

Pattern Reconfigurable Patch Antenna menggunakan Edge Shorting Pin dan Symmetrical Control Pin

DWI ANDI NURMANTRIS¹, HEROE WIJANTO², BAMBANG SETIA NUGROHO²

1. Fakultas Ilmu Terapan, Telkom University
2. Fakultas Teknik Elektro, Telkom University

Email : dwiandi@tass.telkomuniversity.ac.id

ABSTRAK

Metode baru dalam mendesain suatu pattern reconfigurable antenna telah diteliti. Penelitian ini fokus pada optimasi antena patch lingkaran single layer pencatutan probe koaksial dengan mengintegrasikan 24 switch/shorting pin pada sisi patch yang disebut edge shorting pin dan 8 shorting pin membentuk lingkaran dengan radius tertentu dan selanjutnya disebut symmetrical control pin yang fungsinya sebagai metode penyepadan impedansi. Algoritma Genetika yang dikombinasikan dengan Finite Element Software digunakan untuk mengoptimasi kombinasi switch, radius lingkaran symmetrical control pin, dan radius patch untuk mendapatkan kemampuan pattern reconfigurability. Antena ini menghasilkan 8 kemungkinan arah radiasi azimuth dengan resolusi 45° dan arah elevasi 30° pada frekuensi 2,4 Ghz. Optimasi, simulasi, fabrikasi, dan pengukuran dilakukan untuk memverifikasi hasil penelitian.

Kata kunci: Patch Lingkaran, Edge Shorting Pin, Symmetrical Control Pin, Algoritma Genetika, Pattern Reconfigurable

ABSTRACT

New method for designing pattern reconfigurable antenna was studied. This study focuses on the optimization of a single layer circular patch antenna with probe feed by integrating the 24 switch / shorting pin on the side of the patch that called Edge Shorting Pins and 8 shorting pins form circular line in such radius that called Symmetrical Control Pins as a impedance matching method. Genetic algorithm combined with the Finite Element Software is used to optimize the switch combination, the radius of circular line of symmetrical control pins, and the patch radius to obtain a pattern reconfigurability capabilities. This antenna produces 8 possible directions of azimuth radiation with a resolution of 45° and 30° elevation direction at a frequency of 2.4 GHz. Optimization, simulation, fabrication, and measurement was done to verify the results.

Keywords: Circular Patch, Edge Shorting Pin, Symmetrical Control Pin, Genetic Algorithm, Pattern Reconfigurable

1. PENDAHULUAN

Reconfigurable antenna menjadi populer beberapa tahun terakhir karena kelebihanannya yang mampu direkonfigurasi karakteristik medan dekatnya seperti frekuensi kerja maupun karakteristik medan jauhnya seperti pola radiasi dan polarisasi dengan tetap mempertahankan ukuran dimensi fisiknya sehingga secara sistem akan lebih cocok digunakan pada perangkat-perangkat yang kecil dan *portable* (Zhang dkk. 2008).

Kemampuan *pattern reconfigurability* pada antena *planar* biasanya dapat dicapai dengan menggunakan *switch RF* seperti *PIN Diode* dan *RF MEMs* dimana kombinasi state "on" dan "off" pada *switch-switch* yang terintegrasi pada elemen antena bisa mengubah distribusi arus pada struktur antena sehingga karakteristik pancaran antena tersebut bisa berubah (Zhang dkk. 2008).

Beberapa peneliti sudah memaparkan beberapa design *pattern reconfigurable antenna* menggunakan *switch RF*. Kemampuan *pattern reconfigurable* didapat dengan memilih struktur radiator yang tidak sederhana seperti bentuk spiral sehingga sangat berpeluang untuk membuat *pattern reconfigurable* (C. Jung dkk.2005), (Huff dkk. 2003), (Huff dkk. 2004), (Huff dkk. 2006). Dua arah pancaran dari antena tunggal bisa di *switch* untuk merubah arah pancaran, yaitu pancaran *conical* ke pancaran *broadside* (Chen dkk. 2007). Single antena *stacked patch* bisa menghasilkan *pattern reconfigurable* sekaligus *frequency reconfigurable* (Ali dkk. 2007). Kesamaan karakteristik dari *pattern reconfigurable antenna* diatas adalah terbatasnya derajat *pattern reconfigurable* nya.

Algoritma genetika (AG) merupakan teknik optimasi global yang terinspirasi dari teori Darwin yaitu teori seleksi dan evolusi. Dalam bidang elektromagnetika, AG sudah berhasil digunakan tidak hanya untuk optimasi antena saja tetapi bahkan dapat menemukan varian-varian baru struktur antena. Awalnya, dalam bidang optimasi antena, AG sering digunakan untuk optimasi antena susun (Ares. 1999). AG juga digunakan untuk mendesain dan mengoptimasi *wire antenna* (Linden. 1997). AG juga berhasil digunakan untuk mengoptimasi struktur antena untuk mendapatkan *bandwidth* yang lebih lebar (Choo dkk. 2000) dan *multiband* (Choo dkk. 2002),(Ozgun,2003). AG juga berhasil digunakan untuk tujuan mengecilkan *radiator* pada *patch antenna* (Herscovici dkk. 2001). Dalam *reconfigurable antenna*, AG juga digunakan oleh lopez (Lopez. 2010)

Shorting Pin adalah suatu konduktor dengan radius kecil yang menghubungkan antara *patch* dengan *groundplane*. Pengintegrasian *shorting pin* pada antena untuk dimanfaatkan sebagai *pattern reconfigurable mechanism* masih belum banyak digunakan karena pola perubahan medan yang disebabkan oleh *shorting* sangat kompleks dan penelitian yang memfokuskan pada area ini masih sedikit. Tetapi, efek *shorting* pada frekuensi resonansi sudah dimulai sejak awal tahun 90-an meskipun setiap analisa yang dilakukan masih terbatas pada kasus-kasus yang masih terbatas. Penjelasan secara sederhana mengenai efek *shorting* terhadap frekuensi resonansi bisa dijelaskan melalui pendekatan saluran transmisi, dimana ketika beberapa *shorting* ditambahkan pada antena mikrostrip maka induktansi L seri maupun kapasitansi C paralel muncul pada rangkaian ekuivalennya. Induktansi L muncul merepresentasikan *self inductance* dari *shorting pin* sedangkan kapasitansi C muncul merepresentasikan *close proximity* antar *shorting pin* (Ramesh dkk. 2001). Jika hanya ada

dua buah *shorting pin* yang diintegrasikan, maka efek dari *shorting pin* tersebut mirip seperti saluran dua kawat kembar yang nilai induktansi dan kapasitansinya bisa dituliskan sebagai berikut :

$$L = \left(t \frac{\mu}{\pi} \right) \cosh^{-1} \left(\frac{d}{2a} \right) \quad (1)$$

