

Miniaturisasi Dimensi Antena Mikrostrip Lingkaran Menggunakan Material Dielektrik Artifisial Berbahan *Styrofoam* Termodifikasi

Hepi Ludyati¹, M. Farid Susanto², Sutrisno³, Cucun Noviyanti⁴

Politeknik Negeri Bandung/Jurusan Teknik Elektro

Jalan Gegerkalong Hilir, Desa Ciwaruga, Bandung 40012, Kotak Pos 1234, 022-2013789 /

Fax. 022-2013889

hepi.ludyati@polban.ac.id¹, mfarids2003@yahoo.com², sutrisno@polban.ac.id³,

cucunnoviyanti24@gmail.com⁴

Abstrak – Penggunaan substrat dengan permitivitas tinggi dibutuhkan dalam miniaturisasi dimensi antena mikrostrip terutama bagi antena mikrostrip yang bekerja pada daerah frekuensi VHF. FR-4 Epoxy merupakan salah satu substrat alami yang memiliki permitivitas tinggi, yaitu berkisar dari 4,4 - 4,6. Substrat ini sangat mudah didapatkan di pasaran, namun sayang memiliki rugi-rugi yang cukup besar. Penelitian ini mengusulkan penggunaan styrofoam yang memiliki rugi-rugi rendah untuk menggantikan penggunaan FR-4 Epoxy sebagai substrat pada antena mikrostrip lingkaran. Antena mikrostrip dirancang bekerja pada frekuensi tengah 1800 MHz. Untuk meningkatkan nilai permitivitas, styrofoam dimodifikasi dengan memasang sejumlah kawat-kawat konduktor tipis menembus permukaan styrofoam. Pada kasus ini, styrofoam disebut sebagai host material. Distribusi amplitudo maksimum dari mode TM_{01} dijadikan referensi untuk penempatan kawat-kawat konduktor di atas permukaan host material. Sebagai pembandingan, direalisasikan pula antena mikrostrip lingkaran konvensional berbahan substrat styrofoam tanpa modifikasi. Dari hasil pengukuran diperoleh bahwa kawat-kawat konduktor dengan diameter 1 mm dan berjumlah 90 buah pada konfigurasi mode TM_{01} , telah berhasil memperkecil ukuran antena mikrostrip lingkaran konvensional berkisar 30,6 % pada frekuensi 1800 MHz.

Kata kunci: material dielektrik artifisial, styrofoam termodifikasi, transverse magnetic, miniaturisasi, permitivitas.

1. Pendahuluan

Perkembangan perangkat telekomunikasi terintegrasi saat ini mensyaratkan antena *portable*. Industri penyedia antena harus mendukung kebutuhan ini dengan memproduksi antena bermassa ringan, berdimensi kecil dan memiliki sifat *conformal*. Di lain pihak, bagaimana mendesain jenis-jenis antena *portable* dengan performa yang memenuhi kriteria untuk suatu aplikasi tertentu, menjadi bahan penelitian di lingkungan perguruan tinggi dan lembaga penelitian tertentu.

Para peneliti mengusulkan penggunaan antena mikrostrip dengan berbagai bentuk *patch* sebagai pengganti antena batang. Namun bagi aplikasi-aplikasi pada daerah frekuensi VHF, antena mikrostrip tetap saja masih memiliki dimensi yang besar, terlebih lagi jika antena mikrostrip menggunakan material substrat dengan permitivitas rendah. Salah satu contoh substrat dengan permitivitas rendah yaitu 2,2 untuk membuat antena mikrostrip adalah RT/duroid® 5870 /5880. Substrat ini banyak dipilih karena memiliki rugi-rugi rendah [1].

Sejak penelitian tentang material dielektrik artifisial pada tahun 2003 mulai dikembangkan, penggunaan duroid secara langsung pada perangkat-perangkat telekomunikasi mulai berkurang, digantikan oleh material dielektrik artifisial [2]-[4]. Penerapan material dielektrik artifisial umumnya pada *bandpass filter* (BPF), yang mana material dielektrik artifisial telah memberikan beberapa dampak, yaitu diantaranya menurunkan frekuensi resonansi BPF, menjauhkan jarak

antar mode-mode gelombang dalam BPF dan memperbaiki respon *spurious* pada spektrum frekuensi resonansi dari BPF [5]-[7].

