

Antena Mikrostrip MIMO 4×4 Frekuensi 1800MHz dengan Dielektrik Artifisial

Muhammad Zaki Zulfikar¹, Hepi Ludyati², Didin Saefudin³

¹Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Bandung, Bandung 40012
E-mail : Muhammad.zaki.tcom416@polban.ac.id

²Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Bandung, Bandung 40012
E-mail : Hepi.Ludyati@polban.ac.id

³Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Bandung, Bandung 40012
E-mail : Saedien@gmail.com

ABSTRAK

Teknologi selular mengalami perkembangan yang sangat pesat mulai teknologi komunikasi selular generasi pertama hingga generasi keempat. Peningkatan yang sangat signifikan yaitu transmisi kecepatan data. Teknologi komunikasi selular generasi keempat memiliki keunggulan transmisi data yang tinggi. Hal ini ditargetkan dapat dipenuhi dengan memanfaatkan teknologi *multiple-input-multiple-output* (MIMO). MIMO merupakan teknologi yang terdiri lebih dari satu elemen antena agar penerimaan sinyal menjadi lebih baik dan dapat mengatasi *fading* pada sistem komunikasi selular. Pada penelitian ini dirancang Antena MIMO 4 × 4 dengan polarisasi sirkular pada frekuensi 1800MHz, *return loss* ≥ 10 dB, *VSWR* ≤ 2 , dan *axial ratio* mendekati 1. Pencatuan *insert feed* dan segmen perturbasi pada *patch* untuk menghasilkan polarisasi sirkuler. Terbuat dari FR4 ditambahkan bahan dielektrik artifisial. Dielektrik artifisial berupa strip-strip yang dicetak vertikal mengikuti Panjang *patch*. Hasil simulasi pada CST *Microwave Studio*® didapatkan hasilnya dengan frekuensi tengah 1800 MHz dengan *return loss* 19.45 dB, *VSWR* 1.074 pada *bandwidth* 73.2 MHz, dan nilai *axial ratio* 1.03.

Kata Kunci

Antena MIMO, Dielektrik Artifisial MIMO, Perturbasi

1. PENDAHULUAN

Teknologi selular mengalami perkembangan yang sangat pesat seiring dengan kebutuhan masyarakat akan penggunaan akses *internet*. Dari mulai teknologi selular generasi pertama hingga generasi keempat memiliki perubahan yang sangat signifikan yaitu transmisi kecepatan data. Menghadapi era *internet mobile broadband*. Dibutuhkan *bandwidth* yang besar untuk komunikasi data. Untuk mendukung hal ini berkembang teknologi selular generasi keempat. Pada teknologi ini memiliki keunggulan transmisi *bandwidth* yang lebar. Untuk mendukung pengiriman dan penerimaan data dengan *bandwidth* yang lebar diperlukan perangkat berupa antena. Antena berperan penting dalam sistem komunikasi selular yaitu sebagai *interface* media transmisi di udara pada sisi pengirim maupun penerima. Untuk memperbaiki kualitas penerimaan sinyal di sisi penerima diperlukan antena yang mampu mengatasi *multipath fading*. *multipath fading* merupakan fenomena sinyal yang dipancarkan terdifraksi akibat dari pantulan benda-benda sekitar sehingga berkas sinyal yang dipancarkan memiliki banyak berkas dengan berbeda fasa. Pada sisi penerima sinyal yang diterima akan saling melemahkan karena berbeda fasa. Antena