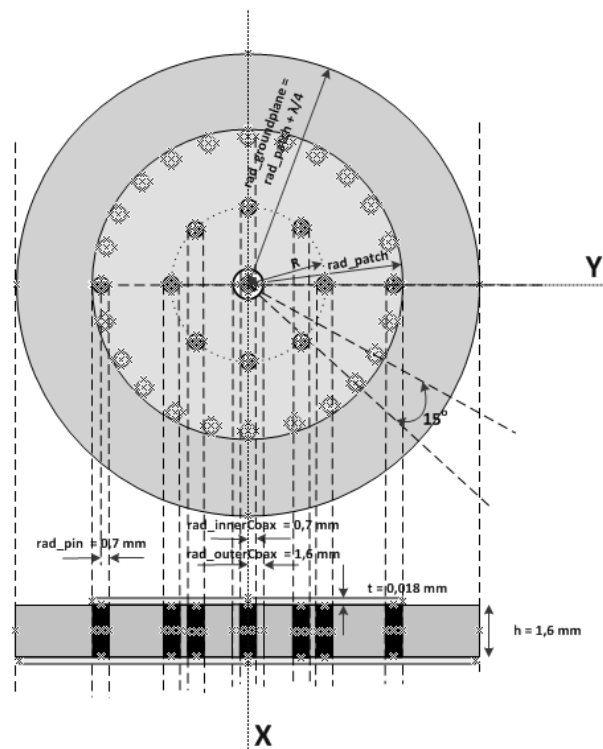
$$C = \frac{t\pi\varepsilon}{\cosh^{-1} \left(\frac{d}{2a} \right)} \quad (2)$$

dimana t adalah ketebalan *substrat*, a adalah radius *shorting pin*, d adalah jarak antar *shorting pin*, dan μ masing –masing adalah permeabilitas dan permitivitas bahan *substrat*.

Pada penelitian ini, telah dilakukan simulasi, optimasi, dan fabrikasi antena *patch* sederhana berbentuk lingkaran dengan *edge shorting pin* dan *symmetrical control pin* dengan fokus penelitian pada optimasi pengarah pola radiasi antena. Algoritma optimasi menggunakan AG dengan bantuan *Finite Element Method (FEM)*. AG diimplementasikan pada matlab dan FEM dilakukan dengan *software* Ansoft HFSS, dimana integrasi keduanya memungkinkan dengan bantuan *scripting* HFSS dengan bahasa *Visual Basic (VBScript)*. Tantangan utama pada penelitian ini adalah mengoptimasi karakteristik pola radiasi antena untuk mendapatkan kemampuan *pattern reconfigurable* dengan derajat yang tinggi dengan tetap mempertahankan karakteristik frekuensi resonansi antena.

2. STRUKTUR ANTENA

Desain antena yang diteliti merupakan antena *patch* lingkaran dengan menambahkan 8 *shorting pin* yang posisinya simetris diletakkan di area *patch* membentuk garis lingkaran dengan radius tertentu yang selanjutnya disebut *symmetrical control pin*. Fungsi utama *control pin* ini adalah untuk *matching impedance*. Dengan penambahan *symmetrical control pin* ini, metoda pencatutan *probe feed* bisa dipertahankan di pusat *patch* sedangkan teknik penyepadan impedansinya bisa dilakukan dengan mengatur radius garis lingkaran dari *symmetrical control pin*. Frekuensi resonansi antena ini sangat dipengaruhi oleh radius dalam *patch* nya. Karakteristik dan analisis antena *patch* lingkaran dengan *symmetrical control pin* bisa dilihat pada referensi **(Ravipati dkk. 2005)**.



Gambar 1. Struktur Antena Patch Lingkaran dengan edge shorting pin dan symmetrical control pin

Pada tepi *patch*, 24 swith diintegrasikan pada antena. *Switch* kondisi "ON" direpresentasikan dengan adanya *shorting pin* sedangkan *switch* kondisi "OFF" direpresentasikan dengan tidak adanya *shorting pin*. Antena didesain dengan bahan substrat Epoxy FR4 dengan $\epsilon_r = 4,4$. Struktur antena *patch* lingkaran dengan *symmetrical control pin* yang telah diintegrasikan dengan *edge shorting pin* bisa dilihat pada Gambar 1. Nilai-nilai awal parameter lengkap antena bisa dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Nilai Awal Parameter-parameter Antena Patch Lingkaran dengan edge shorting pin dan symmetrical control pin

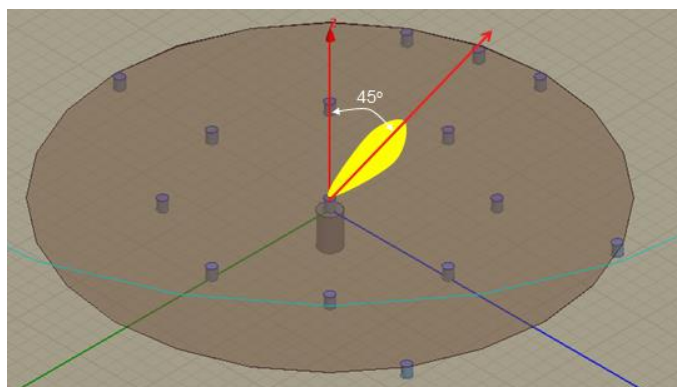
Parameter	Simbol	Nilai
Radius <i>patch</i>	<i>rad_patch</i>	Akan dioptimasi
Radius garis lingkaran <i>symmetrical control pin</i>	R	Akan dioptimasi
Tebal konduktor	t	0,018 mm
Tebal substrat	h	1,6 mm
Radius inner (probe) koaksial	<i>rad_innerCoax</i>	0,7 mm
Radius outer koaksial	<i>rad_outerCoax</i>	1,6 mm

Parameter antena : radius *patch*, radius garis lingkaran *symmetrical control pin*, dan kombinasi *switch* (*edge shorting pin*) akan dioptimasi.

