ANALISIS PENYERAP GELOMBANG ELEKTROMAGNETIK BERBAGAI BENTUK PATCH BERBASIS ARTIFICIAL MAGNETIC CONDUCTOR

ANALYSIS OF ELECTROMAGNETIC WAVES ABSORPTION OF VARIOUS PATCH BASED-ON ARTIFICIAL MAGNETIC CONDUCTOR

Dzecky Dzackwan Hady[1], Bambang Setia Nugroho[2], Levy Olivia Nur[3]
[1,2,3]Prodi S1 Teknik Telekomunikasi, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom
[1]dzecky@telkomuniversity.ac.id, **[2]bambangsetianugroho@telkomuniversity.co.id**,
[3]levyolivia@telkomuniversity.ac.id

Abstrak

Penelitian tentang penyerap gelombang elektromagnetik telah mengalami perkembangan pesat dalam beberapa tahun terakhir. Penyerap gelombang elektromagnetik memiliki peran dalam mengurangi interferensi gelombang elektromagnetik dengan cara menyerap energi gelombang datang dan mengurangi pantulan yang tidak diinginkan. Teknologi *surface textured* merupakan teknik yang digunakan dalam merealisasikan penyerap gelombang elektromagnetik yang memiliki tingkat penyerapan tinggi. Secara prinsip, teknik ini menggunakan lapisan AMC (*artificial magentic conductor*) dengan karakteristik impedansi permukaan tinggi. Dengan disimulasikan pada *software CST Microwave Studio* menggunakan substrat *FR-4 Epoxy* dengan konstanta dielektrik 4,3 akan dibandingkan tingkat penyerapan yang direpresentasikan sebagai *return loss* (S11) dengan melakukan variasi bentuk *patch*, dimensi substrat dan jarak gap antar *patch* untuk ketiga bentuk *patch* yaitu *patch* lingkaran, segi delapan dan bujur sangkar dengan frekuensi kerja pada 3 GHz. Penambahan elemen resistif membuat tingkat penyerapan menjadi lebih baik bila dibandingkan tanpa elemen resistif.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa penyerap dengan bentuk *patch* persegi yang bekerja pada frekuensi 3 GHz memiliki nilai S11 sebesar -35,578 dB dengan penambahan elemen resistor 600 ohm. Pada penyerap gelombang elektromagnetik dengan bentuk *patch* segi delapan yang bekerja pada frekuensi 3 GHz memiliki nilai S11 sebesar -46,374 dB dengan penambahan elemen resistor 800 ohm. Pada penyerap gelombang elektromagnetik dengan bentuk *patch* lingkaran yang bekerja pada frekuensi 3,01 GHz memiliki nilai S11 sebesar -37,204 dB dengan penambahan elemen resistor 700 ohm.

Kata kunci : Penyerap gelombang elektromagnetik, Artificial Magnetic Conductor, teknologi permukaan bertekstur (textured surface), metamaterial, patch, elemen resistif

Abstract

Research on electromagnetic wave absorbers has experienced rapid development in recent years. Absorbing electromagnetic waves has a role in reducing electromagnetic wave interference by absorbing incoming wave energy and reducing unwanted reflections. Surface textured technology is a technique used in realizing electromagnetic wave absorbers that have high absorption rates. In principle, this technique uses an AMC (artificial magnetic conductor) layer with high surface impedance characteristics. By simulating on CST Microwave Studio software using FR4 Epoxy substrate with a dielectric constant of 4,3 will be compared to the absorption rate represented as return loss (S11) by performing patch variations, substrate dimensions and gap between patches for all three patch forms circle, octagon and square with a working frequency at 3 GHz. Addition of resistive elements makes absorption rates better when compared to resistive elements. The simulation results show that the absorbent in the form of a square patch that works at a frequency of 3 GHz has an S11 value of -35,578 dB by adding 600 ohm resistor elements. In electromagnetic wave absorbers with octagonal patch form that works at a frequency of 3 GHz has an S11 value of -46,374 dB with the addition of an 800 ohm resistor element. In absorbing electromagnetic waves with a circle patch form that works at a frequency of 3.01 GHz has a S11 value of -37.204 dB with the addition of a 700 ohm resistor element.