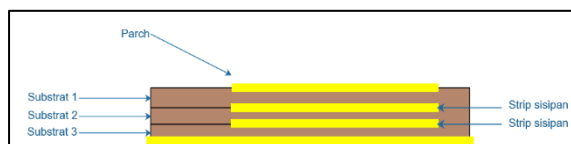
MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) dapat mengatasi hal tersebut dengan cara menerima sinyal pantul sehingga tidak saling melemahkan. Beberapa literatur yang mengusulkan antena MIMO. Literatur tersebut melakukan penelitian merancang antena MIMO 4×4 dengan T-slot terbuat dari FR4. MIMO ini tersusun dari empat antena *array* 1×2 terdiri dari delapan elemen peradiasi berbentuk persegi disusun secara planar menggunakan teknik pencatuan *insert feed* yang bekerja pada frekuensi 15 GHz Tetapi antena ini digunakan untuk 5G [1]. Pada literatur ini telah didapatkan *bandwidth* yang lebih baik dibandingkan tidak menggunakan T-Slot. Literatur lain Pada laporan tugas akhir ini merancang dan merealisasikan antena mikrostrip MIMO 4×4 menggunakan bahan dielektrik artifisial untuk penggunaan LTE pada frekuensi 2300 MHz. Antena terbuat dari bahan FR4 yang memiliki konstanta dielektrik sebesar 4.4 dimodifikasi dengan cara ditanam kawat-kawat konduktor tipis pada substrat diantara *groundplane* dan *patch*. FR4 yang termodifikasi memiliki permitivitas yang tinggi sehingga dapat mengurangi dimensi antena sehingga memiliki efek miniaturisasi [2]. Sehingga dari studi literatur tersebut penulis melakukan modifikasi desain

antenna MIMO 4x4 yang terdapat pada refrensi utama. Pada refrensi utama dari jurnal JNTETI yang telah dilakukan oleh Fajar Wahyu Ardianto, Nachwan Mufti.A, dan Budi Syihabuddin. Modifikasi yang akan dilakukan adalah pengubahan frekuensi kerja menjadi 1800MHz yang digunakan pada sistem komunikasi 4G dan ditambahkan bahan artifisial dielektrik. Bahan artifisial dielektrik yang berbeda seperti metoda refrensi kedua yang dilakukan oleh cucun novianty. Pada penelitian ini desain antena 4x4 disisipkan substrat berupa menambahkan bahan pada bagian substrat yaitu *strip-strip* yang dicetak dengan bahan FR4 0.8mm. *strip-strip* memiliki dimensi yang mengikuti panjang dari *patch* dan lebar sebesar 2.5 mm. Selanjutnya *strip-strip* yang dicetak pada PCB. Bahan material dielektrik artifisial tersebut akan disisipkan pada bagian atas dari *groundplane* dan bagian bawah dari *patch* antenna mikrostrip sehingga akan menambah ketebalan antenna mikrostrip. Dengan menyisipkan material dielektrik artifisial diharapkan akan meningkatkan nilai permitivitas dari bahan dasar FR4[6]. Selain itu akan mengubah polarisasi sirkular dengan cara melakukan perturbasi pada *patch*.

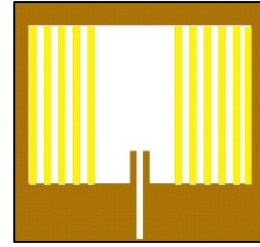
2. METODE PENELITIAN

2.1 Material Dielektrik Artifisial

Dielektrik artifisial atau disebut juga substrat termodifikasi merupakan penyisipan pada substrat antenna mikrostrip berupa bahan-bahan yang memiliki sifat material elektromagnetik yang ada di alam sehingga dapat meningkatkan nilai dari permitivitas pada bahan substrat [3]. Berdasarkan karya ilmiah yang telah dilakukan sebelumnya terhadap bahan dielektrik artifisial merupakan bahan bahan substrat yang dilakukan penyisipan kawat-kawat berbentuk pola *crepes* terhadap antenna mikrostrip MIMO 4x4 memiliki efek minaturisasi antenna tetapi memiliki kelemahan yaitu sulitnya dilakukan fabrikasi dikarenakan penyisipan kawat dengan diameter 0.7mm terhadap bahan FR4. Sehingga untuk memperbaiki hal tersebut penulis melakukan modifikasi penyisipan bahan dielektrik artifisial dengan cara strip - strip yang telah dicetak pada PCB FR4 0.8mm. Berdasarkan Gambar 2.1 dan Gambar 2.2 merupakan ilustrasi penyisipan bahan pada substrat sebagai dielektrik artifisial.



