

Desain Antena *Hexagonal Patch Array* Berbasis Sistem Transfer Daya *Wireless* pada Frekuensi 2,4 GHz

Hexagonal Patch Array Antenna Design Based on Wireless Power Transfer at Frequency of 2.4 GHz

Herma Nugroho R. A. K. *, Sholeh Hadi P., dan Erni Yudaningtyas

Program Studi Magister Teknik Elektro, Universitas Brawijaya Malang
Jalan M.T. Haryono No. 167, Malang 65145, Indonesia

Abstrak

Pada penelitian ini telah didesain antena *hexagonal patch array* yang dapat digunakan sebagai perangkat catu daya *wireless*. Antena *hexagonal patch array* ini didesain untuk menangkap gelombang radio (RF) pada frekuensi 2,4 GHz yang dapat diaplikasikan sebagai antena pada *Wireless Local Area Network* (WLAN). Desain antena dilakukan menggunakan *software CST Microwave studio*, kemudian dilakukan fabrikasi dan pengukuran secara riil. Parameter pengujian antena *hexagonal patch array* meliputi *return loss*, *Voltage Standing Wave Ratio* (VSWR), *gain*, *bandwidth*, dan daya. Metode yang digunakan adalah pemodelan *transmission line* dan *corporate feed line* untuk pengaturan perubahan jarak antar *patch* antena. Perubahan variabel juga diteliti pengaruhnya terhadap parameter antena khususnya daya terima antena yang kemudian ditransmisikan ke rangkaian *power harvester*. Nilai parameter antena hasil simulasi menunjukkan nilai *return loss* adalah -33,38 dB, VSWR sebesar 1,041, *gain* sebesar 8,81 dBi, *bandwidth* adalah 0,084 GHz, daya sebesar 0,499 W (-3 dBm). Sedangkan parameter hasil pengukuran dari antena yang telah dipabrikasi adalah nilai *return loss* sebesar -33,21 dB, VSWR sebesar 1,048, *gain* sebesar 5 dBi, *bandwidth* adalah 0,145 GHz, daya sebesar -33 dBm.

Kata kunci: *patch, array, wireless, rectifier, return loss.*

Abstract

In this research, the hexagonal patches antenna array as a wireless power source device has been designed. This antenna is designed to receive the RF energy at frequency of 2.4 GHz for WLAN application. CST Microwave studio and multisim software tools are used for simulation purposes and then the real fabrication and measurement are carried out. Testing of the antenna parameters consists of return loss, Voltage Standing Wave Ratio (VSWR), gain, bandwidth, and power. The method of research is transmission line modelling and corporate feed line for setting of change distance between patches an antenna. The simulated results show that return loss is -33.38 dB, VSWR is 1.041, gain is 8.81 dBi, bandwidth is 0.084 GHz and the power is 0.499 W (-3 dBm). Whereas the measurement results show that return loss is -33.21 dB, VSWR is 1.048, gain is 5 dBi, bandwidth is 0.145 GHz and the power is -33 dBm.

Keywords: *patch, array, wireless, rectifier, return loss.*

I. PENDAHULUAN

Wireless power transfer (WPT) merupakan transmisi energi secara *wireless* dari sumber listrik ke beban listrik. Penggunaan transmisi ini dilakukan jika koneksi kabel tidak memungkinkan menjangkau beban. Salah satu teknologi WPT yang dapat digunakan untuk mengatasi permasalahan jangkauan kabel atau jarak sumber yang sangat jauh dari beban adalah *rectenna* [1].

Rectenna adalah kombinasi dari dua kata yaitu *rectifier* dan *antenna*. *Rectifier* akan mengkonversi energi *Radio Frequency* (RF) menjadi tegangan *Direct Current* (DC) sedangkan *antenna* sebagai penerima energi RF. *Output* tegangan dari *rectenna* dapat digunakan untuk menjalankan beban listrik misalnya sensor, kapal tanpa awak, *light emitting diode* (LED) dan sebagainya [2].

Ada beberapa faktor yang mempengaruhi *output rectenna* antara lain adalah topologi antena, rangkaian *rectifier* dan kombinasi dari keduanya. Topologi dan susunan antena, misalnya disusun *array* diharapkan mampu menangkap sinyal RF secara maksimal sehingga akan dapat memperbaiki RF *power harvesting* [3]. Faktor berikutnya yaitu tentang susunan *rectifier* misalnya digunakan *voltage double rectifier* sehingga tegangan *output* meningkat [2]. Selanjutnya, faktor kombinasi dari susunan antena dan *rectifier* yang diharapkan menghasilkan *output* daya yang besar [3].