3. PROSEDUR OPTIMASI

3.1 Prosedur Secara Umum

Dalam penelitian ini tujuan utama dari optimisasi adalah untuk mencari konfigurasi kombinasi *switch* pada struktur antenna yang menghasilkan polaradiasi antenna yang sudah di *state* di awal. Dalam desain optimisasi ini, sudut elevasi 45° dijadikan target seperti diilustrasikan pada Gambar 2. untuk dicapai yang tentu saja tetap mempertahankan kondisi *matching* impedansi di titik terminal pada frekuensi yang diinginkan. Untuk itu *variable-variable* yang lain, selain kombinasi *switch*, yaitu radius garis melingkar dari *symmetrical control pin* untuk mengontrol *matching impedance* dan radius *patch* untuk mengontrol frekuensi resonansi perlu dioptimasi juga.

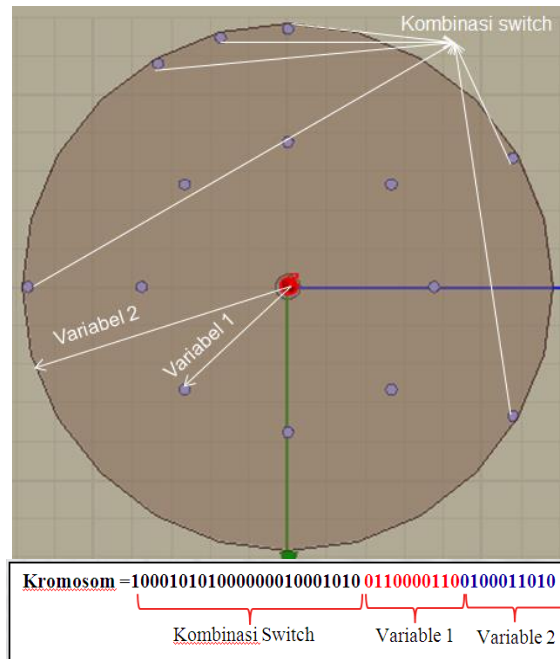


Gambar 2. Ilustrasi Pola pancar Antena Target

Saat hasil optimum ditemukan maka akan didapatkan sebuah desain *pattern reconfigurable antenna*, dimana kemampuan *reconfigurability* didapat dengan memutar kombinasi *switch* yang sudah didapatkan pada proses optimisasi sehingga kemudian pola radiasi antenna bisa diputar secara azimut sebesar 360° dengan derajat *reconfigurability* tiap putaran *beam* tergantung dari jumlah *symmetrical control pin* yang digunakan, karena struktur antenna yang simetris.

Prinsip kerja Algoritma genetika sebenarnya didasarkan pada teori evolusi Darwin. Dalam kasus optimisasi kombinasi *switch* pada antenna untuk *pattern reconfigurable* ini, mula-mula diambil beberapa set kombinasi *switch* (populasi), yang disebut generasi 1, tiap set direpresentasikan dengan kumpulan bit biner (kromosom) sebanyak jumlah *switch* yang dipakai ditambah jumlah bit yang mengkodekan variable-variable lain selain kombinasi *switch*. Sebagai contoh, variable radius *patch* dikodekan dengan 10 bit. Pemilihan jumlah bit biner sebanyak 10 bit untuk mengkodekan nilai variable antenna didasarkan untuk merepresentasikan solusi yang kontinu sehingga semakin banyak jumlah bit yang digunakan, maka akurasi juga semakin tinggi, meskipun ketelitian fabrikasi menjadi batasannya. Pada variable kombinasi *switch*, bit '0' merepresentasikan kondisi *switch* 'off' (tidak ada *shorting pin*) dan bit '1' merepresentasikan kondisi *switch* 'on' (ada *shorting pin*). Ilustrasi pengkodean variable antenna pada struktur antenna untuk algoritma genetika dapat dilihat pada Gambar 3 Kemudian tiap-tiap kromosom dievaluasi fungsi fitnessnya, jika dalam satu generasi belum ada yang memenuhi kriteria, maka dengan operasi pada GA akan dipilih individu yang memiliki nilai fitness yang tertinggi untuk dipilih sebagai orang tua (*parent*). Kemudian dengan menggabungkan (*cross over*) bagian kromosom dari 2 buah orang tua dan sedikit memodifikasi (mutasi) dari kromosom tiap individu, generasi baru dibuat, dan disebut generasi 2. Kemudian generasi kedua ini di evaluasi kembali. Proses ini diulang

kembali hingga seterusnya hingga kriteria terpenuhi atau sampai jumlah generasi yang dibangkitkan selesai dievaluasi dan didapat solusi optimum.



Gambar 3. Ilustrasi Kromosom (AG) pada struktur antenna

Fungsi fitness merupakan nilai kuantitatif yang merepresentasikan performansi dari antenna untuk satu set kromosom. Semakin tinggi nilai fitness maka antenna tersebut semakin mendekati spesifikasi antenna yang diinginkan. Dalam menentukan fungsi fitness sebenarnya ada beberapa pilihan cara, dalam hal ini penulis menggunakan fungsi fitness berikut :

$$\text{Fitness} = 4 \times \text{Directivity } y(\theta, \phi) + |S_{11(\text{dB})}(f)| \quad (3)$$

Fungsi fitness ini akan memaksimalkan pola pancar antenna kearah tertentu dan sekaligus meminimalkan pantulan (*mismatch loss*) pada frekuensi resonansi.

3.2 Blok Diagram FEM/AG

Blok Diagram *Optimizer* menggunakan AG/FEM bisa dilihat pada Gambar 4.