Gambar 1 Lapisan Dielektrik Artifisial

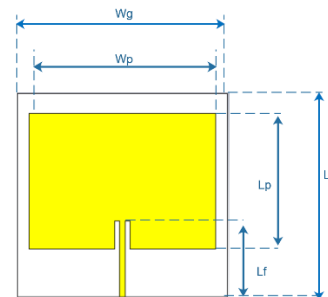


Gambar 2 Cetakan strip-strip ada FR4 tampak atas

Bahan *patch* dicetak menggunakan bahan PCB FR4 yang tebal nya 0.8mm. Bahan tersebut dimodifikasi dengan menambahkan bahan pada bagian substrat yaitu *strip-strip* yang dicetak dengan bahan FR4 0.8mm. *strip-strip* memiliki dimensi yang mengikuti panjang dari *patch* dan lebar sebesar 2.5 mm. Selanjutnya *strip-strip* yang dicetak pada PCB tersebut bernama material dielektrik artifisial. Bahan material dielektrik tersebut akan disisipkan pada bagian atas dari *groundplane* dan bagian bawah dari *patch* antenna mikrostrip sehingga akan menambah ketebalan antenna mikrostrip. Dengan menyisipkan material dielektrik artifisial diharapkan akan meningkatkan nilai permitivitas dari bahan dasar FR4.

2.2 Antena Mikrostrip *patch* Persegi

Berdasarkan Gambar 3 Merupakan mikrostrip *patch* persegi yang akan digunakan sebagai desain antenna mikrostrip awal untuk dikembangkan menjadi antenna MIMO.



Gambar 3 Antena Mikrostrip *patch* Persegi.

Keterangan: W_p = lebar *patch*
 L_p = panjang *patch*
 W_g = lebar *groundplane*
 L_g = Panjang *groundplane*
 W_f = lebar *feedline*
 h = Tebal substrat

Penentuan dimensi antenna pada mikrostrip *patch* persegi mengacu pada persamaan (1) sampai (4) sebagai berikut:

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

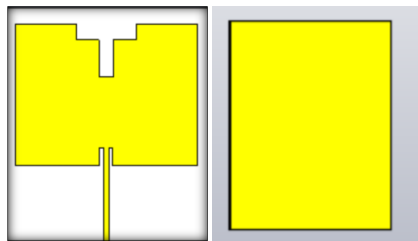
$$\epsilon_{\text{reff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{1 + \frac{12h}{w}}} \right) \quad (2)$$

$$\Delta L = 0.412h \left[\frac{(\epsilon_{\text{reff}} + 0.3) \left(\frac{w}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{\text{reff}} - 0.258) \left(\frac{w}{h} + 0.8 \right)} \right] \quad (3)$$

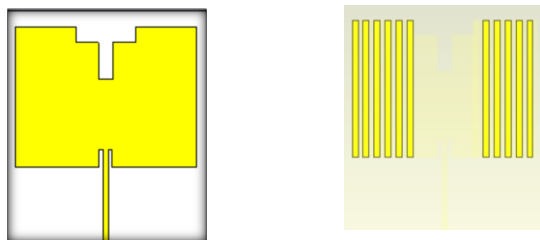
$$L = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} - 2\Delta L \quad (4)$$

2.3 Perancangan Antena Mikrostrip Tunggal biasa dan menggunakan dielektrik artifisial

Setelah melakukan perhitungan dimensi menggunakan persamaan (1) hingga (4) selanjutnya membuat dimensi antenna pada *software* CST® 2018. Berdasarkan Gambar 4 merupakan antenna Mikrostrip tanpa Bahan dielektrik artifisial dan Gambar 5 merupakan antenna dengan menggunakan substrat dielektrik artifisial.