Peningkatan daya pada suatu antena tentunya akan berpengaruh terhadap nilai *output rectifier*. Berdasarkan penelitian sebelumnya dengan nilai tegangan *rectifier* masih kecil (0,818 V dan 0,73 V) [2], [4] maka diperlukan suatu metode desain untuk peningkatan daya antena.

Secara garis besar metode desain yang digunakan pada antena mikrostrip *array* adalah metode *corporate feed line* dan *series feed line*. Berdasarkan penelitian sebelumnya bahwa metode *series feed line* memiliki beberapa kelemahan antara lain nilai *gain* dan *return loss* yang rendah. Sedangkan pada *corporate feed line*

* Corresponding Author.

Email: hnugroho81@gmail.com

Received: November 19, 2015; Revised: November 26, 2015

Accepted: December 19, 2015

Published: December 30, 2015

© 2015 PPET - LIPI

doi : 10.14203/jet.v15.33-38

memiliki beberapa kelebihan antara lain mudah dalam implementasi, adanya kontrol daya pada saluran tiap elemen, *gain* dan *return loss* yang besar [5]. Fokus pada penelitian ini adalah desain antenna sebagai catu daya menggunakan metode *corporate feed line* dengan kombinasi susunan antenna *array* berbentuk *hexagonal*.

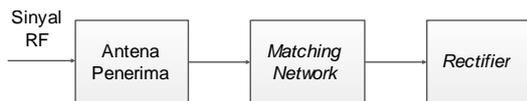
II. LANDASAN TEORI

Transfer daya *wireless* merupakan salah satu teknik pengambilan energi langsung dari alam bebas menggunakan elektromagnetik sebagai sumber energinya. Teknik ini akan optimal apabila ditunjang dengan metode yang tepat. Dalam hal ini, metode desain yang digunakan yaitu *corporate feed line*

A. Rectenna

Rectenna pada dasarnya merupakan sebuah perangkat yang mengkonversi energi RF menjadi sebuah tegangan DC. Ini adalah kombinasi dari dua kata yaitu *rectifier* dan *antenna*. *Rectifier* akan mengkonversi energi RF menjadi tegangan DC sedangkan *antenna* sebagai penerima energi RF [1].

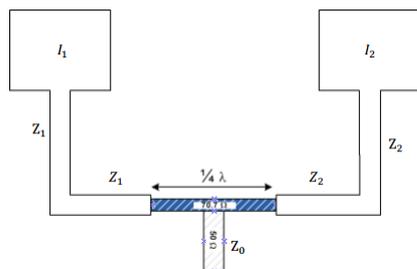
Rectenna memiliki potensi besar untuk mengirim, mengumpulkan, dan mengkonversi energi frekuensi radio dalam daya DC yang berguna untuk me-recharge perangkat elektronik berdaya rendah melalui ruang bebas tanpa menggunakan jalur transmisi fisik. Adapun blok diagram dari sistem *rectenna* ditunjukkan dalam Gambar 1. Energi RF akan diterima oleh antenna yang selanjutnya akan diubah menjadi energi listrik berupa sinyal *Alternating Current/* sinyal bolak-balik (AC). Daya dari antenna akan mengalami transfer daya maksimum ke beban di *rectifier* apabila impedansi antenna sama dengan impedansi beban, sehingga diperlukan rangkaian penyesuai impedansi (*matching network*). Pada rangkaian *rectifier* sinyal AC tersebut dikonversi menjadi sinyal DC, kemudian sinyal ini akan menjalankan beban.



Gambar 1. Blok Diagram Sistem *Rectenna* [6].

B. Metode Corporate Feed Line

Penggambaran tentang metode ini dapat dijelaskan pada *feed* antenna *array* linear dengan 2 *patch* antenna sesuai Gambar 2.

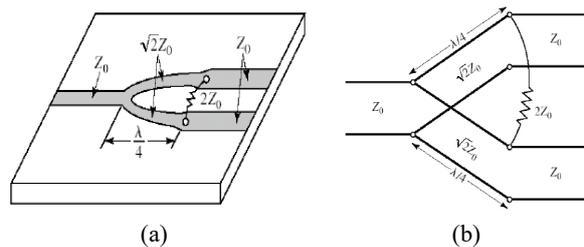


Gambar 2. Dua *Patch* Linear *Array* Dengan *Corporate Feed* [7].

