

# Analisa Karakteristik Antena Mikrostrip Lingkaran Berbahan Substrat Material Dielektrik Artifisial pada Frekuensi 1800 MHz

Hepi Ludyati<sup>1</sup>, Elisma<sup>2</sup>, Wasit Pardosi<sup>3</sup>, Nurfiana<sup>4</sup>

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.id<sup>1</sup>, elisma.rufli@yahoo.com<sup>2</sup>, wasit\_pardosi@yahoo.com<sup>3</sup>,  
nurfiana214@gmail.com<sup>4</sup>

**Abstrak** – Kinerja antena mikrostrip lingkaran ditentukan oleh penggunaan substrat dielektrik antara patch dan ground plane. Substrat dielektrik FR-4 Epoxy adalah salah satu material yang sering digunakan sebagai substrat antena mikrostrip. Pada penelitian ini, penggunaan substrat FR-4 Epoxy diganti oleh material dielektrik acrylic. Material dielektrik acrylic masih jarang digunakan, namun memiliki keunggulan yaitu rugi-rugi material yang rendah. Karakteristik antena mikrostrip lingkaran berbahan material dielektrik artifisial (MDA) dianalisis. MDA dirancang bangun dari material dielektrik acrylic natural sebagai host material. Sifat dielektrik dari acrylic natural diperkuat dengan menambahkan 78 kawat konduktor tipis ditembuskan masuk ke dalamnya. Kawat-kawat ini diposisikan pada titik-titik di permukaan host material yang memiliki intensitas medan listrik kuat dari mode  $TM_{11}$ . Karakteristik antena mikrostrip berbahan substrat MDA dibandingkan dengan karakteristik antena mikrostrip berbahan substrat acrylic natural. Dengan ukuran diameter antena konvensional sebesar 98 mm, hasil karakterisasi menunjukkan bahwa antena mikrostrip lingkaran berbahan MDA beresonansi pada frekuensi 1800 MHz hanya membutuhkan dimensi diameter berukuran 73,21 mm, dimensi ini 25,3 % lebih kecil dibandingkan antena mikrostrip berbahan substrat acrylic natural. Selain itu, antena mikrostrip lingkaran berbahan MDA menghasilkan return loss sebesar 18,46 dB dan bandwidth -10 dB sebesar 96 MHz, sedangkan antena mikrostrip berbahan substrat acrylic natural menghasilkan return loss sebesar 19,61 dB dan bandwidth -10 dB sebesar 97 MHz. Sebagai tambahan, gain antena mikrostrip lingkaran yang terbuat dari MDA dengan 78 kawat konduktor tipis adalah 9,2 dBi, yang mana relatif lebih tinggi dari pada antena mikrostrip lingkaran yang terbuat dari substrat acrylic natural yang mana memiliki gain 6 dBi.

**Kata kunci:** material dielektrik artifisial, acrylic, transverse magnetic, gain, bandwidth, permitivitas.

## 1. Pendahuluan

Antena mikrostrip diusulkan pertama kali oleh G. A. Deschamps pada tahun 1953. Antena ini dibuat untuk memenuhi kebutuhan perangkat telekomunikasi *portable* [1]. Struktur antena mikrostrip yang sederhana, memiliki beberapa keunggulan, yaitu diantaranya memiliki massa ringan, *low profile* dan *conformal*. Dengan keuntungan ini, pemasangan antena mikrostrip pada suatu sistem, menjadi sangat mudah dan tidak memerlukan penopang yang kokoh, bahkan cukup dengan ditempelkan pada suatu permukaan. Akan tetapi semua keuntungan ini harus dibayar dengan beberapa kelemahan, yaitu kemampuan meradiasikan daya gelombang elektromagnetik rendah dikarenakan ukuran elemen peradiasi kecil. Kelemahan ini dapat diantisipasi dengan teknik *array* atau antena susun. Tujuan utamanya adalah untuk meningkatkan *gain*, sehingga kemampuan meradiasikan daya gelombang elektromagnetik ke ruang bebas menjadi lebih besar. Kelemahan lain adalah *bandwidth* antena mikrostrip sempit yaitu 1-3 % dari frekuensi kerja antena [2], kelemahan ini dapat diantisipasi dengan teknik pencatutan *mutual coupling*, yang mana saluran pencatutan tidak dikenakan langsung ke elemen *radiator* [3].