Keywords: Absorber of Electromagnetic Wave, Artificial Magnetic Conductor, Textured Surface Technology, Metamaterial, Patch, Resistive Element

1. Pendahuluan

Penelitian tentang penyerap gelombang elektromagnetik dalam beberapa tahun terakhir telah mengalami perkembangan pesat. AMC adalah salah satu dari bahan *metamaterial* atau sering disebut sebagai *artificial metamaterial*. AMC merupakan bahan komposit yang sifatnya mirip dengan PMC (*Perfect Magnetic Conductor*) yang dapat memantulkan gelombang elektromagnetik datang tanpa mengubah fasanya[1]. Penyerap berbasis

metamaterial (model struktur periodik yang memungkinkan untuk merealisasikan desain penyerap gelombang dengan substrat yang tipis) memungkinkan untuk penyerap memiliki kemampuan untuk mengontrol gelombang datang seperti dalam situasi pada ruangan yang memiliki frekuensi serupa. Penyerap ini memiliki komponen *lossy* yang mampu menghilangkan energi sehingga penggunaan penyerap mengarah pada bagaimana mengurangi interferensi[2]. Dengan teknologi *surfaced textured* yang mampu merealisasikan penyerap berbasis AMC menjadi lebih tipis dan kompak sehingga bisa diaplikasikan di komponen yang memiliki dimensi yang kecil.

Pada penelitian ini akan dibahas perbandingan antara beberapa bentuk *patch* untuk memperoleh perbandingan tingkat penyerapan yang paling tinggi dari berbagai bentuk *patch* dan dapat bekerja pada frekuensi yang diinginkan. Frekuensi yang dikehendaki adalah pada frekuensi 3 GHz. Frekuensi tersebut dipilih karena merupakan bagian dari frekuensi *s-band* yang memiliki rentang dari 2 GHz sampai 4 GHz. Bentuk *patch* yang akan diteliti yaitu *patch* lingkaran, *patch* segi delapan, dan *patch* persegi. Parameter yang merepresentasikan tingkat penyerap gelombang yang baik yaitu nilai *return loss* nya, selain itu juga akan diteliti bagaimana pengaruh nilai *return loss* apabila menggunakan resistor dan tanpa resistor pada AMC. Pada penelitian sebelumnya penyerap gelombang berbentuk *patch* segi enam bekerja pada frekuensi 2.78 GHz. Hasilnya penyerap gelombang bekerja dengan baik dan pada penelitian tersebut dibandingkan apakah penyerap tersebut bekerja baik dengan element resistif tambahan atau tanpa element resistif tambahan[1]. Objektif dari penelitian ini adalah untuk melakukan investigasi performa penyerap gelombang elektromagnetik berbasis AMC dengan bentuk patch persegi, lingkaran dan segi delapan. Investigasi dilakukan dengan analisis menggunakan perangkat lunak CST Microwave Studio 2016. Selain bentuk patch, analisis dilakukan dengan melakukan variasi dimensi dari patch masing-masing bentuk tersebut.

2. Dasar Teori

2.1 *Absorber* Gelombang Elektromagnetik

Penyerap gelombang elektromagnetik atau *absorber* dalam bidang RF/*microwave* adalah material yang melemahkan energi gelombang elektromagnetik atau meminimalkan gelombang elektromagnetik yang dipancarkan dan dipantulkan[15]. Beberapa aplikasi dari penyerap gelombang elektromagnetik yang biasa ditemui diantaranya untuk mengurangi interferensi dari elektromagnetik, pelindung dari gelombang elektromagnetik yang tidak diinginkan, *anechoic chambers* dan sebagainya. Pada *tracking radar application*, penyerap radar dapat digunakan untuk mengurangi *Radar Cross Section* (RCS) dari suatu objek yang merupakan salah satu parameter penting dalam sistem radar[1]. Penyerap gelombang elektromagnetik juga digunakan untuk membuat lingkungan ruang bebas dengan menghilangkan refleksi dalam ruang tanpa gema (*anechoic chamber*)[15].

Absorber dapat diterapkan pada berbagai bentuk fisik berbeda yaitu *flexible elastomers*, busa, *epoxy* kaku atau plastik dan dibuat untuk menahan cuaca dan suhu ekstrem.