Gambar 4 antenna substrat biasa

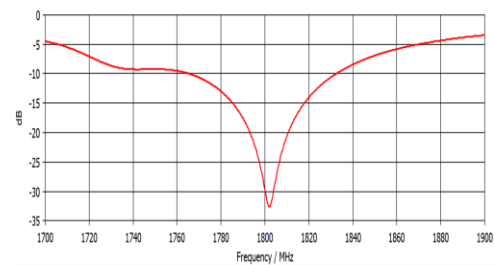


Gambar 5 antenna substrat dielektrik artifisial

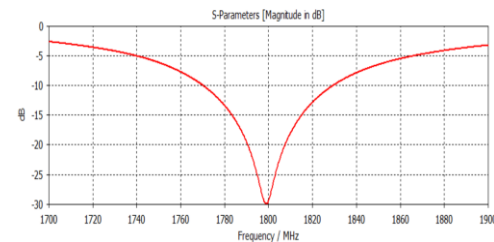
Tabel 1 Dimensi Antena *single patch*

Parameter	Nilai Perhitungan (mm) (Artifisial)	Nilai Optimasi (mm) (Artifisial)	Nilai Perhitungan (mm) (Substrat Biasa)	Nilai Optimasi (mm) (Substrat Biasa)
h	2.4	2.4	2.4	2.4
Wp	49.70	50.7	49.7	50.7
Lp	39.07	39.07	39.07	38.3
Wf	1.634	1.8	1.634	1.8
Lf	20.72	13.72	20.72	13.72
Wg	65.1	55.5	65.1	55.5
Lg	74.19	64.9	74.19	64.9
Wgap	1.48	1	1.48	1
Lgap	13.72	6	13.72	7.5
a	16.58	16.58	16.58	16.58
b	4.145	4.145	4.145	4.145
c	10.36	10.36	10.36	10.36
d	7.2123	7.2123	7.2123	7.2123
e	4.145	4.145	4.145	4.145

Berdasarkan table 1 terdapat perbedaan dimensi *patch* antara antenna menggunakan substrat dielektrik artifisial dibandingkan substrat biasa. Terdapat panjang kedalaman *insertfeed* (Lgap) yang lebih kecil dibandingkan mikrostrip dengan substrat biasa. Terdapat kesimpulan awal bahwa bahan dielektrik artifisial memiliki efek minaturisasi pada dimensi antenna walaupun perbedaan ukuran tidak terlalu signifikan. Dimensi yang dilakukan optimasi bertujuan agar antenna tepat memiliki frekuensi kerja pada 1800MHz.



Gambar 6 Kurva fungsi S₁₁ antenna dielektrik artifisial

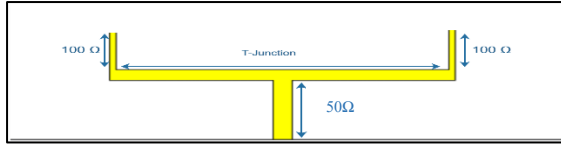


Gambar 7 Kurva S₁₁ antenna substrat biasa.

Berdasarkan pada gambar 6 dan gambar 7 merupakan hasil simulasi berisi kurva S₁₁. Antena dielektrik artifisial nilai *return loss* ≥ 10dB menghasilkan *bandwidth* 93.2 MHz atau 5.1% dari frekuensi tengah. Sedangkan antenna mikrostrip substrat biasa nilai *return loss* ≥ 10dB menghasilkan *bandwidth* 59.3MHz.

2.4 Perancangan Antena Mikrostrip Array 1×2 Tunggal dan Artifisial

Pada bagian perancangan antenna mikrostrip array 1×2, mikrostrip tunggal akan dihubungkan dengan saluran pencatu T-junction seperti gambar 8 berikut:



Gambar 8 Saluran pencatu T-junction.

Pada antenna mikrostrip elemen tunggal menggunakan saluran pencatu impedansi 100 Ω. Untuk melakukan perancangan antenna array 1×2 dibutuhkan saluran pencatu mikrostrip penghubung antar patch. Pada perancangan kali ini menggunakan saluran pencatu T-junction. Selain menggunakan saluran pencatu T-junction diperlukan perancangan saluran 50 Ω sebagai saluran input dari antenna array.

