketsa perakitan rectenna.

Setelah perakitan dilakukan, didapatkan perangkat rectenna seperti Gambar 5. Untuk

Gambar 3. Rancangan rangkaian *rectifier*

Gambar 4. Sketsa perakitan rectenna

Gambar 5. Hasil perakitan rectenna

memastikan bahwa rectenna dapat bekerja dengan baik, pengujian awal perlu dilakukan.

E. Prinsip Kerja

Antena digunakan untuk menangkap gelombang elektromagnetik di alam. Gelombang elektromagnetik yang telah diubah oleh antenna menjadi sinyal listrik *alternating current* (AC) diterima oleh rangkaian penyearah. Rangkaian penyearah digunakan sebagai pengubah sinyal listrik AC menjadi sinyal listrik DC. Rangkaian penyearah ini terdiri dari LPF, rangkaian penyearah, rangkaian pengali tegangan (*voltage doubler*), dan beban.

Rangkaian yang digunakan terdiri dari dioda sebagai penyearah dan kapasitor *bypass*. Dioda yang digunakan adalah dioda *schottky* (IN60), dioda ini cocok digunakan untuk frekuensi tinggi dan dapat mendeteksi sinyal listrik AC dengan daya rendah. Rangkaian dioda ini dihubungkan dengan LPF oleh kapasitor (C_s) 1 pF. Pengali tegangan digunakan untuk menaikkan tegangan DC yang dihasilkan oleh penyearah. Pada rangkaian terakhir digunakan kapasitor *bypass* (C_p) 1 pF yang dihubungkan secara paralel dengan beban RL. Kapasitor *bypass* berfungsi untuk melewatkan sinyal sisa *ripple* yang ada, sehingga semua sinyal DC dapat dimaksimalkan ke RL. beban RL ini nanti akan dirubah-rubah nilainya untuk melihat pengaruh perubahan beban terhadap tegangan DC yang dihasilkan.

3. Hasil dan Pembahasan

3. A. Pengukuran VSWR, Return Loss, Gain dan Pola Radiasi

3. A. 1. Pengukuran VSWR

Pengukuran VSWR dilakukan untuk mengetahui kinerja dari suatu antenna. Nilai VSWR berbeda-beda untuk tiap frekuensi sehingga untuk menganalisis VSWR dilakukan dengan melihat *range* frekuensi yang dikehendaki. Antena dapat bekerja dengan optimal pada *range* frekuensi dengan nilai VSWR = 1 atau tidak ada pantulan sama sekali. Akan tetapi, antena dengan *range* frekuensi dengan nilai VSWR < 1,5 masih bisa dikatakan bekerja dengan optimal.

Gambar 6 adalah grafik VSWR hasil simulasi antena. Pada grafik tersebut, terlihat bahwa hasil pengukuran antena dengan simulasi pada frekuensi 0,8–2,2 GHz telah memiliki nilai VSWR dibawah 2, yaitu 1,32 untuk frekuensi 1,05 GHz dan 1,4975 untuk frekuensi 1,575 GHz. Selanjutnya, Gambar 7 menunjukkan frekuensi 1,8 GHz memiliki VSWR sebesar 1,6.

Berdasarkan kedua data tersebut, dapat dilihat bahwa antara VSWR dengan hasil pengukuran dengan hasil simulasi tidak sepenuhnya mirip. Namun, pada frekuensi kerja yang diinginkan, yakni 1,8 GHz, hasil yang diperoleh mendekati simulasi.

Adanya ketidaksesuaian bisa dikarenakan kurang *match*-nya impedansi input beban (antena) dengan saluran transmisi serta distribusi arus yang

Gambar 6. VSWR antenna hasil simulasi

Gambar 7. VSWR antenna hasil pengukuran

Gambar 8. Return loss hasil simulasi

Gambar 9. Return loss hasil pengukuran

tidak efisien untuk frekuensi yang rendah atau bisa juga dikarenakan permitivitas bahan yang tidak sesuai dengan *datasheet*-nya.

3.A.2. Return Loss

Pengukuran *return loss* pada antena dimaksudkan untuk mengetahui besar daya yang kembali ke saluran transmisi. Pada penelitian ini spesifikasi awal yang ingin dicapai adalah VSWR < 2 sehingga *return loss* yang diharapkan < -10 dB. Berikut ini adalah hasil pengukuran *return loss*.