2.2 Metamaterial

Metamaterial atau dalam istilah lain *artificial* material adalah suatu struktur periodik yang tersusun atas sel/elemen satuan berjumlah terbatas yang dapat memperlihatkan sifat elektromagnetik tertentu tetapi tidak dapat dijumpai di alam[3]. Metamaterial dapat dibuat dari dielektrik, semikonduktor, metal dan sejenisnya. Metamaterial menawarkan manfaat lebih dari peredam konvensional, seperti miniaturisasi lebih lanjut, geometri tipis, adaptasi yang lebih luas, dan peningkatan efektivitas[7]. Penerapan metamaterial pada rancangan industrial mempunyai potensi yang besar dalam bidang optik dan elektronik[6].

2.3 *Artificial Magnetic Conductor*

Salah satu bagian dari metamaterial adalah *Artificial Magnetic Conductor* (AMC) yang merupakan bahan komposit yang sifatnya mirip dengan *Perfect Mgnetic Conductor* (PMC) yaitu dapat memantulkan gelombang datang elektromagnetik tanpa mengubah fasanya[8]. Permukaan PMC memiliki dua sifat dominan yang menarik, pertama *image current* permukaan PMC *in-phase* dengan *original current*, yang memungkingkan reflektor antena dengan permukaan PMC dapat ditempatkan sangat dekat dengan elemen peradiasinya, sehingga ukuran antena menjadi lebih kecil[8]. Sifat yang kedua adalah permukaan PMC memiliki impedansi permukaan yang sangat tinggi sehingga dapat menekan gelombang permukaan yang menyebabkan interferensi antara gelombang permukaan dengan radiasi utama dari antena dapat dikurangi[8]. AMC dapat memberikan perbaikan untuk sistem antena dan menawarkan berbagai aplikasi yang potensial pada antena, *groundplane*, resonator, reflektor, absorber dan komponen pendukung antena lainnya[9-12].

2.4 Teknologi Permukaan Bertekstur

Salah satu teknik untuk mewujudkan AMC adalah dengan menggunakan teknologi permukaan bertekstur (*textured surface*). Teknik ini diperkenalkan oleh Sievenpiper yang pada dasarnya berupa struktur dengan impedansi permukaan tinggi yang terdiri dari metal periodik yang dihubungkan dengan lapisan metal menggunakan konduktor vertikal (*via*)[3,13]. Akan tetapi, kehadiran konduktor vertikal (*via*) pada permukaan

berimpedansi tinggi ini cukup menyulitkan realisasinya sehingga banyak penelitian yang kemudian meniadakan via diganti menjadi struktur yang planar[9,10,12]. AMC yang berbasis teknologi *textured surface* diterapkan pada material penyerap. Karena pada dasarnya AMC merupakan suatu struktur permukaan berimpedansi tinggi, dengan menempatkan lapisan tersebut di bawah lapisan lain yang bersifat resistif, maka ruang berjarak λ/4 yang sebelumnya digunakan pada teknik *Salisbury screen* dapat dihilangkan. Hal tersebut memungkinkan untuk merealisasi material penyerap dengan struktur yang tipis dan kompak[14].

2.5 Dimensi *Absorber* Berbasis AMC

Dalam merancang *absorber* berbasis AMC, frekuensi kerja dari *absorber* merupakan varibel awal yang harus ditentukan. Frekuensi kerja dari *absorber* bergantung pada struktur pembangun AMC dari susunan *patch* di atas sebuah *groundplane* dielektrik substrat yang biasa disebut juga unit sel. Oleh karena itu, struktur AMC bekerja berdasarkan frekuensi resonansi dari unit selnya. Pada disertasi Sievenpiper yang berjudul "High Impedance Electromagnetic Surface" diperkenalkan persamaan yang dapat digunakan untuk menentukan nilai L dan C dengan mengatur dimensi absorber persamaan (2.1) dan (2.2) [13]. Dari persamaan tersebut akan diperoleh persamaan (2.3) untuk menentukan frekuensi resonansi dari *patch* tersebut.