Untuk antena mikrostrip yang beresonansi pada frekuensi VHF yaitu di bawah 1 GHz, dimensi antena mikrostrip masih besar. Sebagai contoh, untuk beresonansi pada frekuensi 900 MHz, antena mikrostrip persegi membutuhkan ukuran keseluruhan  $30 \times 30 \text{ cm}^2$  [4]. Dimensi besar membutuhkan penopang yang kokoh dan material yang banyak. Dimensi akan lebih besar lagi manakala antena mikrostrip tersebut disusun beberapa elemen. Salah satu solusi yang diusulkan oleh para peneliti di bidang elektromagnetik adalah mengganti substrat dielektrik natural dengan substrat buatan atau yang dinamakan material dielektrik artifisial. Substrat ini tidak dibuat dengan proses kimiawi, akan tetapi dibuat melalui proses elektromagnetisasi [5]-[9].

Metoda yang diusulkan sangat sederhana, yaitu dengan menambahkan lapisan konduktor-konduktor tipis di atas lapisan substrat natural. Lapisan-lapisan konduktor tipis ini dibuat dalam ukuran yang sangat kecil, berupa *strip-strip* konduktor untuk mengikat muatan-muatan listrik sehingga memberikan dampak perubahan nilai permitivitas berikut sifatnya [10]. Namun sayang, substrat buatan yang diusulkan ini hanya dapat diimplementasikan pada substrat natural berupa PCB (*printed circuit board*), sehingga dalam proses pembuatannya membutuhkan proses menggunakan mesin berupa proses *etching*. Untuk di wilayah Indonesia, belum ada mesin *etching* yang memiliki ketelitian tinggi terutama berkaitan dengan dimensi yang sangat kecil dalam orde mili meter bahkan mikro meter.

Makalah ini mengusulkan penggunaan material dielektrik artifisial untuk menggantikan penggunaan material dielektrik natural sebagai substrat pada antena mikrostrip lingkaran. Pada penelitian ini, rancang bangun antena mikrostrip dilakukan *handmade* tanpa melalui proses *etching*, sehingga menjadi lebih ekonomis dan mudah. Material dielektrik artifisial yang dibuat berbeda sama sekali teknisnya dengan material dielektrik artifisial pada literatur [10]. Jika pada literatur [10] pembuatan material dielektrik artifisial adalah dengan penambahan sejumlah *strip-strip* konduktor di arah vektor medan listrik tertentu, sedangkan pada penelitian ini, sifat dielektrik buatan dibangkitkan dengan menambahkan sejumlah kawat-kawat konduktor tipis pada permukaan material dielektrik natural berupa *acrylic* dan ditembuskan masuk ke dalam material tersebut tetapi tidak membuat elemen peradiasi dan *ground plane* hubung singkat. Pada ranah penelitian material dielektrik artifisial, material dielektrik alami dinamakan *host material*.

Pada penelitian, distribusi magnitudo medan listrik yang kuat pada mode  $TM_{11}$  dipilih sebagai referensi penempatan kawat-kawat konduktor tipis. Hal ini dikarenakan pada antena mikrostrip, mode gelombang elektromagnetik yang bekerja adalah mode  $TM_z$ . Sebagai pembanding, pada penelitian ini dirancang bangun pula antena mikrostrip lingkaran konvensional yang menggunakan material *acrylic* alami. Kinerja kedua jenis antenna ini diukur dan dibandingkan. Kinerja tersebut adalah frekuensi resonansi, parameter  $S_{11}$  fungsi frekuensi, *return loss*, *bandwidth*, *gain* dan pola radiasi antena diukur.