Pada penelitian ini, material dielektrik artifisial diusulkan dan diterapkan sebagai substrat pada antena mikrostrip lingkaran. Material ini digunakan untuk memperkecil dimensi antena mikrostrip terutama bagi antena mikrostrip yang bekerja pada daerah frekuensi VHF. Material dielektrik artifisial terbuat dari *styrofoam* alami yang telah dimodifikasi. Modifikasi ini dilakukan untuk meningkatkan nilai permitivitas *styrofoam* karena miniaturisasi ukuran antena dilakukan dengan penggunaan substrat yang memiliki permitivitas tinggi. Sejumlah kawat-kawat konduktor berdiameter kecil dipasangkan menembus permukaan *styrofoam* yang pada kasus ini dinamakan *host material*. Kawat-kawat konduktor tersebut diposisikan searah dengan arah vektor polarisasi dari medan listrik pada antena mikrostrip lingkaran. Peningkatan nilai permitivitas akan terjadi manakala kawat-kawat tersebut diletakan pada posisi intensitas medan listrik yang kuat dari suatu mode *Transverse Magnetic* (TM) atau *Transverse Electric* (TE).

Pada penelitian, sebaran medan listrik dengan intensitas kuat pada mode TM_{01} digunakan sebagai referensi penempatan kawat-kawat konduktor tipis. Hal ini dikarenakan secara konfigurasi, sebaran intensitas medan listrik yang kuat pada mode ini sangat mudah direalisasikan. Efek peningkatan nilai permitivitas secara artifisial pada dimensi antena akan dianalisis. Jumlah kawat-kawat konduktor tipis yang akan disisipkan diatur disesuaikan dengan dimensi *radiator* antena mikrostrip lingkaran. Untuk melihat prosentase pengecilan dimensi antena mikrostrip berbahan substrat *styrofoam* termodifikasi yang pada penelitian ini diberi istilah antena mikrostrip artifisial, dirancang pula antena mikrostrip lingkaran berbahan *styrofoam* alami yang mana pada penelitian ini dinamakan antena mikrostrip konvensional. Perbandingan dimensi antena mikrostrip artifisial dengan antena mikrostrip konvensional dibandingkan.

2. Material Dielektrik Artifisial

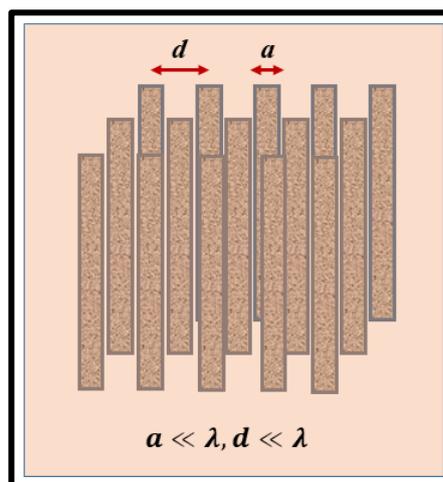
Material dielektrik merupakan salah satu material elektromagnetik yang sering digunakan sebagai material pada perangkat-perangkat telekomunikasi. Perangkat-perangkat telekomunikasi seperti antena, pembagi daya, resonator dan lain-lain menggunakan material dielektrik untuk berbagai fungsi, diantaranya adalah sebagai isolasi antara *radiator* dengan *ground plane* pada antena mikrostrip dan sebagai pengatur frekuensi resonansi pada sebuah filter [2]-[4]. Sifat utama material dielektrik adalah sebagai insulator, yang mana sifat ini identik dengan keberadaan elektron-elektron terikat, oleh karena itu insulator disebut pula sebagai pengikat muatan-muatan listrik [8]. Ketika material dielektrik dikenai medan listrik eksternal, respon yang terjadi dinamakan fenomena polarisasi. Fenomena polarisasi ini merupakan pergerakan elektron-elektron tidak bebas (*bounded electrons*) pada dielektrik sebagai reaksi terhadap medan listrik eksternal. Hasil akhir polarisasi adalah terjadinya pengkutuban antara muatan-muatan listrik positif dan negatif mengikuti pola tertentu secara berkelompok [8]. Kondisi ini memunculkan sifat khas material dielektrik yaitu menyimpan energi listrik. Semakin kuat sifat dielektrik, semakin kuat material ini mengikat muatan-muatan listrik dan hal ini akan menimbulkan semakin tinggi energi listrik yang disimpan material. Kuat lemahnya sifat dielektrik dinyatakan dengan parameter permitivitas dan suseptibilitas *electric* [8].