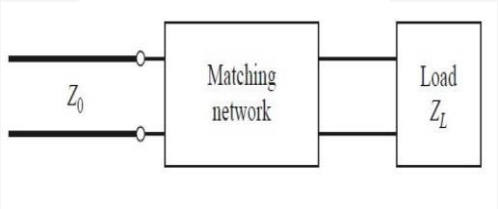
$$C = \frac{w}{\pi}\,(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)cosh^{-1}(\frac{a}{g}) \tag{2.1}$$

$$L = \mu . t \tag{2.2}$$

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \tag{2.3}$$

2.6 Penyesuai Impedansi

Untuk menganalisis sifat-sifat pantulan struktur permukaan berterkstur dari sel satuan tersebut dapat digunakan pendekatan analisis model saluran transmisi seperti ilustrasi pada gambar 2. Pendekatan analisis ini masih dimungkinkan karena sel satuan mempunyai ukuran yang jauh lebih kecil dibandingkan panjang gelombangnya (λ). Tingkat penyerapan gelombang elektromagnetik sangat bergantung dengan penyesuaian impedansi yang mana dapat digambarkan sebagai koefisien refleksi antara impedansi udara (Z_0) dan impedansi permukaan bertekstur (Z_{patch}). Saluran transmisi *matched* jika impedansi *input* sama dengan impedansi beban ($Z_0 = Z_L$)[1]. Konsep rangkaian penyesuaian impedansi sebagaimana dapat diperlihatkan pada Gambar 1 dibawah ini:

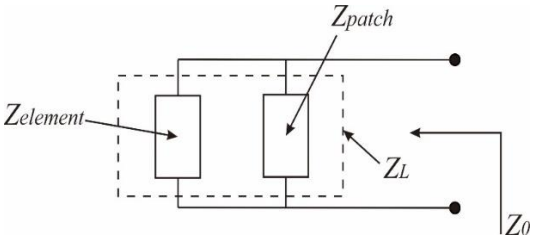


Gambar 1 Rangkaian penyesuai impedansi

Koefisien refleksi (Γ) pada penyesuaian impedansi dapat dituliskan dalam persamaan :

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \tag{2.4}$$

Agar koefisien refleksi penyerap gelombang elektromagnetik dapat diminimalisir atau bahkan bernilai nol, maka nilai impedansi beban (Z_L) harus mendekati atau sama dengan nilai impedansi udara (Z_0). Kondisi ini dapat terpenuhi dengan memilih nilai impedansi elemen ($Z_{element}$) dibuat lebih rendah dari nilai impedansi permukaan bertekstur (Z_{patch}) karena pada umumnya impedansi permukaan bertekstur jauh lebih besar daripada impedansi udara bebas. Jika kondisi ini berlaku maka jumlah energi yang dekembalikan dari struktur permukaan bertekstur dapat ditekan secara maksimal dan akan berefek pada peningkatan penyerapan energi yang diterima. Hubungan antara impedansi udara (Z_0) dengan impedansi permukaan bertekstur (Z_{patch}) ditunjukkan pada Gambar 2 di bawah ini :



Gambar 2 Model penyesuai impedansi dari saluran transmisi

3. Simulasi Sel Unit dan *Array Patch*

3.1. Spesifikasi

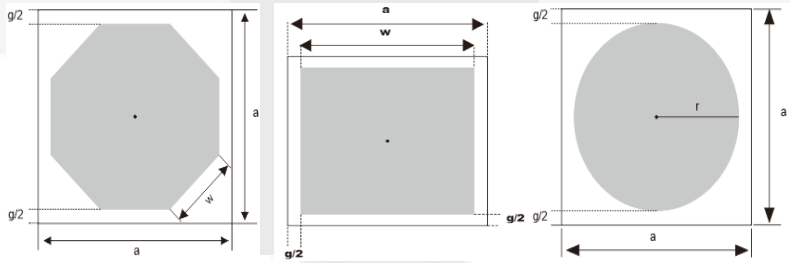
Spesifikasi penyerap gelombang elektromagnetik yang akan dirancang terbuat dari bahan substrat FR-4 Epoxy dengan konstanta dielektrik 4,3 dan bahan patch dari tembaga. Spesifikasi parameter penyerap gelombang elektromagnetik dituangkan pada Tabel 1

Tabel 1 Spesifikasi penyerap gelombang elektromagnetik

Frekuensi Kerja	3 GHz
Bentuk *Patch*	Segi delapan, Persegi dan Lingkaran
Bahan *Patch*	Tembaga
Substrat	*FR-4 Epoxy*
Return Loss	-25 dB
Bandwidth	100 MHz