Initiation

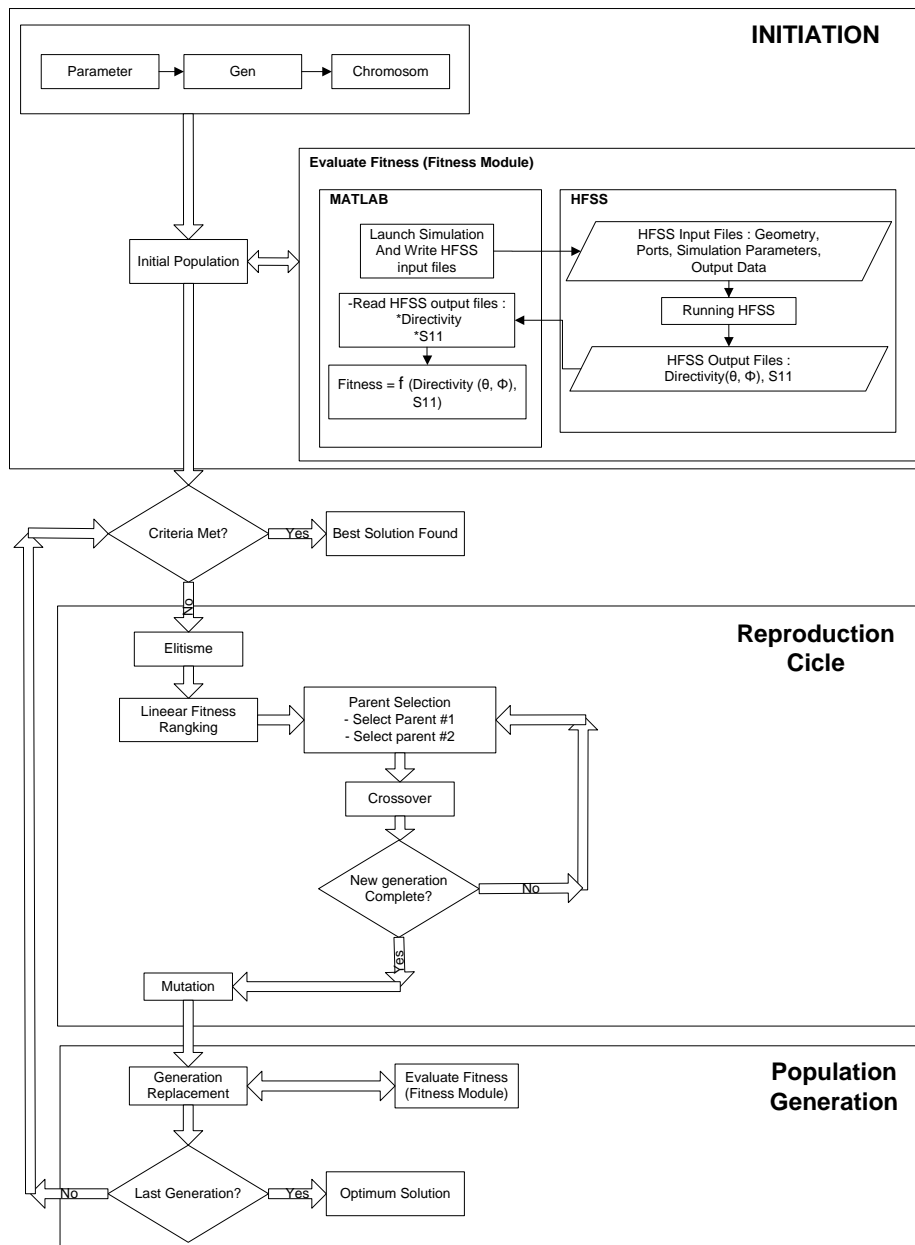
Pada bagian ini, permasalahan optimasi diinisialisasi. Permasalahan utama pada optimasi antenna diterjemahkan dalam lingkungan AG. Pada bagian ini juga sebuah populasi yang terdiri dari beberapa individu dibangkitkan dan di seleksi berdasarkan nilai fitnessnya.

Reproduction Cicle

Pada bagian ini proses-proses AG dijalankan seperti, seleksi orang tua, pindah silang, dan mutasi. Proses-proses ini yang akan menjadi cikal bakal terbentuknya generasi baru.

Population Generation

Pada bagian ini, seluruh individu dalam populasi pada generasi tertentu diganti dengan generasi baru kemudian di hitung kembali nilai fitnessnya.



Gambar 4. Diagram Blok FEM/AG

3.3 AG Parameter Setup

Ada tiga parameter AG yang paling penting dan sangat mempengaruhi hasil dari optimasi. Parameter tersebut adalah ukuran populasi, probabilitas *crossover*, dan probabilitas mutasi. Ukuran populasi yang terlalu sedikit akan membuat variasi pada kromosom tiap generasi sangat rendah sehingga akan cepat konvergen, tapi ukuran populasi yang terlalu besar juga membuat komputasi makin lama. Biasanya ukuran populasi berkisar 30 sampai 1000. Pada penelitian ini ukuran populasi dipilih sebesar 32

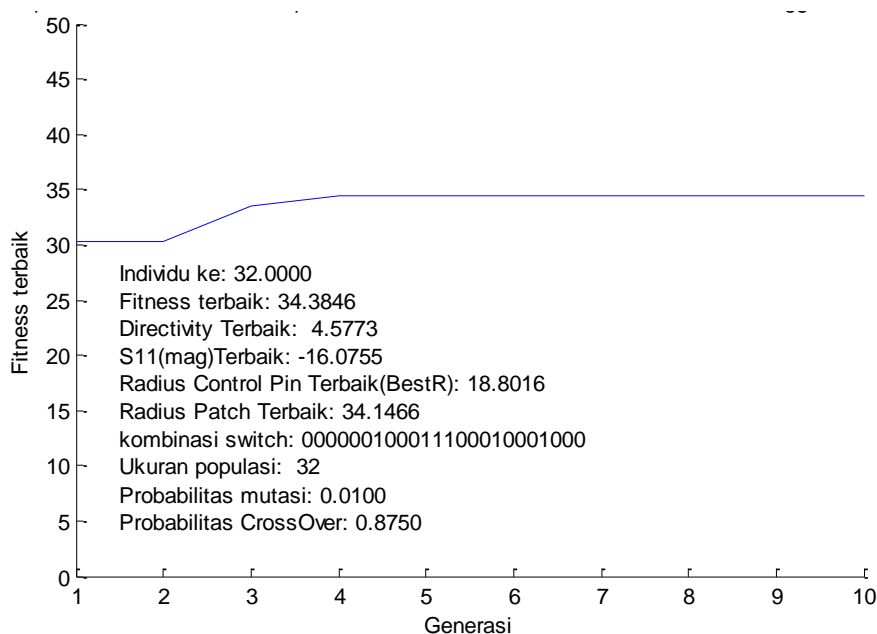
Untuk nilai probabilitas *crossover* biasanya berkisar antara 0,6 sampai 0,9 dan pada penelitian ini digunakan probabilitas *crossover* sebesar 0,875 . Sedangkan untuk probabilitas mutasi biasanya kecil berkisar antara 0,001 sampai 0,01 dan dalam penelitian ini digunakan probabilitas mutasi sebesar 0,01. Ringkasan parameter setup AG pada *pattern reconfigurable antenna* bisa dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. AG Parameter Setup pada *Pattern Reconfigurable Antenna*