Metode *corporate feed line* digunakan secara umum dan banyak diaplikasikan dalam berbagai bidang.

Metode ini memiliki kontrol saluran di setiap *patch* dan sesuai pada penggunaan saluran yang meruncing kedua ujungnya atau pada transformator 1/4 panjang gelombang (λ) antenna. Pada penelitian ini elemen *patch* dihubungkan dengan saluran pencatu dengan metode impedansi transformator 1/4 λ atau sering disebut teknik pembagi daya Wilkinson.

Setiap elemen yang sama dari *patch* antenna memiliki resitansi *input* R_{in} . Elemen resistansi ini akan *matched* dengan impedansi saluran transmisi Z_1, Z_2 dan arus pada masing-masing *patch* (I_1 dan I_2) yang digunakan untuk pembagian daya. Hal ini dapat dilakukan dengan teknik pembagian daya Wilkinson (Gambar 3). Karakteristik impedansi $\sqrt{2} Z_0$ dan isolasi *lumped* resistor $2 Z_0$ dengan kondisi semua *port* bernilai sama $Z_1 = Z_2 = Z_0$ [8].



Gambar 3. (a) Pembagi Daya Wilkinson pada *Microstrip Line*, (b) Rangkaian Ekuivalen *Line Transmisi* [8].

Apabila nilai impedansi pada Gambar 3. dari saluran transmisi transformator 1/4 λ adalah Z , maka besarnya impedansi saluran tersebut adalah

$$Z = \sqrt{2} Z_0 \tag{1}$$

Kemudian ditentukan nilai panjang saluran transmisi transformator yaitu

$$l = 1/4 \lambda_g \tag{2}$$

dengan,

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \tag{3}$$

Sedangkan lebar saluran pencatu (W_0) adalah

$$W_0 = \frac{2h}{\pi} \left\{ B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left[\ln(B - 1 + 0,39 - \frac{0,61}{\epsilon_r}) \right] \right\} \tag{4}$$

dengan,

$$A = \frac{Z_0}{60} \left\{ \frac{\epsilon_r}{2} \right\}^{1/2} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left\{ 0,23 + \frac{0,11}{\epsilon_r} \right\} \tag{5}$$

$$B = \frac{60\pi^2}{Z_0\sqrt{\epsilon_r}} \tag{6}$$

III. DESAIN SISTEM

A. Desain Antena

Antena mikrostrip yang dirancang adalah antenna mikrostrip *hexagonal patch array* pada frekuensi 2,4 GHz dengan metode *corporate feed line*. Substrat yang digunakan adalah FR4 Epoxy dengan konstanta dielektrik (ϵ_r) sebesar 4,3. Perancangan antenna tersebut menggunakan *software Computer Simulation Technology* (CST) 2014 Microwave Studio. Antena yang dirancang memiliki dimensi 30,5×38,5 mm.

Sebelum menentukan dimensi *patch* antena maka terlebih dahulu ditentukan panjang gelombang di ruang bebas (λ_0) dengan perambatan ruang bebas (c) sebesar 3×10^8 m/s pada frekuensi kerja 2,4 GHz. Sesuai Persamaan 7 [9] berikut, diperoleh nilai λ_0 sebesar 125 mm.

$$\lambda_0 = \frac{c}{f} \tag{7}$$

Kemudian dilakukan penghitungan dimensi elemen peradiasi antena yang terdiri dari panjang sisi *hexagonal* antena (s), lebar (W) dan panjang (L) [9], [10]. Panjang sisi *hexagonal* antena dan lebar antena dapat dihitung menggunakan Persamaan 8 dan 9 sebesar 19,4 mm dan 38,5 mm

$$s = \frac{c}{3.1033 f_r \sqrt{\epsilon_r}} \tag{8}$$

$$W = \frac{c}{2 f_r \sqrt{(\epsilon_r + 1)/2}} \tag{9}$$

Untuk menentukan panjang (L) *patch*, maka terlebih dahulu ditentukan nilai konstanta dielektrik ($\epsilon_{r_{eff}}$) dan nilai panjang tambahan ΔL menggunakan Persamaan 11 dan 12.