Sebelum mengetahui dimensi dari saluran pencatu T-junction diperlukan mengetahui nilai dari Impedansi saluran. Nilai impedansi saluran pencatu T-junction bisa didapatkan dengan persamaan dibawah ini:

$$\begin{aligned} Z_T &= \sqrt{Z_{100} \times Z_{50}} \\ Z_T &= \sqrt{100 \times 50} \\ Z_T &= 70.71 \Omega \end{aligned} \quad (5)$$

Setelah nilai impedansi dari T-junction diketahui, dapat ditentukan dimensi lebar dari T-junction (W_T) dan dimensi panjang (L_T) dari T-junction. Berikut merupakan persamaan yang dapat digunakan untuk mencari dimensi tersebut :

$$B = \frac{377\pi}{2(70.71)\sqrt{4.4}} = 4.032 \quad (6)$$

$$W_T = \frac{2 \times 2.4}{\pi} \left[4.032 - 1 - \ln(2 \times 4.032 - 1) + \frac{4.4-1}{2 \times 4.4} \left(\ln(4.032 - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{4.4} \right) \right] \quad (7)$$

$$W_T = 3.93 \text{ mm}$$

Setelah diketahui lebar dari saluran pencatu T-junction, diperlukan dimensi panjang dari T-junction. Untuk mencari panjang dari T-junction bisa diperoleh dari jarak antara titik tengah patch persegi antenna mikrostrip pertama terhadap titik tengah patch persegi antenna kedua. Jarak antara kedua patch sebesar $\lambda_0/2$ sehingga panjang saluran pencatu T-junction sebesar $\lambda_0/2$. Berikut merupakan persamaan untuk mencari panjang dari T-junction:

$$L_T = \frac{1}{2} \lambda_0 = \frac{1}{2} \times 167 = 83.5 \text{ mm} \quad (8)$$

Setelah mendapatkan dimensi-dimensi yang diperlukan sehingga kedua patch tersebut dapat disambung dengan saluran pencatu T-junction. Awalnya Antena mikrostrip dilakukan translasi dan penggantian pada sumbu x. Translasi antenna satu dengan antenna kedua diatur jarak sebesar $\lambda_0/2$. Selanjutnya menghubungkan Saluran pencatu T-junction dengan saluran pencatu pada antenna mikrostrip. Setelah kedua antenna tersebut terhubung, selanjutnya menghubungkan saluran pencatu 50 Ω.

Untuk menentukan saluran pencatu 50 Ω dapat menggunakan persamaan yang sama saat menghitung dimensi pencatu T-junction tetapi untuk mencari dimensi panjang dari pencatu menggunakan saluran transformator $\lambda_g/4$. Berikut persamaan yang digunakan untuk mencari dimensi saluran pencatu 50 Ω:

$$B = \frac{377\pi}{2(50)\sqrt{4.4}} = 5.64$$

$$W_T = \frac{2 \times 2.4}{\pi} \left[5.64 - 1 - \ln(2 \times 5.64 - 1) + \frac{4.4 - 1}{2 \times 4.4} \left(\ln(5.64 - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{4.4} \right) \right]$$

$$W_T = 4.56 \text{ mm}$$

$$\epsilon_{reff} = \frac{4.4 + 1}{2} + \frac{4.4 - 1}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{1 + \frac{12(2.4)}{4.56}}} \right)$$

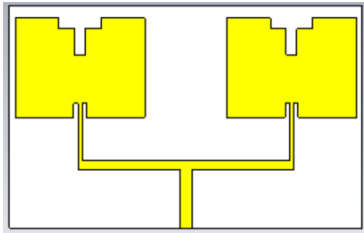
$$\epsilon_{reff} = 3.327$$

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{reff}}} \quad (9)$$

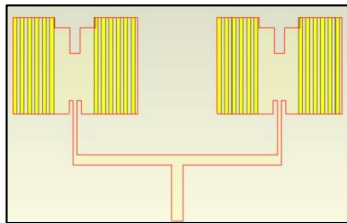
$$\lambda_g = \frac{167}{\sqrt{3.327}} = 91.55$$

$$L_T = \frac{1}{4} \lambda_g = \frac{1}{4} \times 91.55 = 22.89 \text{ mm}$$

Setelah mendapatkan dimensi-dimensi selanjutnya dua antenna mikrostrip array 1×2 dapat dilakukan konstruksi. Konstruksi yang dilakukan seperti membuat dimesi saluran 50 Ω, saluran 70 Ω, menghubungkan saluran 70 Ω dengan kedua feedline, dan penyesuaian ukuran substrat groundplane. Setelah itu dilakukan simulasi pada software CST® sehingga akan mengetahui spesifikasi antenna seperti frekuensi kerja dan return loss. Ketika spesifikasi antenna belum memenuhi spesifikasi yang ditargetkan maka dimensi pada antenna mikrostrip akan dilakukan optimasi sehingga hasil dari output simulasi dapat optimal.