3.2. Penentuan Dimensi Penyerap Masing-masing Bentuk *Patch*

Gambar 3 menunjukkan tiga bentuk *patch* sel unit penyerap gelombang elektromagnetik berbasis AMC yang akan dianalisis. Masing-masing *patch* dicetak dengan teknik *printed circuit board* (PCB) di atas substrat dielektrik berbahan FR-4 Epoxy yang memiliki lebar substrat a dan lebar sisi *w* atau jari-jari *patch r* untuk *patch* lingkaran. Penentuan dimensi penyerap dari setiap bentuk *patch* diawali dari menentukan *gap* (*g*) lalu lebar substrat (*a*) dan lebar *patch* (*w*) atau jari – jari *patch* (*r*). Untuk dapat bekerja di frekuensi yang sama maka masing – masing *patch* dan lebar substrat dielektriknya akan memiliki dimensi berbeda – beda. Setelah diperoleh dimensi penyerap menggunakan persamaan Sievenpiper di atas, selanjutnya dilakukan optimasi sel unit, kemudian dimensi disesuaikan dengan dimensi alat ukur. Untuk *patch* segi delapan, lebar substrat (*a*) dan lebar sisi *patch* (*w*) masing-masing 9,84 mm dan 24,76 mm. Sedangkan *patch* persegi, lebar substrat (*a*) dan lebar sisi *patch* (*w*) masing-masing 19,98 mm dan 20,98 mm. Adapun *patch* lingkaran memiliki lebar substrat (*a*) dan jari-jari *patch* masing-masing sebesar 12,4 mm dan 25,8 mm.



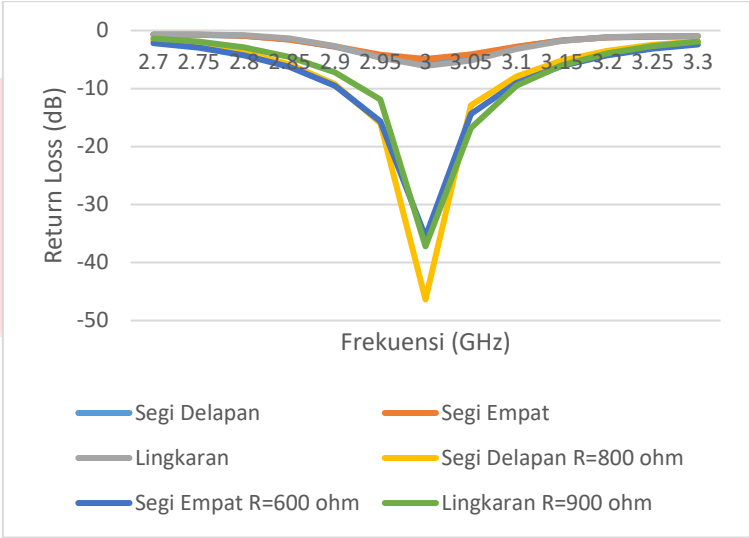
(a) (b) (c)

Gambar 3 Bentuk *patch* penyerap gelombang elektromagnetik berbasis AMC
(a) segi delapan, (b) persegi (c) lingkaran

3.3. Simulasi

Dimensi unit sel penyerap gelombang elektromagnetik dirancang berdasarkan perhitungan numerik menggunakan rumus (2.1) sampai (2.3). Hasil simulasi sel unit dilakukan untuk ketiga bentuk *patch* dengan dimensi penyerap yang telah disebutkan sebelumnya dan hasilnya terlihat pada Gambar 4. Untuk mendapatkan nilai *return loss* yang lebih baik, elemen resistif ditambahkan diantara *patch* yang berdekatan dengan arah sejajar medan listrik. Elemen resistif berupa resistor yang ditambahkan untuk ketiga bentuk *patch* memiliki nilai berbeda-

beda karena masing-masing bentuk memiliki nilai impedansi permukaan yang berbeda. Untuk *patch* bentuk segi delapan nilai resistornya 800 ohm, *patch* bentuk persegi nilai resistornya 600 ohm dan *patch* bentuk lingkaran nilai resistornya sebesar 700 ohm. Terlihat dari hasil simulasi ketiga bentuk *patch* penyerap gelombang bekerja pada frekuensi 3 GHz. Terlihat perbedaan nilai *return loss* ketiga bentuk *patch* dengan dan tanpa resistor. Untuk bentuk *patch* segi delapan, persegi dan lingkaran tanpa resistor berturut-turut memiliki nilai *return loss* sebesar -5,66 dB, -4,89 dB dan -6,11 dB.