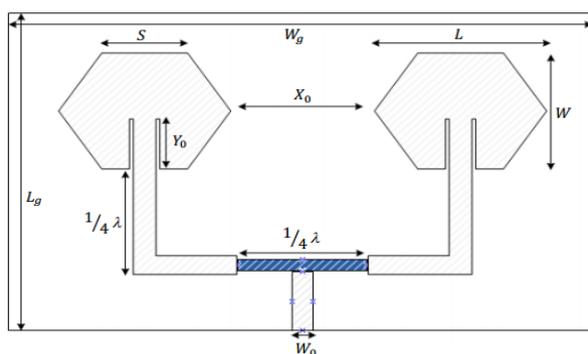
$$\epsilon_{r_{eff}} = \frac{(\epsilon_r + 1)}{2} + \frac{(\epsilon_r - 1)}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1/2} \tag{10}$$

$$\frac{\Delta L}{h} = 0,412 \frac{(\epsilon_{r_{eff}} + 0,3) + \frac{W}{h} + 0,264}{(\epsilon_{r_{eff}} - 1,258) \left(\frac{W}{h} + 0,8 \right)} \tag{11}$$

$$L_{r_{eff}} = \frac{c}{2 f_r \sqrt{\epsilon_{r_{eff}}}} \tag{12}$$

$$L = L_{r_{eff}} - 2 \Delta L \tag{13}$$

Dari hasil perhitungan Persamaan 12 dan 13 diperoleh panjang *patch* sebesar 30,5 mm. Hasil perhitungan dari persamaan-persamaan tersebut kemudian diaplikasikan ke dalam simulasi antena menggunakan software CST *Microwave studio*.



Gambar 4. Geometri Antena *Hexagonal Patch Array* Tampak Depan.

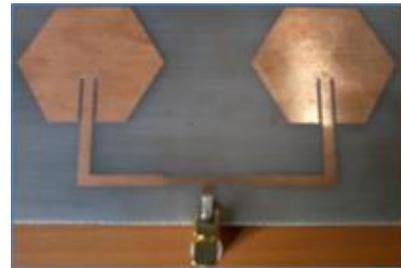
Geometri antena mikrostrip sesuai persamaan tersebut ditunjukkan pada Gambar 4. *Patch* berbentuk *hexagonal* yang disusun secara *array*. Bahan substrat dielektrik yang digunakan adalah FR4 dengan ϵ_r sebesar 4,3 dengan ketebalan substrat 1,5 mm sedangkan material tembaga yang digunakan mempunyai ketebalan 0,1 mm.

Hasil dari desain ukuran geometri antena *hexagonal patch array* ditunjukkan pada Tabel 1.

TABEL 1
UKURAN DIMENSI ANTENA *HEXAGONAL PATCH ARRAY*

Dimensi Antena	Keterangan	Ukuran (mm)
L	Panjang <i>patch</i>	30,5
W	Lebar <i>patch</i>	38,5
W ₀	Lebar saluran transmisi / <i>feedline</i>	2,8
S	Panjang sisi <i>hexagonal</i>	19,4
W _g	Lebar <i>ground plane</i>	47,5
L _g	Panjang <i>ground plane</i>	42
Y ₀	Panjang saluran <i>matching</i> impedansi	11,06
X ₀	Jarak antar sisi elemen	24

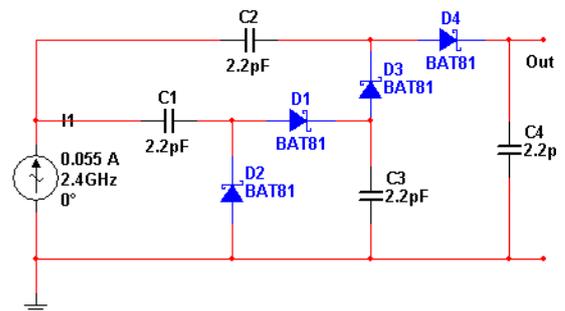
Berdasarkan Tabel 1 tersebut maka dapat diimplementasikan sebuah antena *hexagonal patch array* seperti ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Antena Mikrostrip *Hexagonal Patch Array* Hasil Fabrikasi.

B. Desain *Power Harvester*

Power Harvester berfungsi sebagai pengubah gelombang elektromagnetik menjadi arus DC [1]. Rangkaian terdiri dari kombinasi rangkaian *rectifier* dan *voltage doubler*. Rangkaian *rectifier* berfungsi menyearahkan tegangan AC yang dihasilkan oleh antena menjadi tegangan DC [2]. Sedangkan rangkaian *voltage doubler* berfungsi untuk menguatkan tegangan yang masuk dalam rangkaian. Rangkaian ini terdiri dari *diode schottky* HSMS-2860 [11] dan kapasitor mika 2,2 pF. Skema rangkaian *power harvester* ditunjukkan seperti pada Gambar 6.