Material elektromagnetik lain adalah konduktor. Berbeda dengan material dielektrik, material konduktor memberikan reaksi terhadap medan listrik eksternal berupa pergerakan elektron-elektron bebas dari satu titik ke titik lain dalam konduktor secara konstan dan cepat [10]. Pergerakan ini sangat dipengaruhi oleh kekuatan sifat konduktor yang dinyatakan dengan parameter konduktivitas. Pergerakan elektron-elektron bebas dalam konduktor ini menimbulkan rapat arus konduksi. Jika dimensi konduktor ditetapkan dalam ukuran-ukuran yang sangat kecil, maka ketika konduktor dikenai medan listrik eksternal elektron-elektron tidak akan bisa bergerak bebas. Semakin kecil ukuran-ukuran konduktor maka semakin sulit elektron-elektron bergerak, yang menyebabkan seolah-olah elektron-elektron tersebut diikat oleh konduktor-konduktor yang terbatas ukurannya. Sifat ini mirip seperti sifat dielektrik, sehingga secara makroskopik, konduktor-konduktor dengan dimensi yang sangat kecil sudah berubah menjadi material dielektrik yang mana di bidang elektromagnetika dinamakan material dielektrik artifisial [6].

Peneliti yang pertama kali mempublikasikan tentang material dielektrik artifisial adalah Kock pada tahun 1946 [9]. Kock memperkenalkan melalui proses eksperimental material dielektrik artifisial berupa piringan-piringan metal yang ditanamkan pada material dielektrik alami yang dinamakan *host material*. Piringan-piringan metal ini ditanamkan pada material dielektrik natural dengan masa yang sangat ringan berupa lensa, tujuannya adalah untuk mengontrol harga indeks bias lensa, sehingga menghasilkan indeks bias yang bervariasi. Akan tetapi kemudian muncul kerugian yaitu harga indeks bias material yang sensitif pada frekuensi, sehingga mengakibatkan keterbatasan dalam hal *bandwidth*. Solusi yang Kock lakukan adalah mengganti material lensa dengan material dielektrik natural jenis yang lain yaitu busa-busa *polystyrene* [10]. Setiap piringan metal yang ditanamkan pada material dielektrik *polystyrene* berpolarisasi ketika dilewatkan gelombang elektromagnetik, mengakibatkan terjadi fasa delay dan meningkatnya harga indeks bias material menjadi lebih besar dari 1, oleh karena itu material Kock dinamakan *delay artificial dielectric*.

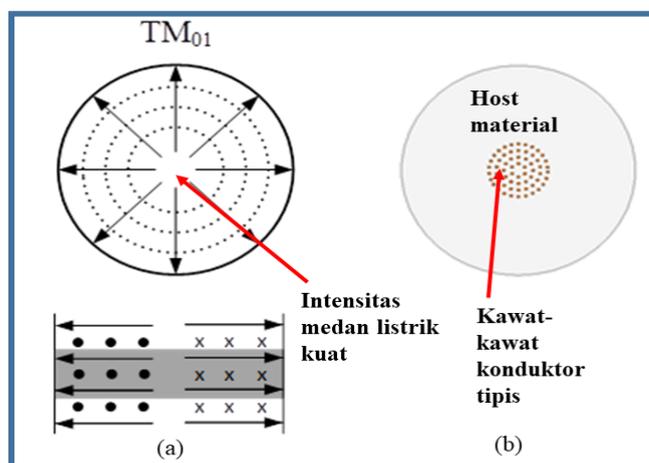
Penelitian tentang material dielektrik artifisial secara lengkap dipublikasikan hasil-hasilnya dalam beberapa literatur berupa jurnal dan prosiding oleh para peneliti yang umumnya dari Jepang [5]-[7]. Proses pembuatan material dielektrik artifisial pada penelitian-penelitian ini dilakukan melalui proses elektromagnetisasi yang dinamakan proses *etching*. Sejumlah lapisan-lapisan konduktor persegi tipis dan berukuran kecil yang disebut dengan strip-strip konduktor dilaminasi di atas permukaan *host material* berupa *FR-4 Epoxy*. Keberadaan strip-strip konduktor di atas permukaan *host material* telah mengubah nilai permitivitas dari *host material* menjadi lebih besar. Secara makroskopik *host material* yang telah dilapisi oleh strip-strip konduktor telah berubah menjadi material dielektrik baru dengan nilai dan sifat permitivitas berbeda dengan *host material* yang ditempatinya. Ukuran, orientasi dan jarak antar strip-strip konduktor menentukan nilai dan sifat permitivitas dari material dielektrik artifisial [6].