ISTILAH	Keterangan dan <i>Setup</i>
<i>Population</i>	Sekumpulan nilai-nilai variable antenna seperti kombinasi <i>switch</i> , radius <i>patch</i> , dan variable pengontrol matching impedance yang nilainya akan dioptimasi dengan algoritma genetika. Ukuran Populasi = 32
<i>Chromosome</i>	Satu nilai variable antenna seperti satu kemungkinan kombinasi <i>switch</i> , satu nilai radius <i>patch</i> , dan satu nilai lebar slit yang telah dikodekan. Satu kromosom = 44 bit
<i>Gen</i>	Satu nilai variable antenna yang telah dikodekan misalnya gen 1 : radius <i>patch</i> (10 bit), gen2 : kombinasi <i>switch</i> (24 bit), gen 3 : lebar slot (10 bit)
<i>Parent</i>	-
<i>Offspring</i>	-
<i>Crossover</i>	One –point Crossover dengan Pc = 0,875
<i>Mutation</i>	Mutasi dimungkinkan terjadi pada seluruh bit dalam kromosom dengan Pm = 0,01
<i>Selection Procedure</i>	Roulette Wheel Selection
<i>Evaluation Function</i>	$Fitness = 4 \times Directivity\ y(\theta, \phi) + S_{11(dB)}(f) $
<i>Generation</i>	Satu populasi yang telah dievaluasi nilai fitnessnya serta mengalami CrossOver dan mutasi disebut generasi ke-N. Maksimum Generasi = 10

4. HASIL OPTIMASI DAN VALIDASI

Hasil simulasi optimum tercapai saat nilai fitness mencapai 34,38 pada iterasi ke-5 (generasi 5) setelah generasi tersebut, tidak ada lagi perbaikan fitness seperti terlihat pada Gambar 5 Sedangkan nilai-nilai *variable* optimum bisa dilihat pada Tabel 3



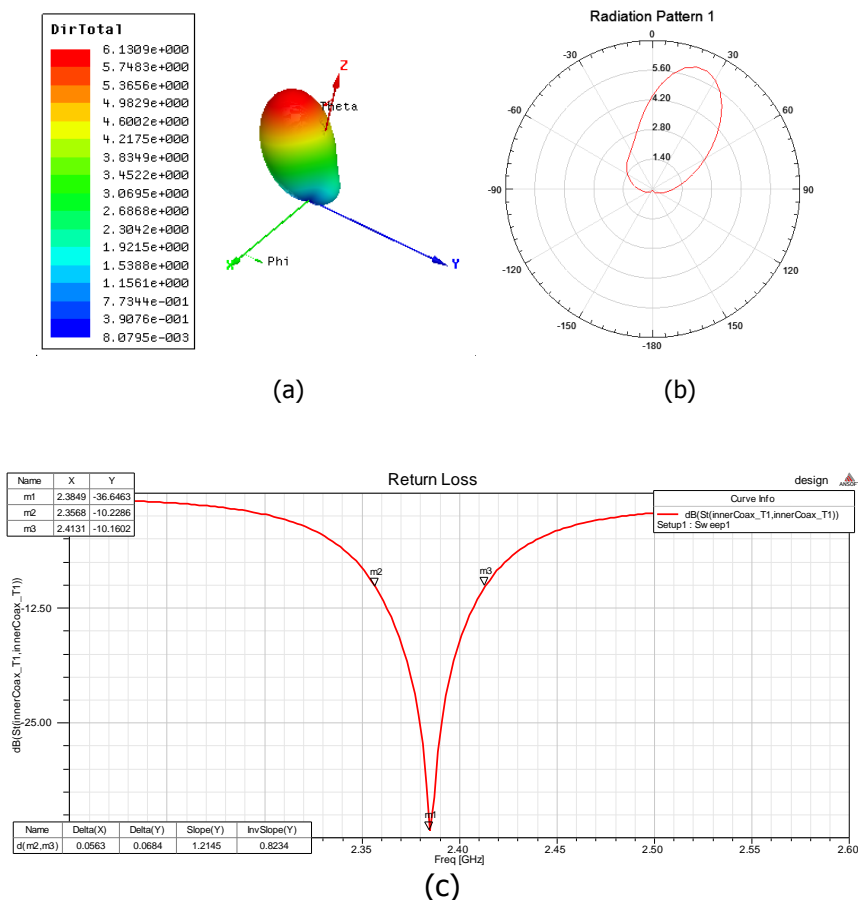
Gambar 5. Hasil simulasi optimasi FEM/AG pada Antena *patch* Lingkaran dengan *edge shorting pin* dan *symmetrical control pin*.

Tabel 3. Nilai variable optimum pada Antena *Patch* Lingkaran *edge shorting pin* dan *symmetrical control pin*.

Variable	Nilai Optimum
Rad_patch	34.1466275659824
R	18.8015640273705
Kombinasi <i>Switch</i>	000000100011100010001000