Gambar 6. Skema Rangkaian *Power Harvester*.

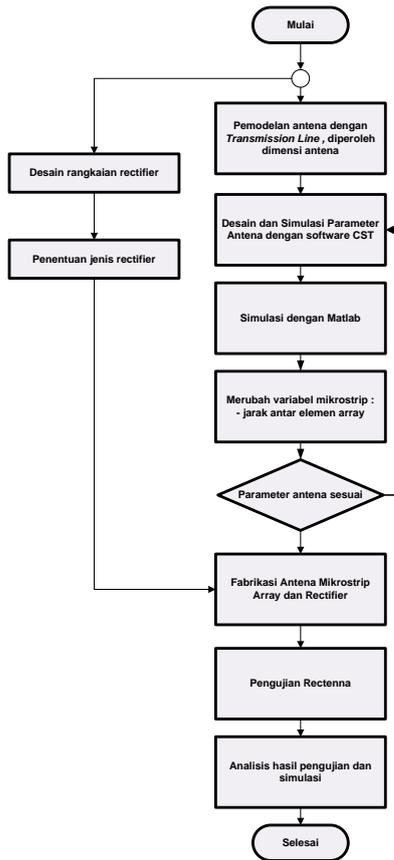
IV. METODE PENELITIAN

Data awal diperoleh dari hasil pemodelan antena antara lain berupa dimensi antena, konduktansi pada *patch* antena dan impedansi saluran. Data tersebut kemudian disimulasikan menggunakan CST *Microwave Studio* 2014 sehingga diperoleh parameter antena yang meliputi VSWR, *return loss*, *bandwidth*, *gain*, pola radiasi, polarisasi, impedansi. Pada simulasi ini juga dapat diketahui pengaruh perubahan dimensi *patch* dan

jarak antar *patch* pada antenna. Pemodelan antenna dengan pendekatan elektromagnetik dilakukan dengan metode pemodelan *transmission line* dan *corporated feed line* kemudian data hasil simulasi tersebut digunakan untuk analisis *output* pada rangkaian akhir *rectenna* yaitu pada rangkaian pengkonversi RF menjadi DC.

Proses analisis hasil simulasi dari *software* CST, yaitu dengan cara merubah variabel antar elemen *array* kemudian diamati nilai parameter antenna yang yaitu *return loss*, *VSWS*, *gain*. Perubahan jarak *patch* antar elemen antenna akan berpengaruh terhadap nilai daya dan parameter lainnya.

Flow Chart metode penelitian ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. *Flow Chart* Metode Penelitian.

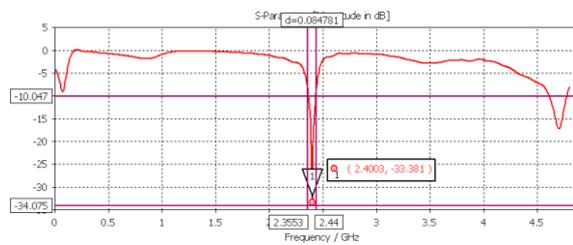
V. HASIL DAN ANALISIS

Setelah dilakukan pengujian berupa simulasi dan pengukuran terhadap antenna dan *rectifier*, didapatkan parameter-parameter berikut:

A. Return Loss

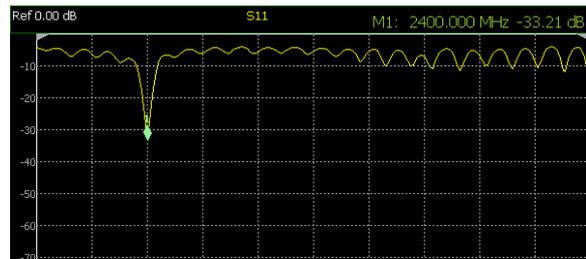
Hasil simulasi *return loss* dari antenna mikrostrip *hexagonal patch array* ditunjukkan pada Gambar 8.