Gambar 4 Perbandingan *return loss* dengan frekuensi resonansi ketiga bentuk *patch* dengan dan tanpa resistor

Selanjutnya penyerap gelombang elektromagnetik disimulasikan kedalam bentuk array dan diperoleh nilai *return loss* dan frekuensi resonansi yang dituangkan dalam Tabel 2.

Tabel 2 Hasil simulasi penyerap gelombang dalam bentuk *array*

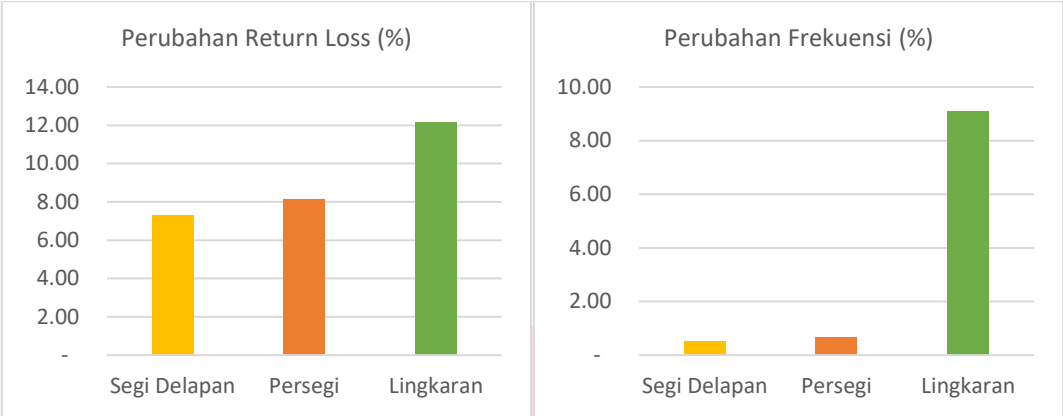
Bentuk *patch*	*Retun loss* (S11)	Frekuensi resonansi	*Bandwidth*
Segi delapan	-46,37 dB	2,996 GHz	167 MHz
Persegi	-35,58 dB	2,992 GHz	182 MHz
Lingkaran	-42,8 dB	3 GHz	160 MHz

4. Analisis

Analisis difokuskan untuk melihat perubahan parameter kinerja *absorber* seperti *return loss* dan frekuensi resonansi jika dilakukan variasi perubahan terhadap dimensi *patch* (*w*), *gap* antar *patch* (*g*) dan dimensi substrat (*a*) dengan variasi setiap 1 mm dengan model *absorber* yang telah didesain seperti pada bab 3. Hasil simulasi yang ditampilkan pada bab ini merupakan hasil yang diperoleh dengan mengacu pada frekuensi kerja yang telah sesuai dengan spesifikasi yaitu di frekuensi 3 GHz. Hasil tersebut diperoleh dengan mengatur dimensi *patch* dan dimensi substratnya sedangkan *gap* atau jarak antar *patch* diatur g =1 mm untuk memudahkan analisis secara teori dan mengikuti referensi pada penelitian sebelumnya.

4.1 Variasi Dimensi Substrat

Patch segi delapan, variasi dimensi substrat diawali dari a = 24,76 mm, lalu untuk *patch* bentuk persegi variasi dimensi substrat diawali dari a = 20,98 mm, variasi dimensi substrat lingkaran diawali dari a = 25,8 mm. Rentang variasi dimensi substrat batas bawah ditentukan oleh dimensi substrat yang respon frekuensinya tepat di 3 GHz sementara batas atas semua bentuk *patch* disamakan di a = 40 mm karena pertimbangan ukuran dimensi penyerap gelombang elektromagnetik agar tetap kompak dan tidak terlalu besar. Variasi dilakukan tiap 1 mm di rentang tersebut dengan menjaga nilai dimensi *patch* (*w*) tetap di w = 9,84 mm untuk *patch* segi delapan, w = 19,98 mm untuk persegi dan w = 12,4 mm untuk lingkaran. Perubahan pada *return loss* akibat variasi dimensi substrat yaitu semakin kecil ukuran substrat maka nilai *return loss*nya semakin rendah. Perubahan nilai *return loss* yang terjadi untuk masing – masing bentuk *patch* ditampilkan pada Gambar 5a. Sedangkan respon frekuensi resonansi bergeser semakin tinggi saat dimensi substrat semakin tinggi pula, perubahan frekuensi resonansi yang terjadi untuk masing – masing bentuk *patch* ditampilkan pada Gambar 5b.