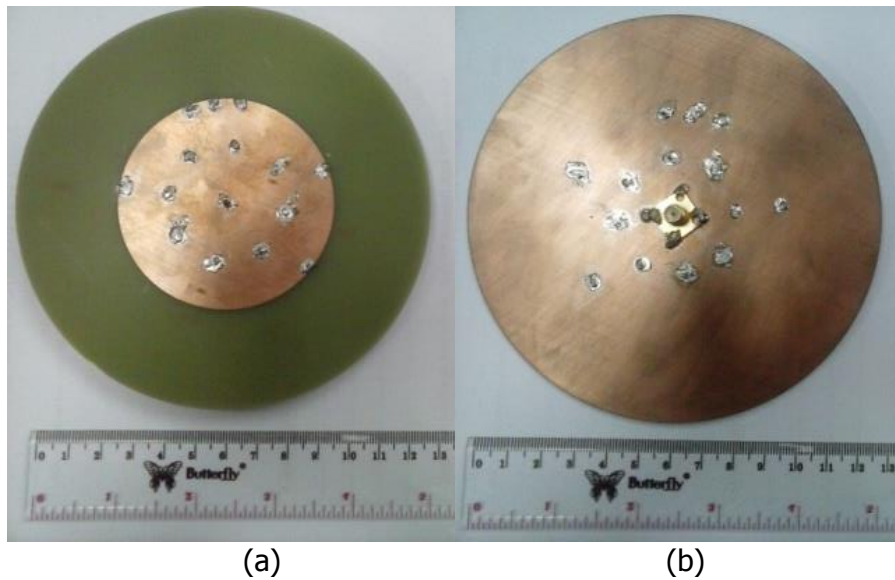
Karakteristik antena menggunakan variable-variable optimum bisa dilihat pada Gambar 6. Dari gambar tersebut terlihat bahwa pola radiasi antena *unidirectional* dengan *main beam* mengarah pada sudut elevasi 30°, sedangkan frekuensi resonansi pada frekuensi 2,385 Ghz dengan *return loss* minimum sebesar -36,65 dB, *directivity* maksimum 6 dB dan bandwidth sebesar 56,3 Mhz atau 2,36%

Karakteristik ini adalah hasil maksimum yang mendekati spesifikasi awal antena. Perubahan pola radiasi arah *azimuth* didapat dengan memutar kombinasi *switch* sejauh 360°. Hasil pola pancar antena dari 8 state (state 1 s/d state 8) bisa dilihat pada tabel 4. Sedangkan perubahan *return loss*nya bisa dilihat pada Gambar 8. Dari gambar tersebut terlihat bahwa perubahan-perubahan state hanya merubah pola pancar antena sedangkan *return loss* nya tetap.



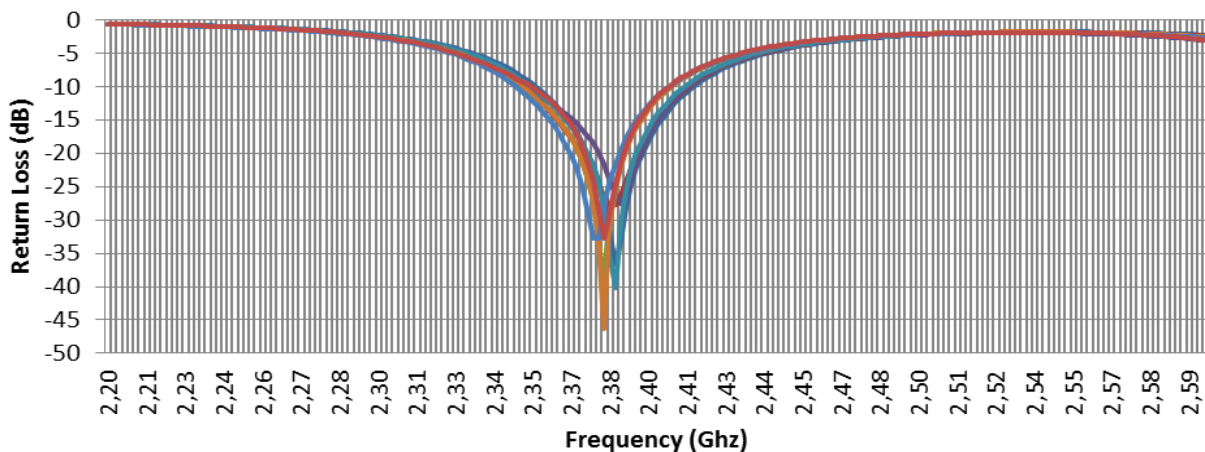
Gambar 6. Karakteristik Antena *Patch* Lingkaran dengan *edge shorting pin* dan *symmetrical control pin* pada variable-variable optimum : (a) pola radiasi 3D, (b) pola radiasi 2D, (c) *return loss*

Realisasi antenna *patch* lingkaran dengan *edge shorting pin* dan *symmetrical control pin* bisa dilihat pada Gambar 7 dengan radius *patch* 34.147 mm, radius garis melingkar dari *symmetrical control pin* 18,802 mm, substrat FR4 Epoxy dengan ketebalan 1,6 mm, serta kombinasi *switch* 000000100011100010001000 dengan radius *shorting pin* 0,7 mm.



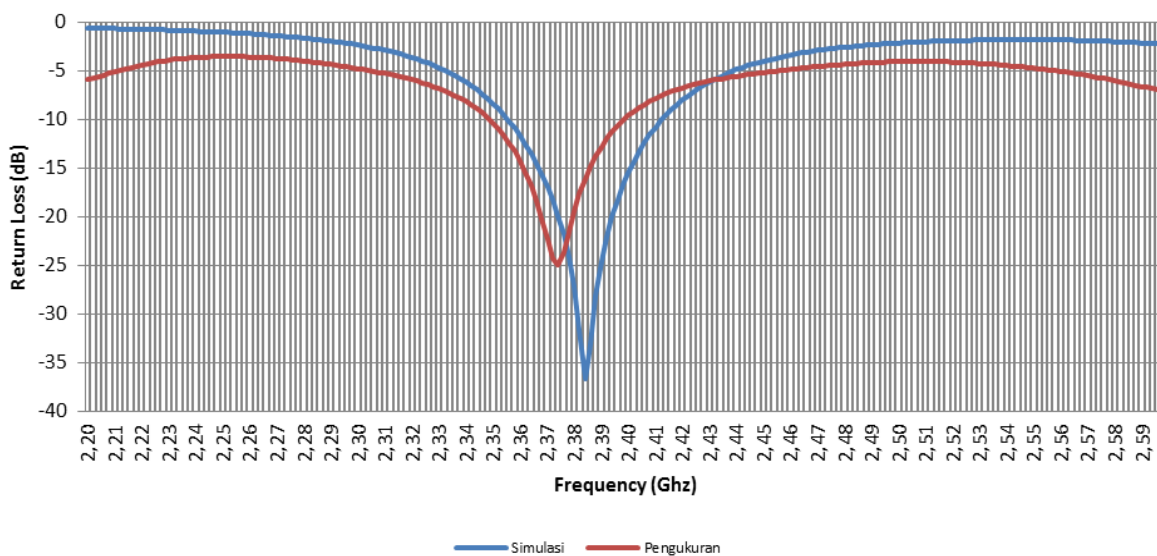
Gambar 7. Hasil Fabrikasi Antena *Patch* Lingkaran dengan *edge shorting pin* dan *symmetrical control pin*, (a) Tampak Depan, (b) Tampak Belakang

Gambar 9 Menunjukkan grafik perbandingan nilai *Return loss* antara simulasi dan pengukuran. Sedangkan pada Gambar 10 menunjukkan perbandingan pola radiasi antara simulasi dan pengukuran. Dari gambar terlihat bahwa hasil simulasi sedikit berbeda dengan pengukuran. Hal ini dikarenakan lingkungan pengukuran yang tidak ideal.