Berdasarkan hasil simulasi tersebut, didapatkan nilai *return loss* pada frekuensi 2,4 GHz sebesar -33,381 dB. Nilai ini berada jauh di bawah -10 dB yang merupakan batas nilai *return loss* yang artinya daya yang dipantulkan sangat sedikit dan mendekati kondisi yang *match* antara *transmitter* dan beban/antenna. Frekuensi kerja yang diketahui dari hasil simulasi yaitu dari 2,355 GHz sampai dengan 2,44 GHz. Antenna ini dibuat untuk aplikasi WLAN dengan lebar frekuensi sebesar 0,084 GHz.



Gambar 8. Hasil Simulasi *Return Loss* Antena Mikrostrip *Hexagonal Patch Array* pada Frekuensi 2,4 GHz.

Selain dari hasil simulasi, *return loss* juga diperoleh dari hasil pengukuran menggunakan *Vector Network Analyzer* tipe N9923A seperti Gambar 9.



Gambar 9. Hasil pengukuran *return loss* dengan *Vector network analyzer* N9923A pada frekuensi 2,4 GHz

Gambar 9 menunjukkan bahwa *return loss* yang dihasilkan dari antenna yang telah dipabrikasi pada frekuensi 2,4 GHz memiliki nilai *return loss* sebesar -33,21 dB. Antenna hasil pengukuran memiliki *range* frekuensi kerja dari 2,355 GHz sampai dengan 2,55 GHz sehingga *bandwidth*-nya sebesar 0,145 GHz.

B. Bandwidth

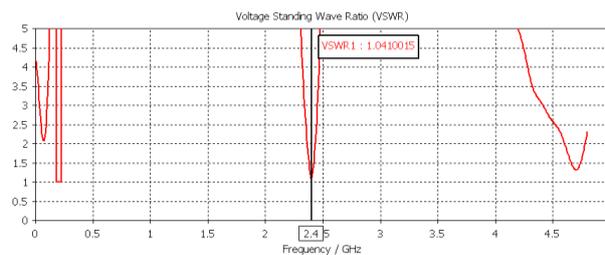
Bandwidth antenna adalah *range* frekuensi antenna dengan beberapa karakteristik, sesuai dengan standar yang telah ditentukan. Dari penelitian yang telah dilakukan, *bandwidth* antenna dapat diketahui dari frekuensi kerja antenna baik dari hasil simulasi maupun dari hasil pengukuran seperti pada Tabel 2.

TABEL 2
BANDWIDTH ANTENA MIKROSTRIP HEXAGONAL PATCH ARRAY

Hasil	Frekuensi Resonansi (GHz)	Bandwidth (GHz)
Simulasi	2,36 – 2,446	0,084
Pengukuran	2,355 – 2,50	0,145

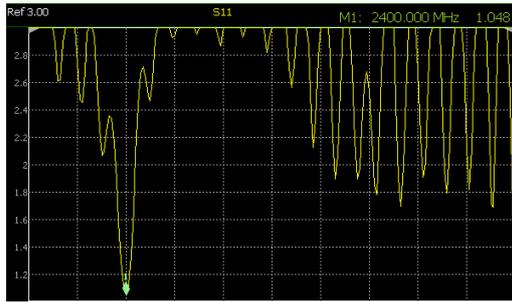
C. VSWR

Salah satu parameter penting berikutnya dalam suatu antenna adalah *Voltage Standing Wave Ratio* (VSWR). VSWR adalah pengukuran dasar dari impedansi *matching* antara saluran transmisi dan antenna. Hasil simulasi VSWR ditunjukkan seperti Gambar 10.



Gambar 10. Hasil Simulasi VSWR Mikrostrip *Hexagonal Patch Array* pada Frekuensi 2,4 GHz.

Selain dari hasil simulasi, VSWR antena mikrostrip *hexagonal patch array* juga diukur dengan menggunakan *Agilent Vector Network Analyzer* seperti terlihat dalam Gambar 11.



Gambar 11. Hasil Pengukuran VSWR Dengan *Agilent Vector Network Analyzer* N9923A.

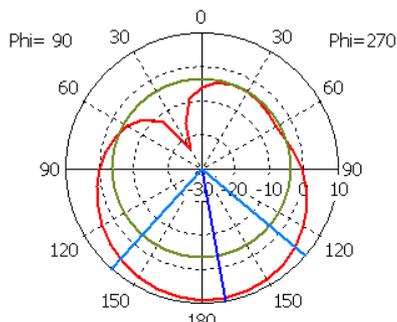
Berdasarkan hasil simulasi dan pengukuran, hasil VSWR yang didapatkan pada frekuensi 2,4 GHz adalah 1,041 dan 1,048. Data hasil simulasi dan pengukuran memiliki selisih yang kecil dan memenuhi persyaratan nilai VSWR yaitu lebih kecil dari dua ($VSWR < 2$). Hal ini membuktikan antena mikrostrip yang telah dibuat memenuhi syarat karakteristik antena yang baik karena hampir tidak ada gelombang pantul dengan nilai koefisien refleksi yang sangat kecil.