Pada Gambar 1 diperlihatkan contoh konfigurasi strip-strip konduktor pada material dielektrik artifisial. Jarak antar strip-strip dan lebar strip-strip disimbolkan masing-masing dengan d dan a , yang mana kedua dimensi ini lebih kecil dari dimensi panjang gelombang, λ . Keunikan lain dari karakteristik material dielektrik artifisial adalah kemampuan elektron-elektron di dalamnya berpolarisasi mengikuti arah kedatangan medan listrik. Hal ini memberikan fakta bahwa pada material artifisial, memungkinkan dibangkitkan harga permitivitas yang merupakan fungsi arah kedatangan medan listrik. Sifat permitivitas seperti ini dinamakan sifat anisotropik, yaitu permitivitas material berbeda di arah tertentu [11]. Eksplorasi karakteristik-karakteristik unik dari material dielektrik artifisial dengan permitivitas bersifat anisotropik baik secara teoritis maupun eksperimental diusulkan oleh I. Awai dkk [12]-[13].



Gambar 1. Contoh konfigurasi strip-strip konduktor dari sebuah material dielektrik artifisial.

Penelitian ini menggunakan metoda yang berbeda dengan I. Awai dkk. Metoda peningkatan nilai permitivitas dilakukan dengan menembuskan sejumlah kawat-kawat konduktor tipis tegak lurus permukaan *host material*. Peletakan kawat-kawat konduktor tipis tersebut mengacu kepada dimana letak intensitas medan listrik yang kuat dari distribusi medan TE (*transverse electric*) atau TM (*transverse magnetic*). Distribusi medan listrik yang dipilih adalah mode TM_{01} , yang mana distribusi medan listrik mode tersebut diperlihatkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Distribusi medan listrik dari mode TM_{01} , (a) tampak atas (atas), tampak samping (bawah), (b) rancangan purwarupa material

3. Antena Mikrostrip Lingkaran Konvensional dan Artifisial

Peneliti yang pertama kali menginisiasi penggunaan antena mikrostrip untuk menggantikan antena batang adalah G. A. Deschamps pada tahun 1953 [14]. Antena mikrostrip yang diusulkan oleh Deschamps sangat sederhana, yaitu menggunakan *patch* persegi 1 elemen dan substrat berbahan RT/duroid R5880. Pengembangan selanjutnya dilakukan oleh R. E. Munson dan Mailloux, yang mana Munson mulai mengenalkan konsep susunan pada antena mikrostrip dengan *patch* berbentuk persegi [15] sedangkan Mailloux mengembangkan metoda penyusunan antena mikrostrip [16].

Antena mikrostrip termasuk ke dalam kategori antena *planar*, yaitu antena berbentuk bidang datar. Struktur dasar antena mikrostrip terdiri dari 3 lapisan, yaitu elemen peradiator atau lebih dikenal dengan sebutan *patch*. Elemen ini ditempatkan di lapisan paling atas. Elemen peradiator terbuat dari material konduktor karena fungsinya untuk meradiasikan energi gelombang elektromagnetik ke ruang bebas dan menerima sebagian kecil energi gelombang elektromagnetik dari ruang bebas. Ukuran *patch* diatur sedemikian rupa sesuai frekuensi resonansi antena mikrostrip. Bentuk *patch* bermacam-macam, selain persegi dapat pula berbentuk lingkaran, cincin, oval dan lain-lain.

Lapisan paling bawah dari antena mikrostrip adalah *ground plane*. Lapisan ini terbuat dari material konduktor, karena berfungsi untuk menterminasi elektron-elektron yang berasal dari *patch*. Sedangkan lapisan kedua yang ditempatkan diantara *patch* dan *ground plane* adalah substrat. Substrat terbuat dari material dielektrik alami yang memiliki nilai permitivitas tertentu. Umumnya substrat ini berbentuk PCB (*printed circuit board*), sehingga pemasangan *patch* dilakukan melalui proses elektromagnetisasi yang dinamakan *etching*. Penelitian ini mengusulkan substrat dielektrik alami diganti oleh substrat *styrofoam* termodifikasi yang merupakan kategori material dielektrik artifisial.