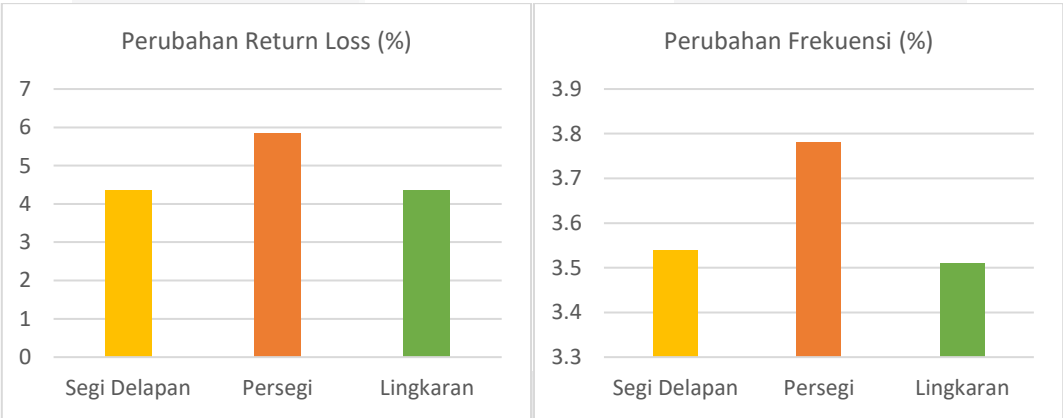


(a) (b)

Gambar 5 Perubahan *return loss* (a) dan frekuensi resonansi (b) akibat perubahan dimensi substrat dengan kondisi dimensi *patch* konstan

4.2 *Gap* Antar *Patch*

Untuk menjaga agar nilai *gap* tetap, maka variasi yang dilakukan adalah pada dimensi substrat (*a*) dan dimensi *patch* (*w*). Untuk bentuk *patch* segi delapan, variasi dimensi substrat (*a*) diawali dari *a* = 40 mm hingga *a* = 15 mm. Sedangkan bentuk *patch* persegi, variasi dimensi substrat diawali dari a = 40 mm hingga a = 12 mm. Dan untuk bentuk *patch* lingkaran variasi dimensi substrat (*a*) diawali dari dari *a* = 40 mm hingga *a* = 15 mm. Sementara untuk dimensi variasi *patch* menyesuaikan variasi dimensi substratnya dengan mengacu terhadap *gap* g = 1 mm. Hasilnya menunjukkan bahwa nilai *return loss* semakin rendah jika dimensi substrat dan dimensi patch semakin besar. Perubahan respon frekuensi resonansi menjadi bergeser semakin tinggi jika dimensi substrat dan dimensi *patch* semakin kecil. Perubahan nilai *return loss* yang terjadi untuk masing – masing bentuk *patch* ditampilkan pada Gambar 7a. Dan perubahan frekuensi resonansi yang terjadi untuk masing – masing bentuk *patch* ditampilkan pada Gambar 7b.



(a) (b)

Gambar 7 Perubahan *return loss* (a) dan frekuensi (b) dengan kondisi *gap* konstan