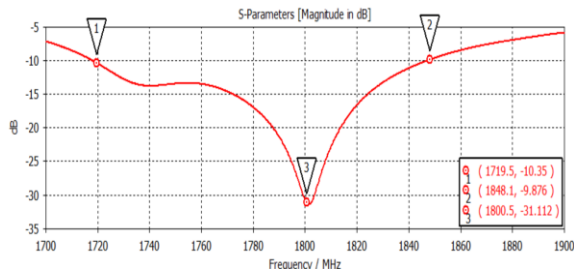


Gambar 9 Mikrostrip array 1x2

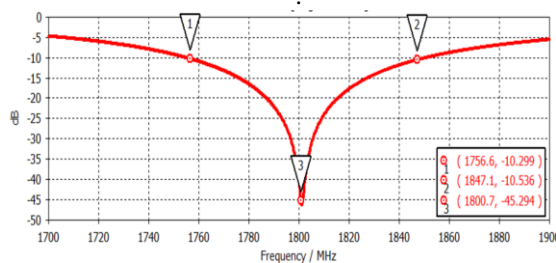


Gambar 10 Bahan Dielektrik Artifisial.

Parameter	Nilai Perhitungan (mm) (Artifisial)	Nilai Optimasi (mm) (Artifisial)	Nilai Perhitungan (mm) (Substrat Biasa)	Nilai Optimasi (mm) (Substrat Biasa)
Wp	49.70	50.7	49.7	54.7
Lp	39.07	39.07	39.07	38.3
Wf	1.634	1.8	1.634	1.8
Lf	20.72	13.72	20.72	7.5
Wgap	1.48	1	1.48	1
Lgap	13.72	5.5	13.72	7.5



Gambar 11 Kurva fungsi S_{11} antenna Mikrostrip array 1x2 dielektrik artifisial



Gambar 12 Kurva fungsi S_{11} antenna Mikrostrip array 1x2 substrat biasa.

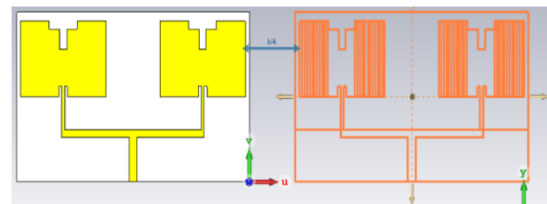
Berdasarkan Gambar 10 Antena array 1x2 dielektrik artifisial menghasilkan nilai *return loss* ≥ 10 dB

menghasilkan *bandwidth* 129.1 MHz atau 7.71% dari frekuensi tengah dan gambar 2.11 Antena array 1x2 substrat biasa nilai *return loss* ≥ 10 dB menghasilkan *bandwidth* 90.5 MHz atau 5.02% dari frekuensi tengah. Berdasarkan hasil simulasi yang dilakukan oleh CST®, Antena array 1x2 dielektrik artifisial memiliki *bandwidth* lebih lebar dibanding dengan Antena array 1x2 substrat biasa tetapi, untuk nilai *return loss* pada frekuensi 1800 MHz antena array 1x2 dengan substrat biasa sebesar 45.29 dB dibandingkan Antena array 1x2 dielektrik artifisial sebesar 31.11dB . Dalam hal *return loss* lebih baik antena array 1x2 dengan substrat biasa.

Tabel 2 Dimensi Antena array 1x2 .

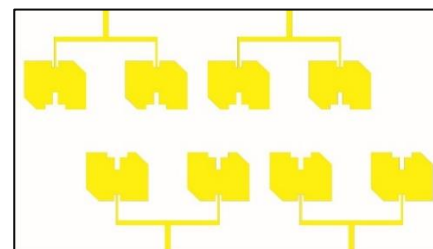
Parameter	Nilai Perhitungan (mm) (Artifisial)	Nilai Optimasi (mm) (Artifisial)	Nilai Perhitungan (mm) (Substrat Biasa)	Nilai Optimasi (mm) (Substrat Biasa)
Wp	49.70	50.7	49.7	54.7
Lp	39.07	39.07	39.07	38.3
Wf	1.634	1.8	1.634	1.8
Lf	20.72	13.72	20.72	7.5
Wgap	1.48	1	1.48	1
Lgap	13.72	5.5	13.72	7.5

2.5 Perancangan MIMO 4x4 Artifisial



Gambar 13 Proses Translasi dan penggandaan Antena array 1x2.