Struktur fisik dari antena mikrostrip berbahan substrat *styrofoam* konvensional dan artifisial masing-masing diperlihatkan pada Gambar 4 dan Gambar 5. Dari gambar ini terlihat perbedaan yang signifikan antara antena mikrostrip lingkaran konvensional dan artifisial yaitu terletak pada substrat yang disisipkan di antara lapisan *radiator* dan *ground plane*. Pada antena

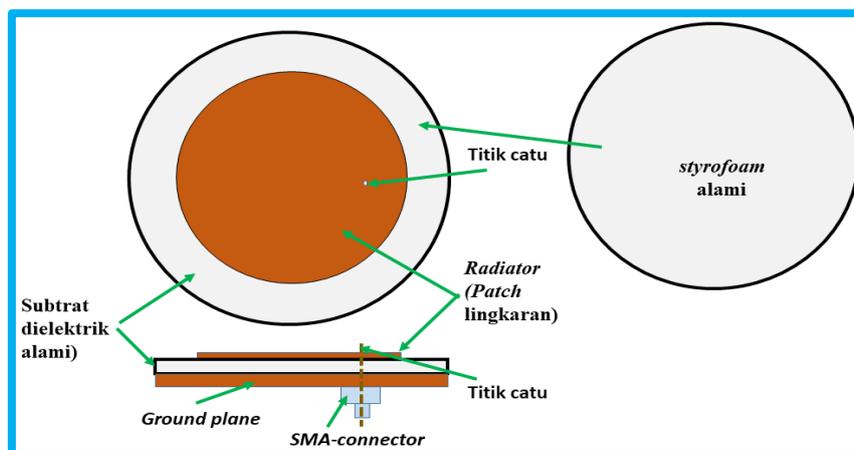
artifisial terdapat sejumlah kawat-kawat tipis dipasangkan menembus permukaan *styrofoam* alami dan menembus ke dalam *styrofoam*, tanpa membuat hubung singkat *radiator* dengan *ground plane*. Antena mikrostrip konvensional dan artifisial diimplementasikan menggunakan beberapa material berikut ini :

- *Radiator (patch)* dan *ground plane* menggunakan lempengan konduktor dengan ketebalan 0,5 mm.
- Substrat berupa *styrofoam* dengan ketebalan 13 mm (bekas limbah kemasan buah-buahan).
- Untuk artifisial, digunakan kawat-kawat konduktor dengan diameter 1 mm dan 2mm.

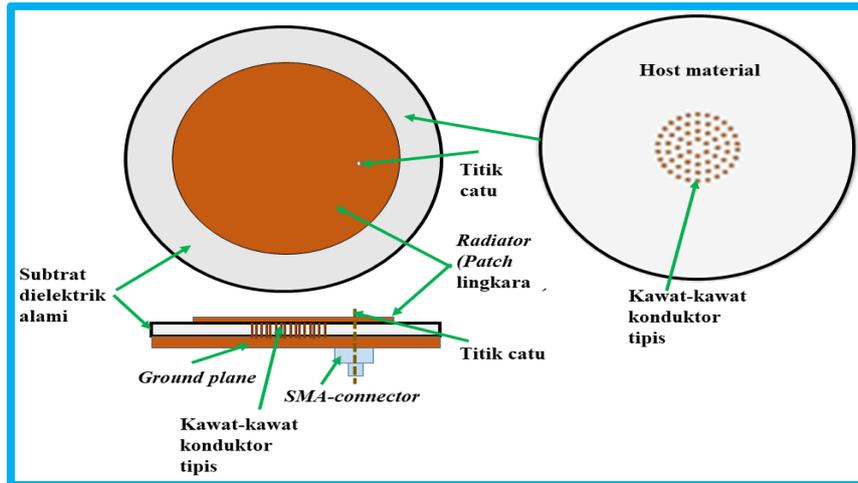
Bahan-bahan yang digunakan pada pembuatan antena mikrostrip konvensional dan artifisial diperlihatkan pada Gambar 3.