5. Kesimpulan

Seluruh proses analisis yang diawali dengan perancangan dimensi secara numerik, simulasi, optimasi dan variasi dimensi telah dilakukan terhadap penyerap gelombang elektromagnetik pada 3 bentuk *patch* yang berbeda. Hasil simulasi menunjukkan bahwa penyerap dengan bentuk *patch* segi delapan, persegi dan lingkaran dapat bekerja di frekuensi 3 GHz dengan ukuran dimensi yang berbeda. Penambahan elemen resistif berupa resistor dapat meningkatkan nilai *return loss* untuk ketiga bentuk *patch* dimana masing-masing memiliki nilai resistor yang berbeda dikarenakan masing-masing bentuk memiliki nilai impedansi permukaannya masing-masing. Untuk bentuk segi delapan, persegi dan lingkaran masing-masing memiliki nilai resistor sebesar 800 ohm, 600 ohm dan 700 ohm. Semakin besar nilai resistor, tingkat penyerapan akan semakin baik hingga mencapai nilai tertentu dimana impedansi permukaan AMC telah match dengan impedansi ruang bebas. Bentuk *patch* tidak mempengaruhi besar bandwidth dikarenakan bandwidth merupakan fungsi dari ketebalan substrat. Mengubah-ubah luas *patch*, luas substrat dan mempertahankan nilai *gap* dari penyerap gelombang elektromagnetik homogen dapat mengubah frekuensi resonansinya dan nilai *return loss*.

Daftar Pustaka:

[1] L. O. Nur, A. Munir, Sugihartono, A. Kurniawan, "Perancangan Dan Fabrikasi Penyerap Gelombang Elektromagnetik Patch Segi Enam Berbasis Surface Textured", TEKTRIKA, Januari 2016.

[2] W. Hiroki, Sievenpiper F. Daniel, C. Christos, "Designing Flexible and Versatile Metamaterial Absorber", IEEE Electromagnetic,2016.

[3] M. Li, H.-L. Yang, X.-W. Hou, Y. Tian, and D.-Y. Hou, "Perfect metamaterial absorber with dual bands," Progress In Electromagnetics Research, Vol. 108, 37-49, 2010.

[4] Munir, A. Dan V. Fusco, "Effect of Surface Resistor Loading on High Impedance Surface Radar Absorber Return Loss and Bandwidth" Microwave and Optical Tech. Lett., vol. 51, no. 7, pp. 1773-1775, Juli 2009.

[5] Sievenpiper, D., L. Zhang, R. Broas, N. G. Alexopolous, dan E. Yablonovitch, "High-Impedance Electromagnetic Surface with Forbidden Frequency Band", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 47, no. 11, pp. 2059-2074, November 1999.

[6] Bhattacharya. A., "Modeling and Simulation of Metamaterial-Based Devices for Industrial Applications Application Engineer", (white paper), CST AG, Darmstadt, Germany.

[7] M. Yoo and S. Lim, "Polarization-Independent and Ultrawideband Metamaterial Absorber Using a Hexagonal Artificial Impedance Surface and a Resistor-Capacitor Layer," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 62, no. 5, pp. 2652-2658, 2014.

[8] Y. Zhang, J. Von Hagen and W. Wiesbeck, "Patch array as artificial magnetic conductors for antenna gain improvement," Microw. Opt. Technol. Lett., vol. 35, pp. 172175, 2002.

[9] N. Engheta, "Thin absorbing screens using metamaterial surfaces", IEEE AP-S International Symposium, San Antonio, Texas, pp. 392-395, Juli 2002.

[10] Y. Zhang, J. Von Hagen, M. Younis, C. Fischer, dan W. Wiesbeck, "Planar Artificial Magnetic Conductors and Patch Antennas", IEEE Trans. Antennas and Propagation, vol. 51, no. 10, pp. 2704-2712, Oktober 2003.

[11] A. Tennant dan B. Chambers, "Adaptive radar absorbing structure with PIN diode controlled active frequency selective surface," Smart Material Structure, volume 13, pp. 122-125, 2004.

[12] A.P. Feresidis, G. Goussetis, et all "Artificial Magnetic Conductor Surfaces and Their Application to Low-Profile High-Gain Planar Antennas" IEEE Trans Antennas and Propagation, vol. 53, pp.209-215, no. 1, Januari 2005.

[13] Sievenpiper, D., "High-Impedance Electromagnetic Surfaces", PhD Thesis, UCLA, 1999.

[14] L. O. Nur and A. Munir, "Thin em wave absorber composed of octagonal patch array and its characteristic measurement," 2015 3rd Int. Conf. Inf. Commun. Technol. ICoICT 2015, pp. 604–607, 2015

[15] Hippel, A. "Theory and Application of RF/Microwave Absorbers", (white paper), Emerson & Cuming Microwave Products, Inc.