## 2. Material Dielektrik Artifisial Yang Diusulkan

Istilah material dielektrik artifisial pertama kali dikenalkan oleh Kock pada tahun 1946 [9]. Proses pembuatannya tidak dengan cara proses kimiawi yang mana merupakan komposit dari beberapa material elektromagnetik melalui pelelehan atau peleburan dengan pemanasan ataupun pembekuan, akan tetapi kontak material dielektrik artifisial disini adalah sifat-sifat dielektrik baru dibangkitkan melalui proses elektromagnetisasi. Material dielektrik dikenal memiliki sifat mengikat muatan-muatan listrik sedangkan konduktor dikenal memiliki sifat menggerakkan muatan-muatan listrik dengan bebas mengikuti arah kedatangan medan listrik.

Walaupun penelitian Kock sudah lama dan hanya mencakup penelitian melalui pendekatan teoritis tanpa simulasi dan eksperimentasi, namun penelitian ini banyak digunakan sebagai referensi utama dalam penelitian material dielektrik artifisial. Material dielektrik artifisial Kock tersusun atas piringan-piringan konduktor tipis yang ditanamkan pada material dielektrik natural berupa lensa dengan masa yang sangat ringan. Sifat-sifat dielektrik dibangkitkan oleh piringan-piringan konduktor tipis yang tujuannya adalah untuk mengontrol harga indeks bias lensa, sehingga menghasilkan indeks bias yang bervariasi. Namun, metoda ini kemudian memunculkan kerugian yaitu harga indeks bias lensa yang sensitif terhadap frekuensi, sehingga mengakibatkan

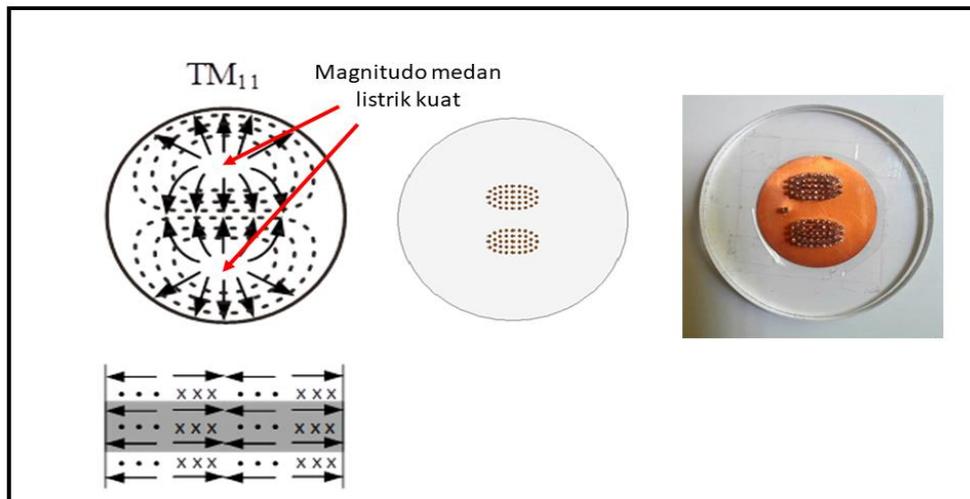
keterbatasan dalam hal *bandwidth*. Solusi yang Kock lakukan adalah mengganti material lensa dengan material dielektrik natural jenis yang lain yaitu busa-busa *polystyrene* [10].

Material dielektrik yang diusulkan pada penelitian ini, menggunakan *host material* berupa *acrylic* dengan ketebalan 10 mm, adapun bentuk dari *acrylic* diperlihatkan pada Gambar 1 di bagian kiri bawah. Sifat-sifat dielektrik dibangkitkan oleh pemasangan kawat-kawat konduktor tipis dengan diameter 1mm dan tinggi 10 mm, kawat-kawat tersebut diperlihatkan pada bagian kanan bawah dan atas. Pemasangan kawat-kawat konduktor tipis mengacu kepada distribusi medan listrik pada mode  $TM_{11}$  diperlihatkan pada Gambar 2.