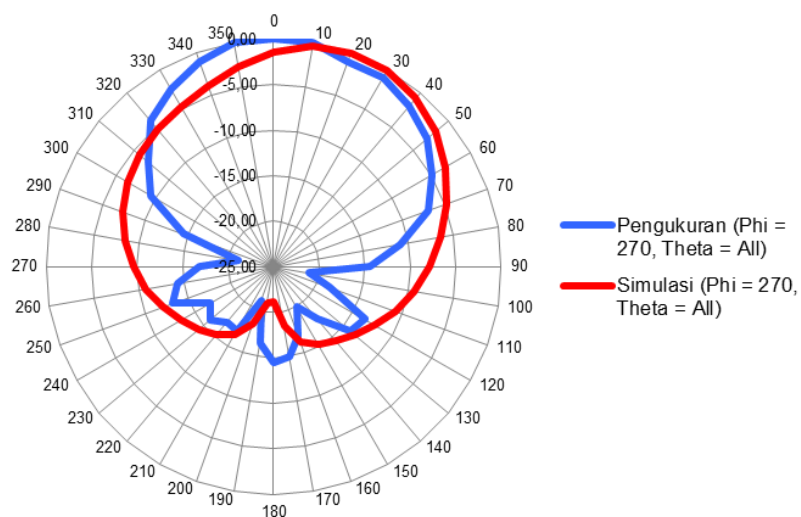


Gambar 8. Return loss pada Antena *Patch* Lingkaran dengan *edge shorting pin* dan *symmetrical control pin* pada 8 state

Optimasi Kombinasi *Switch* Pada *Pattern Reconfigurable Circular Patch Antenna* Menggunakan *Edge Shorting Pin* Dan *Symmetrical Control Pin*

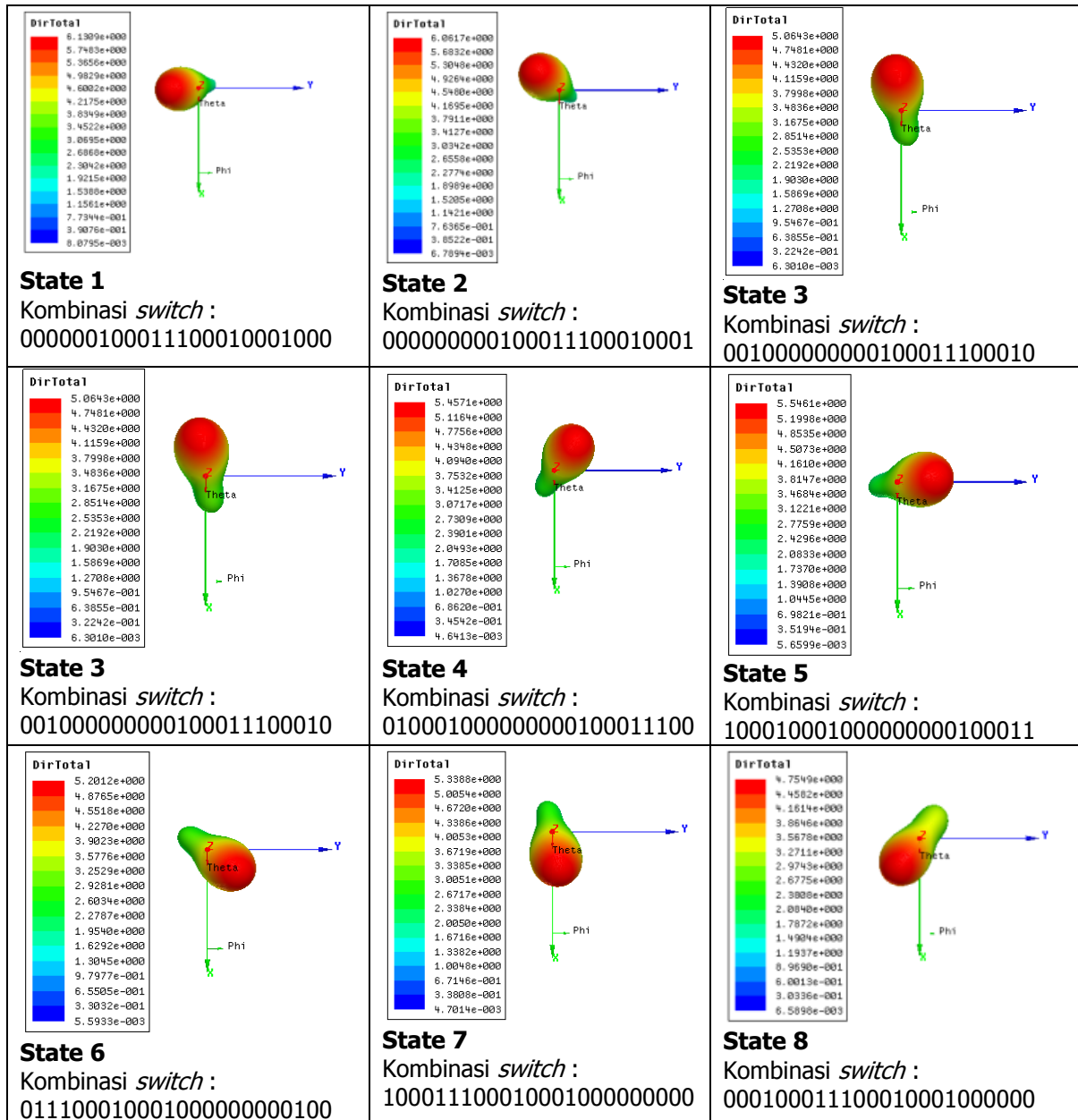


Gambar 9. Grafik Perbandingan *Return loss* pada Antena *Patch* Lingkaran dengan *edge shorting pin* dan *symmetrical control pin*