Gambar 8 adalah grafik *return loss* hasil simulasi antena. Pada grafik tersebut terlihat bahwa antena pada frekuensi 1-2,4 GHz telah memiliki nilai VSWR dibawah -10 dB.

Gambar 9 merupakan hasil pengukuran *return loss* antena mikrostrip *rectangular patch* diatas menunjukkan frekuensi 1,8 GHz memiliki nilai *return loss* dibawah -10 dB yaitu -11,783 dB sehingga dapat dikatakan bahwa antena dapat bekerja dengan baik pada frekuensi yang telah diinginkan.

Gambar 10. Gain hasil simulasi

3. A. 3. Gain

Gambar 10 merupakan hasil simulasi yang menunjukkan bahwa antenna mikrostrip *rectangular patch* memiliki nilai *gain* yang bernilai positif sebesar 2.808 dB.

Berdasarkan hasil pengukuran pola radiasi antenna mikrostrip *rectangular patch* frekuensi 1,8 GHz, nilai *gain* antenna dapat dihitung sebagai berikut

$$\begin{aligned} \text{Gain} &= (\text{gain antenna yang diukur pada sudut } 0^\circ - \\ &\quad \text{gain antenna referensi}) + \text{gain} \\ &= (-40,10) - (-33,30) + 10 \\ &= 3,2 \text{ dBi} \end{aligned}$$

Dari pengujian data tersebut, dapat disimpulkan bahwa *gain* antenna adalah 3,2 dBi dengan jarak 1 m dari pemancar dari 0° sampai dengan 360° . Pada Tabel 2, disajikan nilai *gain* hasil ukur dan simulasi untuk frekuensi 1,8 GHz.

Tabel 2 Gain pada frekuensi 1,8 GHz

Gain (hasil ukur)[dBi]	3,2
Gain (simulasi) [dB]	2,808

3. A. 4. Pola Radiasi

Gambar 11 menunjukkan pola radiasi antenna *omnidirectional* namun dengan arah pola radiasi lebih cenderung ke arah sisi kiri antenna. Sebagaimana yang ditunjukkan pada Tabel 3, sinyal yang di pancarkan melebar atau kuat pada arah 0° sampai 60° untuk posisi vertikal dan 40° sampai 190° untuk posisi horizontal, sedangkan pada 230° sampai dengan 360° , pola radiasinya menyempit untuk posisi horizontal dan didapatkan 270° sampai 350° untuk posisi sinyal yang menyempit. Pada posisi sudut 360° , keduanya kembali seperti sudut 0° .

Gambar 11. Pola radiasi hasil simulasi

Tabel 3. Hasil pengukuran pola radiasi pada frekuensi 1,8 GHz

Posisi Sumber Signal ($^\circ$)	Pembacaan Spectrum Analyzer untuk Horizontal Position (-dBm)	Pembacaan Spectrum Analyzer untuk Vertikal Positon (-dBm)
0	-40,10	-40,00
10	-45,10	-45,10
20	-46,60	-48,30
30	-49,00	-48,00
40	-51,10	-46,60
50	-53,70	-46,50
60	-54,40	-47,70
70	-53,00	-47,70
80	-49,80	-48,20
90	-47,20	-47,20
100	-49,50	-47,00
110	-49,50	-47,00
120	-48,70	-46,10
130	-48,30	-44,40
140	-48,80	-47,20
150	-49,00	-50,00
160	-49,10	-49,30
170	-50,00	-50,20
180	-45,10	-51,10
190	-47,90	-51,10
200	-47,00	-49,90
210	-48,30	-47,50
220	-50,00	-48,30
230	-55,50	-51,10
240	-57,70	-52,20
250	-57,00	-53,20
260	-57,30	-52,00
270	-55,40	-53,30
280	-54,00	-53,30
290	-57,00	-54,40
300	-55,20	-50,00
310	-54,10	-49,90
320	-49,30	-48,80
330	-48,80	-48,00
340	-47,20	-45,10
350	-47,20	-44,00
360	-40,10	-40,00

3. B. Pengukuran Efisiensi

Pengukuran efisiensi dilakukan untuk mengetahui berapa besar kemampuan rectenna melakukan konversi dari RF ke DC. Parameter konfigurasi untuk mendapatkan nilai efisiensi ditunjukkan pada Tabel 4. Pada tabel ini disajikan nilai DC *output* yang diterima oleh rectenna dengan *input power* antara -15–2 dBm. Hasil pengukuran pada tabel tersebut memberikan gambaran bahwa

semakin besar nilai *input power* yang masuk ke rectenna, semakin besar juga nilai *output DC* yang diperoleh.