PLAT TEMBAGA (PATCH DAN GROUNDPLANE)	STYROFOAM (SUBSTRAT)	KAWAT TEMBAGA (KONDUKTOR SILINDER)
		
PERMITIVITAS RELATIF (ϵ_r): 1 PERMEABILITAS RELATIF : 0,99991 KETEBALAN : 0,5 mm	PERMITIVITAS RELATIF (ϵ_r): 1,03 PERMEABILITAS RELATIF : 1 KETEBALAN : 13 mm	PERMITIVITAS RELATIF (ϵ_r): 1 PERMEABILITAS RELATIF : 0,99991 KETEBALAN : 1 mm & 2 mm PANJANG KAWAT : 13 mm

Gambar 3. Bahan-bahan yang digunakan pada antena mikrostrip konvensional dan artifisial



Gambar 4. Struktur fisik antena mikrostrip lingkaran konvensional



Gambar 5. Struktur fisik antenna mikrostrip lingkaran artifisial

Mode gelombang yang ingin dibangkitkan pada antenna mikrostrip lingkaran ini adalah mode TM_{01} . Untuk beresonansi pada suatu mode, Shen telah memformulasikan persamaan matematik untuk menghitung jari-jari antenna mikrostrip lingkaran yang dituliskan pada Persamaan (1) [17].

$$a = \frac{v}{2\pi f_r} X'_{np} \tag{1}$$

dengan :

$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$ dan X'_{np} adalah akar-akar turunan pertama Bessel yang mana untuk 3 mode TE pertama adalah $X'_{11} = 1,841, X'_{01} = 3,832$ dan $X'_{21} = 3,0542$ berturut-turut untuk mode TM_{11}, TM_{01} . dan TM_{21} . Jari-jari yang diimplementasikan adalah jari-jari efektif. Penamaan ini diberikan sebagai akibat adanya medan limpahan (*fringing fields*) di setiap sisi elemen peradiasi atau *patch*. Jari-jari efektif antenna mikrostrip lingkaran dihitung dengan menggunakan Persamaan (2).

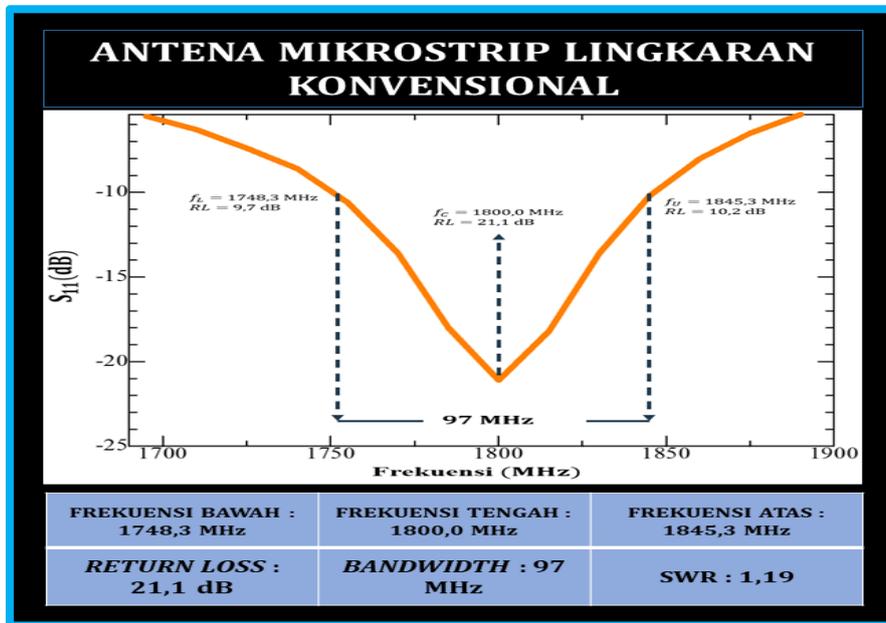
$$a_e = a \sqrt{1 + \frac{2h}{\pi a \epsilon_r} \left[\ln \frac{\pi a}{2h} \right] + 1,7726} \tag{2}$$

dengan : h adalah ketebalan substrat.