Gambar 10. Perbandingan Pola Radiasi pada Antena *Patch* Lingkaran dengan *edge shorting pin* dan *symmetrical control pin*

Table Error! No text of specified style in document.. Pola radiasi azimuth pada Antena Patch Lingkaran dengan edge shorting pin dan symmetrical control pin pada 8 state



5. KESIMPULAN

Sebuah metode baru dalam *mendesain pattern reconfigurable antenna* telah diteliti. Antena yang diteliti adalah antena *patch* lingkaran yang diintegrasikan *shorting pin-shorting pin* di tepi *patch* serta menambahkan *shorting pin* melingkar pada *patch* nya untuk mengontrol matching impedansi. Metoda yang digunakan adalah memanfaatkan bentuk antena *patch* lingkaran yang simetris, sehingga dengan memutar kombinasi *switch* yang telah dioptimasi maka didapatlah kemampuan *pattern reconfigurability*. Teknik optimasi yang digunakan adalah dengan menggabungkan algoritma genetika dengan *Finite Element Method*.

Pola radiasi dan plot *return loss* menunjukkan bahwa hasil yang diperoleh dari proses optimasi sesuai dengan tujuan yang diinginkan. Hasil optimasi telah diverifikasi dengan pengukuran antenna yang telah difabrikasi.

Antena *patch* lingkaran dengan *edge shorting pin* dan *symmetrical control pin* yang telah dioptimasi bisa bekerja pada frekuensi 2,4 Ghz menghasilkan 8 kemungkinan arah radiasi azzimuth dengan resolusi 45° dan arah elevasi 30°

Untuk pekerjaan selanjutnya, *switch* RF dan *biasing network* pada *pattern reconfigurable antenna* ini perlu dirancang dan diimplementasikan. Efisiensi dan loss akibat implementasi *switch* RF perlu dipertimbangkan

DAFTAR RUJUKAN

- Anders G. Derneryd. (1979). *Analysis of the Microstrip Disk Antenna Element*. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. ap-27, no. 5
- C. B. Ravipati, D. R. Jackson, and H. Xu. (2005). *Center-Fed Microstrip Antennas with Shorting Vias for Miniaturization*. IEEE.
- C. Jung, M.Lee, G.P.Li, and F.DeFlaviis. (2006). *Reconfigurable scan-beamsingle-arm spiral antenna integrated with RF MEMS switches*. IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. 54, pp. 455–463.
- D.S. Linden. (1997). *Automated Design and Optimization of Wire Antennas using Genetic Algorithms*. Ph.D. Thesis, MIT.
- F. J. Ares-Pena, J. A. Rodriguez-Gonzalez, E. Villaneuva-Lopez, and S. R. Rengarajan. (1999). *Genetic algorithms in the design and optimization of antenna array patterns*. IEEE Trans. Antennas Propagation, vol.47, p.506.
- G. H. Huff, J.Feng, S.Zhang, and J.T.Bernhard. (2003). *A novel radiation pattern and frequency reconfigurable single Turn square spiral microstrip antenna*. IEEE Microwave Wireless Comp.Lett., vol.13, pp.57–59.
- G. H. Huff and J. T. Bernhard. (2004). *Analysis of a radiation and frequency reconfigurable microstrip antenna*. Proc. 2004 Antenna Applications Symposium, pp. 175–191.
- G. H. Huff and J.T.Bernhard. (2006). *Integration of packaged RF MEMS switches with radiation pattern reconfigurable square spiral microstrip antennas*. IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. 54, pp. 464–469.
- H. Choo, A. Hutani, L.C. Trintinalia, and H. Ling. (2000). *Shape optimization of broadband microstrip antennas using genetic algorithm*. Electronic Letters, vol. 36, no. 25, pp. 2057-2058.
- H. Choo and H. Ling. (2002). *Design of Multiband Microstrip Antennas Using a Genetic Algorithm*, IEEE Microwave and Wireless Components Letters, vol. 12, no. 9, pp. 345-347.

Josef Meixner, "The Radiation Pattern and Induced Current in a *Circular* Antenna with an Annular Slit" Electromagnetic Wave Theory Symposium

J. T. Bernhard. (2007). *Reconfigurable Antennas*, ed. Constantine Balanis, Morgan & Claypool, San Rafael, CA.

Lopez, Daniel Rodrigo. (2010). *Time Reconfigurable Pixelled Antennas*. Master Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.

L. C. Shen, S. A. Long, M. R. Allerdig, And M. D. Walton. (1997). *Resonant Frequency of a Circular Disc, Printed Circuit Antenna*. IEEE Transactions On Antennas And Propagation.

M. Ali, A. T. M. Sayem, and V. K. Kunda. (2007). *A reconfigurable stacked microstrip patch antenna for satellite and terrestrial links*. IEEE Trans. Vehicular Tech., vol. 56, no. 2, pp 426–435.

N. Herscovici, M. F. Osorio, and C. Peixeiro. (2001). "Minimization of a rectangular *patch* using genetic algorithms," in Proc. IEEE Antennas and Propagation Int. Symp., vol. 4, Boston, MA, 34–37.

O. Ozgun, S. Mutlu, M. I. Askun, and L. Alatan. (2003). *Design of dual frequency probe-fed microstrip antennas with genetic optimization algorithm*. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 51, no. 8, pp. 1947–1954.

Rajanish and T. S. Vedavathy. (1999). *Resonant Frequency Of Higher Order Modes For Circular Microstrip Antennas*. IEEE.

Ramesh Garg, Prakash Bhatia, Inder Bahl and Apisak Ittipiboon. (2001). *Microstrip Antenna Design Handbook*. Artech House, Inc.

S.-H.Chen, J.-S.Row, and K.-L.Wong. (2007). *Reconfigurable square-ring patch antenna with pattern diversity*. IEEE Trans. Antennas Prop., vol. 55, pp. 472–475.

Zhi Ning Chen and Michael Yan Wah Chia. (2003). *Center-Fed Microstrip Patch Antenna*. IEEE Transactions On Antennas And Propagation, Vol. 51, No. 3.

Zhang Jiajie, Wang Anguo, Wang Peng. (2008). *A Survey on Reconfigurable Antennas*. IEEE.