### Bahan yg digunakan

<p><b>PATCH DAN GROUND PLANE (PLAT TEMBAGA)</b></p>  <p><math>\epsilon_r = 1</math> <math>\mu_r = 0,99991</math> <math>h = 0,5 \text{ mm}</math></p>	<p><b>KAWAT TEMBAGA (SILINDER KONDUKTOR <math>TM_{01}</math>)</b></p>  <p><math>\epsilon_r = 1</math> <math>\mu_r = 0,99991</math> <math>h = 1 \text{ mm}</math> <math>l = 10 \text{ mm}</math></p>
<p><b>SUBSTRAT DIELEKTRIK (AKRILIK)</b></p>  <p><math>\epsilon_r = 3,4</math> <math>\mu_r = 1</math> <math>h = 10 \text{ mm}</math></p>	<p><b>KAWAT TEMBAGA (SILINDER KONDUKTOR <math>TM_{11}</math>)</b></p>  <p><math>\epsilon_r = 1</math> <math>\mu_r = 0,99991</math> <math>h = 2 \text{ mm}</math> <math>l = 10 \text{ mm}</math></p>

Gambar 1. Bahan-bahan pembuat antenna mikrostrip lingkaran artifisial



Gambar 2. Distribusi medan listrik mode  $TM_{11}$  (kiri), purwarupa material dielektrik artifisial hasil rancangan dan implementasi (tengah dan kanan)

Pemasangan kawat-kawat tipis di arah medan listrik dengan magnitudo kuat pada permukaan *host material*, akan mempengaruhi nilai permitivitas dari *host material*. Pemasangan kawat-kawat konduktor tipis ini menyebabkan elektron-elektron terpolarisasi di arah medan listrik dengan magnitudo kuat tersebut dan membantu meningkatkan nilai permitivitas dari material dielektrik secara keseluruhan, sehingga *acrylic* dengan kawat-kawat konduktor tipis yang berada di atasnya telah berubah menjadi material dielektrik baru secara makroskopis dengan nilai dan sifat permitivitas baru.

### 3. Antena Mikrostrip Lingkaran

Antena mikrostrip diperkenalkan ke masyarakat pengguna layanan komunikasi untuk memenuhi kebutuhan antena yang *portable*. Salah satu *pioneer* dalam pengembangan antena mikrostrip untuk berbagai teknologi adalah G. A. Deschamps pada tahun 1953 [14]. Awal mula 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 *acrylic* termodifikasi yang merupakan kategori material dielektrik artifisial. Struktur fisik dari antena mikrostrip berbahan substrat *acrylic* konvensional dan artifisial masing-masing diperlihatkan pada Gambar 3 dan Gambar 4. 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 *acrylic* alami dan menembus ke dalam *acrylic*, tanpa membuat hubung singkat *radiator* dengan *ground plane*.

Pada Gambar 3,  $h$  adalah ketebalan substrat,  $a_1$  dan  $b_1$  berturut-turut merupakan diameter elemen peradiasi (*radiator*) dan diameter *ground plane*. Elemen peradiasi dan *ground plane* terbuat dari lempengan konduktor dengan ketebalan 0,5 mm seperti yang diperlihatkan pada Gambar 1 di bagian kiri atas. Pemilihan ketebalan ini mempertimbangkan efek kulit atau *skin depth* yang ditimbulkan konduktor, yang mana parameter tersebut berkontribusi terhadap rugi-rugi bahan antena. Di bagian atas elemen peradiasi terdapat satu titik catu yang mana dihubungkan ke sumber gelombang elektromagnetik melalui konektor SNA. Mode gelombang yang ingin dibangkitkan pada antena mikrostrip lingkaran ini adalah mode  $TM_{11}$ . Untuk beresonansi pada suatu mode ini, Shen telah memformulasikan persamaan matematik untuk menghitung jari-jari antena mikrostrip lingkaran yang dituliskan pada Persamaan (1) [17].