Tabel 4. Tabel DC output

<i>Input Power (dBm)</i>	<i>DC out (mV)</i>
-15	24,7
-10,2	55,7
-12,2	85,5
-12,0	155,1
-6,5	239,1
-5,2	346
-4,7	448
-4	622,1
-3	794,3
-2	1178
-1	1280
1	1560
2	1970

Gambar 12 menyajikan perbandingan antara nilai *input power* dengan nilai *output DC*. Pada grafik tersebut, terlihat bahwa nilai *output DC* mengalami kenaikan per setiap nilai *input* ditambahkan.

Pada pengukuran efisiensi (Tabel 5), didapatkan nilai 46,94 % pada RF sebesar 2 dBm. Nilai ini masih dibawah dari yang telah ditentukan, yaitu

Gambar 12. Grafik output DC

Gambar 13. Grafik efisiensi

sebesar 50%, sedangkan kekurangan pada data adalah nilai *input* hanya sampai 2 dBm. Namun, jika *input RF* dinaikkan lagi, besar kemungkinan nilai efisiensi juga akan naik.

Tabel 5. Tabel pengukuran efisiensi

<i>Input Power (dBm)</i>	<i>Efisiensi (%)</i>
-20	2,517787238
-15,5	5,295906849
-12,3	8,538133268
-9,5	11,33669424
-7,5	13,75807678
-6,2	12,40638790
-5,7	19,60472831
-4	20,54402420
-3	26,69614291
-2	35,35916907
-1	42,52489312
1	40,08146449
2	46,94456898

Gambar 13 menunjukkan gravik perbandingan antara nilai efisiensi dan *input power*. Dari gambar tersebut, dapat dilihat bahwa nilai efisiensi mengalami kenaikan seiring dengan penambahan *input power*.

3.C. Pengukuran Sensitivitas

Pengukuran sensitifitas memberikan informasi pada nilai minimum rectenna yang masih tetap dapat menghasilkan *output DC*. Hasil pengukuran menggunakan *sweep oscillator* pada frekuensi 1,8 GHz disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil pengukuran sensitivitas

<i>Input Power (dBm)</i>	<i>Dc out (mv)</i>
-80	0,2
-75	0,4
-70	0,5
-65	0,4
-60	0,4
-55	0,4
-50	0,6
-45	0,6
-40	0,7
-35	1,4
-30	8

Gambar 14 menunjukkan gravik perbandingan antara *input power* dan *output DC*.

Gambar 14. Grafik sensitivitas

3. D. Pengujian Lapangan (*Field Test*)

Untuk melengkapi pengujian, dilakukan pula unjuk kerja rectenna secara langsung di lapangan menggunakan sumber RF dari *base transceiver station* (BTS) GSM seluler. Untuk memperoleh data perbandingan, terlebih dahulu dilakukan pengukuran tingkat radiasi power spektrum GSM menggunakan *field test meter* dengan laptop yang sudah terinstal True RTA untuk mengkalibrasi rectenna dan Network Cell Info Lite untuk mengidentifikasi tower terdekat dan jaringan apa yang bekerja pada BTS tersebut. Dalam hal ini, lokasi BTS dilihat dari Google Maps atau Google Earth.

 Tabel 7. Tabel nilai pengukuran BTS *field test*

Pr (dBm)	DC (mV)	Jarak (m)
-34	270	37
-38	180	75
-32	121	150
-41	81	300

Hasil pengukuran menggunakan *field test meter* dapat dilihat pada Tabel 7 dan Gambar 15. Dari hasil yang diperoleh, dapat disimpulkan bahwa hasil konversi tegangan DC terbaik adalah sebesar 270 mV untuk jarak BTS sejauh 37 meter dari rectenna.