D. Gain dan Pola Radiasi

Pengukuran *gain* antena dapat dilakukan dengan cara membandingkan antara *gain* antena mikrostrip *hexagonal array* dengan *gain* antena referensi. Antena referensi yang digunakan adalah antena USB *adapter wifi* TL-WN722N. USB *adapter wifi* digunakan sebagai penerimaan sinyal dari *access point*, dan memiliki *gain* sebesar 4 dBi. Adapun perhitungan *gain* yang diukur dapat dicari sesuai Persamaan 12.

$$G_u = G_{ref} + P_u - P_{ref} Z_0 \quad (13)$$

Hasil level daya penerimaan dari antena USB *adapter wifi* TL-WN722N frekuensi 2,4 GHz adalah -38 dBm, sedangkan maksimum level daya penerimaan dari antena mikrostrip *hexagonal patch array* adalah -37 dBm sehingga diperoleh nilai *gain* yang diukur sebesar 5 dBi. Sedangkan *gain* dari hasil simulasi dapat diperoleh dari grafik polar yang dapat dilihat dari *magnitude mainlobe* yang dihasilkan oleh pola radiasi antena mikrostrip *hexagonal patch array* seperti pada Gambar 12.



Gambar 12. Pola Radiasi Antena Mikrostrip *Hexagonal Patch Array*.

Gambar 12 menunjukkan *gain* yang diperoleh dari hasil simulasi sebesar 8,73 dBi sedangkan nilai *Half*

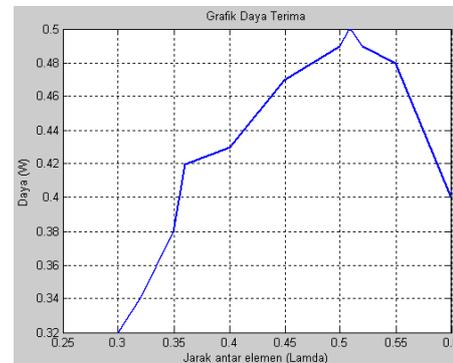
Power Beam Width (HPBW) yang diperoleh adalah $91,4^\circ$. HPBW adalah lebar sudut yang memisahkan dua titik setengah daya pada pancaran utama dari pola radiasi. Titik penurunan setengah daya terletak pada 3 dB. Nilai *side lobe level* (*lobe* kecil yang ada di dekat *main lobe*) pada pola radiasi antena adalah -12,4 dB.

E. Level Daya

Daya terima dari suatu antena berkaitan dengan kemampuan antena tersebut dalam menangkap sinyal di udara bebas sehingga dapat diubah menjadi tegangan listrik setelah diproses di rangkaian *rectifier*. Pengukuran level daya menggunakan *Spectrum Analyzer* dengan nilai daya sebesar -33,34 dBm. Sedangkan jika dilihat dari hasil simulasi dengan menggunakan CST maka diperoleh nilai level daya sebesar 0,499 W.

Setelah diketahui nilai dari daya yang diterima antena maka daya tersebut sebagai daya *input* ke rangkaian *rectifier*. Nilai daya ini berpengaruh terhadap nilai tegangan output *rectifier*. Setelah dilakukan simulasi terhadap rangkaian *rectifier* maka dihasilkan tegangan maksimal sebesar 1,541V.

Perubahan jarak antar elemen *array* memiliki pengaruh yang besar terhadap daya yang diterima antena mikrostrip. Apabila jarak antar elemen terlalu dekat atau saling berhimpit maka akan terjadi *electromagnetically coupling* dan apabila jarak antar elemen terlalu jauh maka akan memperbesar nilai rugi-rugi daya. Adanya pengaruh jarak terhadap daya terima ditunjukkan seperti pada Gambar 13.



Gambar 13. Pengaruh Jarak Antar Elemen *Array* Terhadap Daya Terima.