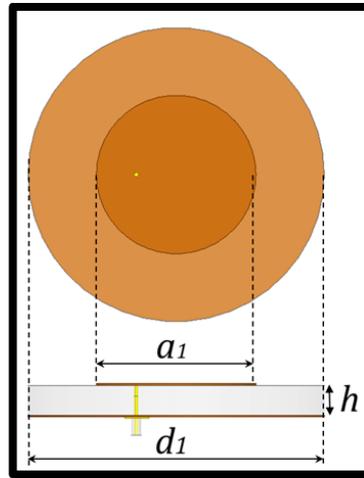
$$a = \frac{v}{2\pi f_r} X'_{np} \quad (1)$$

dengan :

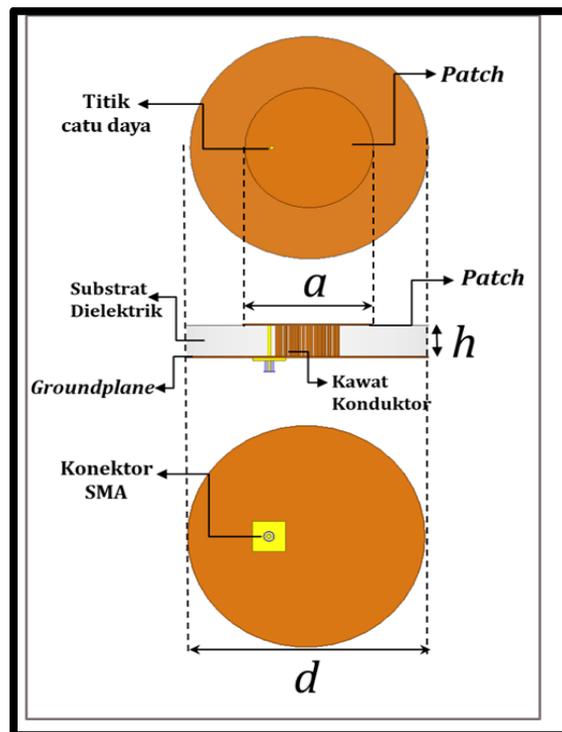
$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$  dan  $X'_{np}$  adalah akar-akar turunan pertama Bessel yang mana untuk 3 mode TE pertama adalah  $X'_{11} = 1,841$ ,  $X'_{01} = 3,832$  dan  $X'_{21} = 3,0542$  berturut-turut untuk mode  $TM_{11}$ ,  $TM_{01}$  dan  $TM_{21}$ . Jari-jari yang diimplementasikan adalah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