 Grafik 15. Nilai pengukuran BTS *field test*

Semakin jauh jarak pemancar dari rectenna, semakin kecil gelombang elektromagnetik yang mampu dikonversi ke tegangan. Tegangan DC terkecil yang dihasilkan adalah 81 mV untuk jarak BTS 300 meter dari rectenna.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil yang telah diperoleh, dapat disimpulkan bahwa perbandingan antara nilai pengukuran VSWR, *gain*, dan *return loss* pengukuran riil antenna dengan simulasi menunjukkan nilai yang saling mendekati. Nilai pengukuran VSWR dari simulasi menunjukkan nilai 1,8 sedangkan nilai VSWR pada pengukuran riil adalah 1,6, menggunakan rentang frekuensi 0,8 GHz–2,2 GHz dengan standar VSWR dibawah 2. Nilai *gain* untuk hasil simulasi antenna menunjukkan nilai 2,808 dBi sementara hasil perhitungan riil gain antenna dengan media antenna referensi adalah sebesar 3,2 dBi. *Return loss* pada simulasi menunjukkan nilai sebesar -10 dB sedangkan pada pengukuran riil antenna dilapangan diperoleh *return loss* sebesar -11,783 dB. Pada pengukuran pola radiasi, sinyal yang di pancarkan menunjukkan pola melebar dengan intensitas kuat pada arah 0° sampai 60° untuk posisi vertikal dan 40° sampai 190° untuk posisi horizontal.

Pengujian efisiensi menunjukkan bahwa kenaikan nilai *input power* menyebabkan kenaikan nilai *output DC power* dengan tingkat persentase tertinggi sebesar 46%. Untuk pengukuran sensitivitas, nilai tertinggi yang didapatkan adalah pada *input power* sebesar -30 dBm dengan *ouput DC* bernilai 8 mV. Sensitivitas ini mengalami penurunan secara kontinu hingga input power -80 dBm dengan DC output 0,2 mV. Pengujian lapangan (*field test*) dilakukan untuk memastikan kinerja rectenna di lapangan dengan sumber RF langsung dari BTS GSM seluler. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa jarak rectenna ke BTS sangat berpengaruh terhadap hasil pengukuran. Semakin jauh jarak rectenna dari BTS, semakin kecil nilai *output DC* yang dihasilkan.

5. Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Rani Utami yang telah membantu penyelesaian penelitian ini.

Daftar Pustaka

- [1] A, R. , Zzulfi , and Wahyu, Y. , Perancangan dan Implementasi Rectenna pada Frekuensi WIFI 2.4 GHz. **3**(3), pp.4435–4441, 2016.
- [2] Rajab, M. , Koesmariyanto , and Rachmad, S. , Perancangan Rangkaian Rectifier Pada Sistem Rf Energy Harvesting Dengan Antena Televisi Pada Frekuensi UHFpp.464–469, 2019.
- [3] Pham, B. L. and Pham, A. V. *In Triple bands antenna and high efficiency rectifier design for RF energy harvesting at 900, 1900 and 2400 MHz*, 2013.
- [4] Zikri, A. , Hariyawan, M. Y. , and Harpawi, N. , Desain dan Implementasi Antena Mikrostrip Single Rectangular Patch pada Band Frekuensi 1920-2180 MHz untuk Pemanen Energi Gelombang Elektromagnetik, *Elementer*, **2**(2), pp.13–24, 2016.
- [5] Barcak, J. M. and Partal, H. P. *In Efficient RF energy harvesting by using multiband microstrip antenna arrays with multistage rectifiers*, 2012.
- [6] Imatsu, O. , Setijadi, E. , and Wirawan, D. E. A. , Rancang Bangun Antena Mikrostrip pada Frekuensi GPS L1 Berbasis Sistem Transfer Daya Nirkabel. **1**(1), pp.1–6, 2012.
- [7] K, H. N. R. A., Pramono, S. H. , and Yudaningtyas, E., Desain dan Implementasi Stegokripto Desain dan Implementasi Rectenna Hexagonal Patch Array pada Frekuensi 2,4 GHz, Institut Teknologi Bandung, **10**(2), pp.39–44, 2016.
- [8] Anuroop , Gangwar, D. , and Yadava, R. L. , Design and analysis of a pentagonal rectenna, 2014 International Conference on Signal Processing and Integrated Networks, SPIN 2014, pp.654–658, 2014.
- [9] Fardan, F., Nachwan, S., and Wahyu, Y., Perancangan Dan Implementasi RECTENNA (Rectifier Antenna) untuk Frekuensi 950 MHz 2012.
- [10] Ruhyat, A., Setijadi, E., and Wirawan, Perancangan Rectenna Rectangular Patch Array Untuk Pemanen Energi Pada Frekuensi 900 MHz. 2015, 2015.