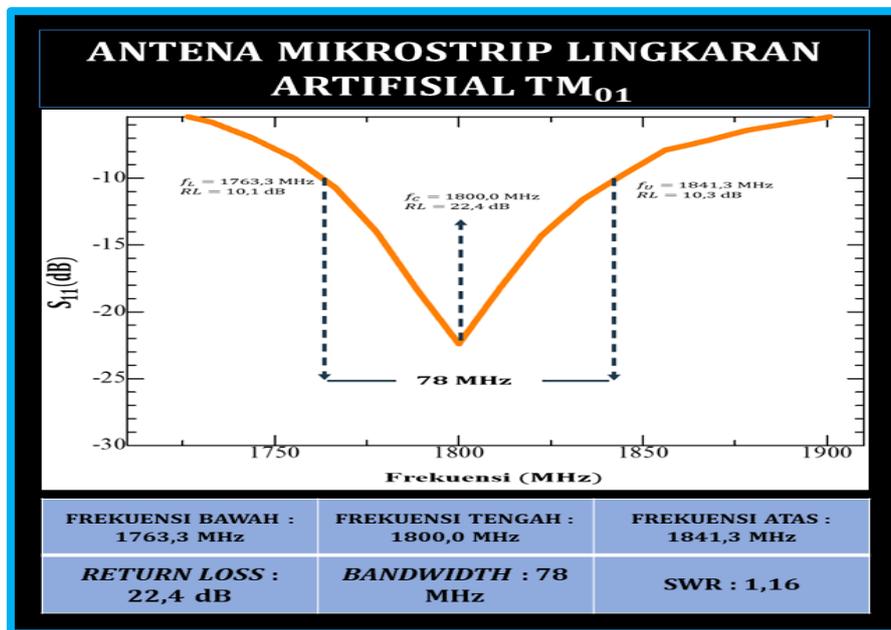
4. Pengujian dan Hasil Pengujian

Pada pengujian ini, grafik S_{11} fungsi frekuensi untuk antenna mikrostrip konvensional dan antenna mikrostrip artifisial telah diukur dan dibandingkan. Grafik S_{11} fungsi frekuensi ini untuk melihat seberapa *match* antenna mikrostrip konvensional dan antenna mikrostrip artifisial dengan impedansi sistem untuk RF (*Radio Frequency*) sebesar 50Ω . Dari grafik S_{11} ini dapat diperoleh *bandwidth* -10dB bagi kedua antenna mikrostrip. Grafik S_{11} fungsi frekuensi untuk antenna mikrostrip konvensional dan artifisial masing-masing diperlihatkan pada Gambar 6 dan Gambar 7. Untuk beresonansi pada frekuensi 1800 MHz, antenna mikrostrip konvensional membutuhkan dimensi total 177,7 mm sedangkan antenna mikrostrip artifisial hanya membutuhkan dimensi total 108,9 mm dengan jumlah kawat-kawat berdiamater 1mm sebanyak 90 buah telah ditambahkan pada substrat *styrofoam* alami. Dengan demikian, penggunaan substrat artifisial yang berupa *syrofoam* termodifikasi telah berhasil memperkecil dimensi antenna mikrostrip konvensional sebesar 38,72 %. Dengan pengecilan dimensi ini, pembuatan antenna mikrostrip menjadi lebih ekonomis.

Keuntungan lain yang didapatkan dengan penggunaan material dielektrik artifisial ini adalah *gain* antenna mikrostrip artifisial lebih tinggi dibandingkan *gain* antenna mikrostrip konvensional. Antena mikrostrip lingkaran konvensional memiliki *gain* 9,2 dBi sedangkan antena mikrostrip lingkaran artifisial memiliki *gain* lebih besar 1,3 dB yaitu sebesar 10,5 dBi.



Gambar 6. Grafik S_{11} fungsi frekuensi untuk antena mikrostrip konvensional



Gambar 7. Grafik S_{11} fungsi frekuensi untuk antena mikrostrip artifisial

Akan tetapi ada konsekuensi yang harus dibayar dengan penambahan kawat-kawat konduktor pada substrat, yaitu terjadi penurunan *bandwidth* antena mikrostrip. Antena mikrostrip lingkaran konvensional memiliki *bandwidth* $S_{11} - 10$ dB sebesar 97 MHz, sedangkan

antena mikrostrip lingkaran artifisial memiliki *bandwidth* lebih sempit, yaitu 78 MHz atau sekitar turun 19,6 % dibandingkan *bandwidth* antenna mikrostrip konvensional. Gambar 7 menunjukkan antenna purwarupa antenna mikrostrip lingkaran konvensional dan antenna mikrostrip lingkaran artifisial. Dari gambar tersebut, terlihat dengan jelas perbedaan dimensi *radiator* kedua antenna.