Gambar 4. Struktur fisik antenna mikrostrip lingkaran konvensional

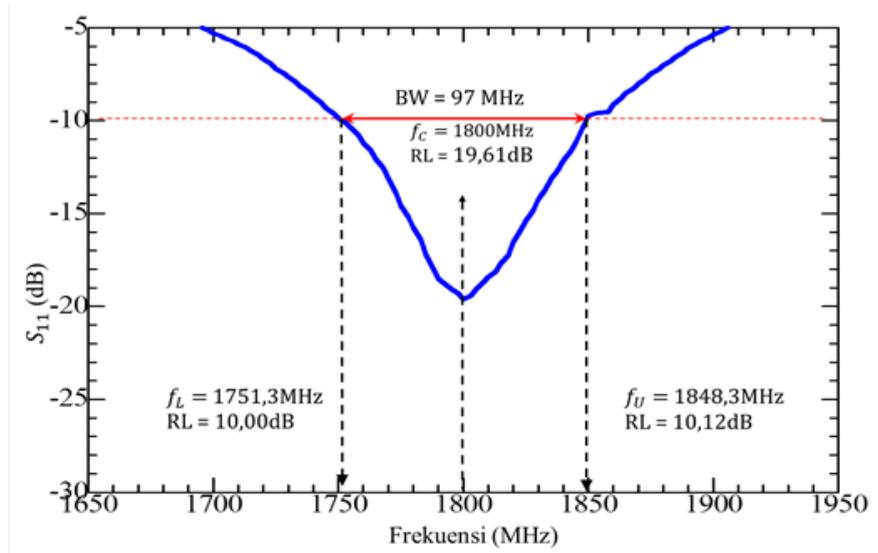


Gambar 5. Struktur fisik antenna mikrostrip lingkaran artifisial

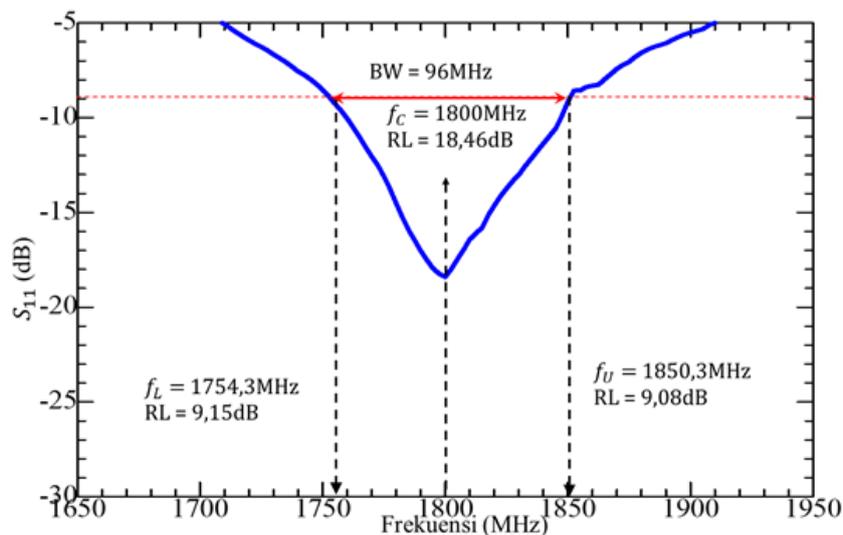
#### 4. Karakteristik Antena Mikrostrip Lingkaran Artifisial

Pada pengujian ini, grafik  $S_{11}$  fungsi frekuensi untuk antena mikrostrip konvensional dan antena mikrostrip artifisial telah diukur dan dibandingkan. Grafik  $S_{11}$  fungsi frekuensi ini untuk melihat seberapa *match* antena mikrostrip konvensional dan antena mikrostrip artifisial dengan impedansi sistem untuk RF (*Radio Frequency*) sebesar  $50 \Omega$ . 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 98 mm sedangkan antenna mikrostrip artifisial hanya membutuhkan dimensi total 73,21 mm mm dengan jumlah kawat-kawat berdiameter 1mm sebanyak 78 buah telah ditambahkan pada substrat *acrylic* alami. Dengan demikian, penggunaan substrat artifisial yang berupa *acrylic* artifisial telah berhasil menurunkan memperkecil dimensi antenna mikrostrip konvensional sebesar 25,3 %. 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. Antenna mikrostrip lingkaran konvensional memiliki *gain* 9,2 dBi sedangkan antenna mikrostrip lingkaran artifisial memiliki *gain* lebih besar 1,3 dB yaitu sebesar 10,5 dBi.

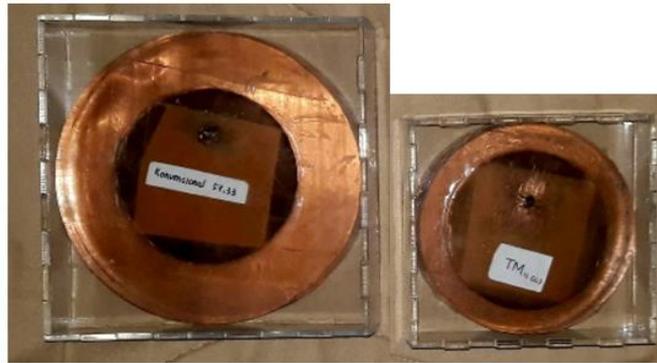


Gambar 6. Grafik  $S_{11}$  fungsi frekuensi untuk antenna mikrostrip konvensional