KESIMPULAN

Dalam penelitian ini, telah dilakukan desain antena *hexagonal patch array* menggunakan metode *Corporate Feed Line* dan rangkaian *power harvester*. Pemodelan antena untuk mendapatkan data dimensi antena telah dilakukan, kemudian dilakukan pengujian parameter antena melalui prosedur pengukuran dan analisisnya berdasarkan perubahan variabel yaitu jarak antar elemen *patch array* antena yang berpengaruh terhadap daya terima antena. Berdasarkan semua hasil dan pembahasan yang telah dijelaskan pada bagian sebelumnya, maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Hasil pengukuran *Rectenna* dengan antena *hexagonal patch array* menghasilkan nilai *return loss* sebesar -33,381 dB pada frekuensi tengah 2,4 GHz serta *bandwidth* antena adalah 0,145 GHz

yang mengalami peningkatan dari hasil simulasi (0,084 GHz).

2. VSWR yang diperoleh dari hasil simulasi adalah 1,041 dan pengukuran adalah 1,048. Hal ini membuktikan antenna mikrostrip yang telah dibuat memenuhi syarat karakteristik antenna yang baik karena nilai VSWR < 2 , dan mendekati 1 sehingga mendekati kondisi *match* terhadap saluran transmisinya .
3. Gain yang dihasilkan dari hasil pengujian cukup besar yaitu 5 dBi dengan pola radiasi *omnidirectional*, sedangkan pada hasil simulasi direktivitas pada *main lobe* terbesar memiliki gain sebesar 8,73 dBi.
4. Daya optimum sebesar 0,499 W berdasar hasil simulasi pada antenna *hexagonal patch array* ini terletak pada jarak 63,5 mm antar elemen *patch*.
5. Berdasarkan simulasi dihasilkan tegangan *output* rangkaian *power harvester* sebesar 1,541 V.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada dosen pembimbing yaitu Bapak Sholeh Hadi Pramono dan Ibu Erni Yudaningtyas yang telah membantu dan membimbing penulis dalam menyelesaikan penelitian tesis ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Kemenristek Dikti yang telah memberikan beasiswa studi kepada penulis.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] O. Imatsu, E. Setijadi, dan Wirawan, "Rancang bangun antenna mikrostrip pada frekuensi GPS L1 berbasis sistem transfer daya nirkabel", *Jurnal Teknik POMITS*, vol. 1, no. 1, hal. 1-6, 2012.
- [2] Anuroop, D. Gangwar, and R. L. Yadava, "Design and analysis of a pentagonal rectenna", in *Proceedings of International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPINZ)*, 2014, pp. 654 - 658.
- [3] O. Olgun, C. C. Chen, and J. L. Volakis, "Investigation of rectenna array configurations for enhanced rf power harvesting", *IEEE Antennas And Wireless Propagation Letters*, vol. 10, April 2011, pp. 262 - 265.
- [4] N. Zhu, K. Chang, M. Tuo, P. Jin, H. Xin, and R. W. Ziolkowski, "Design of high-efficiency rectenna for 1,575 ghz wireless low power transmission", in *Proceedings of 2011 IEEE Radio and Wireless Week (RWW 2011) - 2011 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS 2011)*, Jan 2011, pp. 90-93.
- [5] M. T. I. Huque, M. A. Chowdury, M. K. Hosain, and M. S. Alam, "Performance analysis of corporate feed rect angular element and circular patch elemen 4x2 mikrostrip array antenna", *International Journal of Advanced Computer Science and Application (IJACSA)*, vol. 2. no. 8, pp. 74-79, 2011.
- [6] S. Bin Alam, M. A. Ullah, and S. Moury, "Design of a low power 2.45 GHz RF energy harvesting circuit for rectenna harvesting circuit for rectenna, in *Proceedings of 2013 International Conference on Informatics, Electronics & Vision (ICIEV)*, May 2013, pp. 1-4.
- [7] R. Brancroft, *Microstrip and Printed Antenna Design*, 2nd ed., Raleigh, NC-USA: Scitech Publishing, Inc, 2009.
- [8] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, 4th ed., New York, USA: John Wiley & Sons, Inc, 2011.
- [9] C. A. Balanis, *Antena Theory: Analysis Design*, 3rd ed. New Jersey, USA: John Wiley & Sons, Inc, 2005.
- [10] S. Basu, A. Srivastava, and A. Goswami, "Dual frequency hexagonal microstrip patch antenna", *Int. J. Sci. Res. Publ.*, vol 3, iss.11, pp. 1-9, November 2013.
- [11] "HSMS-286x series surface mount microwave schottky detector diodes", Avago Technologies, United States, 2009.