Gambar 7. Purwarupa antenna mikrostrip lingkaran, konvensional (kiri) dan artifisial (kanan)

5. Kesimpulan

Pada makalah ini, miniaturisasi dimensi antenna mikrostrip lingkaran telah dipaparkan. Miniaturisasi dilakukan dengan mengganti substrat *styrofoam* alami pada antenna mikrostrip lingkaran konvensional dengan substrat material dielektrik artifisial. Substrat material dielektrik artifisial adalah *styrofoam* alami yang telah dimodifikasi dengan cara ditambahkan kawat-kawat konduktor tipis menembus ke dalam *styrofoam* alami. Kawat-kawat ini diletakkan pada intensitas medan listrik yang kuat dari mode TM_{01} untuk meningkatkan permitivitas *styrofoam*. Dari hasil pengukuran telah menunjukkan bahwa untuk beresonansi pada frekuensi 1800 MHz dimensi antenna mikrostrip lingkaran artifisial lebih kecil 38,72 % dari dimensi antenna mikrostrip lingkaran konvensional. Dari hasil ini, material dielektrik artifisial dapat dijadikan solusi bagi para *engineer* yang ingin membuat antenna mikrostrip pada khususnya atau perangkat-perangkat telekomunikasi lain pada umumnya dengan dimensi yang lebih kecil.

Ucapan Terima kasih

Kami menghaturkan terimakasih kepada Politeknik Negeri Bandung, karena penelitian ini telah didanai oleh Program Kreatifitas Mahasiswa Politeknik Negeri Bandung (POLBAN) dengan No. Kontrak 659.6/PL1.R7/LT/2018.

Daftar Pustaka

- [1] Iskander F. Magdy. *Electromagnetic Fields and Waves*. Prospect Heights, Illinois 60070: Waveland Press, Ins. 1992:179-183.
- [2] Kubo, H., Mukai, T., Awai, I. dan Sanada, A. *Improvement of Q of artificial dielectric resonator in waveguide*. 34th European Microwave Conference, vol. 3, pp. 1217–1220.
- [3] McAllister, A. et al.. Rectangular dielectric resonator antennas. *Electronic Letters*. Vol. 19, pp. 219-220, March 1983.
- [4] Gianto, H., A. dan Munir, A. *Artificial Dielectric Material for Lowering Resonant Frequency of Microstrip Circular Patch Antenna*. 2015 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS) November 9-12, 2015.

- [5] Awai, I. *An Artificial Dielectric Material of a Huge Permittivity with Novel Anisotropy and Its Application to a Microwave BPF*. IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, Vol. 2, pp. 301–304, Philadelphia, PA, USA, Juni 2003.
- [6] Awai, I. Artificial Dielectric Resonators for Miniaturized Filters. *IEEE Microwave Magazine*, Okt. 2008, pp. 55–64.
- [7] Awai, I., Kubo, H., Iribe, T. dan Sanada, A. *Dielectric Resonator Based on Artificial Dielectrics and Its Application to a Microwave BPF*. 32nd European Microwave Conference Proc., Milan, Italy, Sept.2002, pp. 1045–1048.
- [8] Balanis, C., A. Advance Engineering Electromagnetics. Second Edition. John Wiley & Sons, Inc. 1938.
- [9] Kock, W. P. Metal-Lens Antennas. *Proceeding of the I.R.E. and Waves and Electrons*. Vol. 34, pp. 828–836, 1946.
- [10] Kock, W. P. Metallic Delay Lens. *Bell System Technical Journal*. Vol. 34, pp. 58-82, 1948.
- [11] Kubo, H., Awai, I., Iribe, T., Sanada, A. dan Munir, A. Artificial dielectric composed of metal strips and calculation method of the permittivity and permeability. *IEEJ Trans. FM.*, vol. 123, no. 3, pp. 265–272, Mar. 2003.
- [12] Kubo, H., Iribe, T., Sanada, A. dan Awai, I. *An Artificial Dielectric Composed Metal Strips and Evaluation of Its Permittivity and Loss*. 2002 Asia-Pacipic Microwave Conference Proc., Kyoto, Jepang, Mar. 2003, pp. 265–272. (dalam bahasa Jepang).
- [13] Kubo, H., Mukai, T., Awai, I. dan Sanada, A. *Improvement of Q of artificial dielectric resonator in waveguide*. 34th European Microwave Conference, vol. 3, pp. 1217–1220.
- [14] Deschamps, G. A. *Microstrip Microwave Antennas*. 3rd USAF Symp. on Antennas, 1953.
- [15] Munson, R. E. Single Slot Cavity Antennas Assembly,” Jan. 1973.
- [16] Mailloux, R.J. McIlvenna, J. dan Kernweis, N. Microstrip Array Technology. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-29, no. 1, pp. 25-38, Jan. 1981.
- [17] K. Wong, Compact and Broadband Microstrip Antennas, John Wiley & Sons, Inc., 2002.