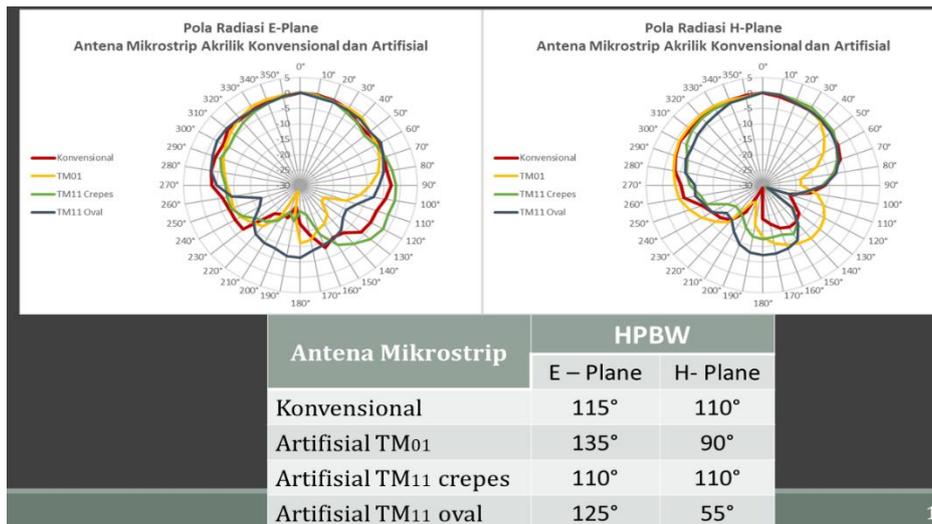


Gambar 7. Grafik  $S_{11}$  fungsi frekuensi untuk antenna mikrostrip artifisial

Akan tetapi ada konsekuensi yang harus dibayar dengan penambahan kawat-kawat konduktor pada substrat, yaitu terjadi penurunan *bandwidth* antenna mikrostrip. Antena mikrostrip lingkaran konvensional memiliki *bandwidth*  $S_{11} - 10$  dB sebesar 97 MHz, sedangkan antenna mikrostrip lingkaran artifisial memiliki *bandwidth* lebih sempit, yaitu 96 MHz. 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. Pola radiasi antenna mikrostrip artifisial dan konvensional diperlihatkan pada Gambar 8.



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



5. Kesimpulan

Pada makalah ini, kinerja antenna mikrostrip lingkaran artifisial analisis dengan membandingkan kinerja tersebut dengan kinerja antenna mikrostrip lingkaran konvensional. miniaturisasi dimensi antenna mikrostrip lingkaran telah dipaparkan. Dengan menambahkan kawat-kawat konduktor tipis berjumlah 78 buah ditembuskan ke dalam struktur permukaan material *acrylic* natural (MDA), antenna mikrostrip lingkaran berbahan MDA beresonansi pada frekuensi 1800 MHz hanya membutuhkan dimensi diameter berukuran 73,21 mm, dimensi ini 25,3 % lebih kecil dibandingkan antenna mikrostrip berbahan substrat *acrylic* natural. Selain itu, antenna mikrostrip lingkaran berbahan MDA menghasilkan *return loss* sebesar 18,46 dB dan *bandwidth* -10 dB sebesar 96 MHz, sedangkan antenna mikrostrip berbahan substrat *acrylic* natural menghasilkan *return loss* sebesar 19,61 dB dan *bandwidth* -10 dB sebesar 97 MHz. Sebagai tambahan, *gain* antenna mikrostrip lingkaran yang terbuat dari MDA dengan 78 kawat konduktor tipis adalah 9,2 dBi, yang mana relatif lebih tinggi dari pada antenna mikrostrip lingkaran yang terbuat dari substrat *acrylic* natural yang mana memiliki *gain* 6 dBi. Dari hasil ini,

material dielektrik artifisial dapat dijadikan solusi bagi para *engineer* yang ingin membuat antena mikrostrip pada khususnya atau perangkat-perangkat telekomunikasi lain pada umumnya dengan dimensi yang lebih kecil.

### Ucapan Terimakasih

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*. 32<sup>nd</sup> 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-Pacific 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.