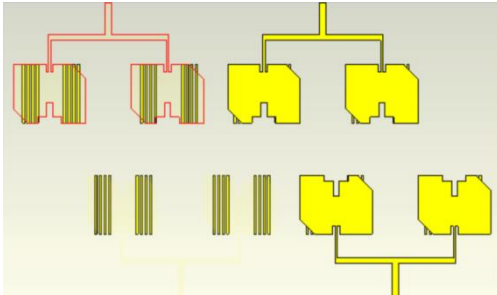
Berdasarkan Gambar 13 untuk mendapatkan konfigurasi MIMO 4x4 dibutuhkan penggandaan dan translasi pada bagian atas. Ketika MIMO 2x2 terbentuk. Berdasarkan gambar berikut merupakan antena MIMO 4x4 yang telah dilakukan penyatuan substrat berasal dari empat buah antena array 1x2 menjadi sebuah antena MIMO 4x4.



Gambar 14 Antena MIMO 4x4

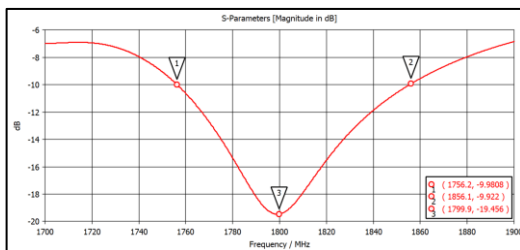
Berdasarkan Gambar 14 merupakan antenna MIMO 4×4 yang telah dirancang dilakukan modifikasi pada *patch* dengan menambahkan segmen perturbasi dengan cara memotong *patch* melintang 45°[5]. Perturbasi dilakukan untuk menghasilkan polarisasi sirkular dengan *axial ratio* 1 atau ≤ 3dB.

3. Hasil Simulasi



Gambar 15 Antena MIMO 4×4.

Berdasarkan Gambar 15 merupakan antenna MIMO 4×4 yang dimensi-dimensi telah dilakukan optimasi untuk mendapatkan frekuensi 1800MHz ditargetkan dalam spesifikasi antenna. Pada antenna mikrostrip ini terdiri dari tiga lapisan yaitu lapisan utama adalah *patch*, lapisan kedua merupakan bahan dielektrik artifisial berupa cetakan strip-strip sejumlah 8 buah, dan lapisan ketiga pada sisi atas merupakan *strip-strip* yang serupa dengan lapisan kedua.



Gambar 16 Kurva fungsi S_{11} antenna MIMO 4×4.

Berdasarkan Gambar 16 nilai *return loss* ≥10dB menghasilkan *bandwidth* 90.9 MHz atau 5.05% dari frekuensi tengah dan nilai *return loss* 19.46dB.

e-field (f=1800) [1]		e-field (f=1800) [1]	
Component	X	Component	Y
Frequency	1800 MHz	Frequency	1800 MHz
Phase	0	Phase	0
Maximum	8216.3 V/m	Maximum	7941.91 V/m

Gambar 17 Nilai Medan Listrik sumbu x dan sumbu y MIMO 4×4

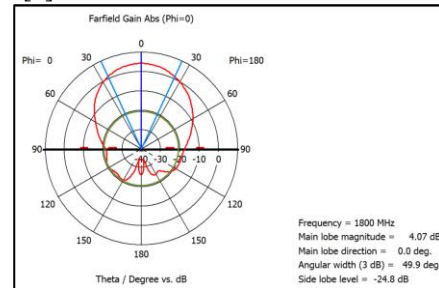
Berdasarkan Gambar 17 merupakan medan listrik pada sumbu X merupakan E_{major} dan medan listrik pada sumbu Y merupakan E_{minor} [4]. Didapatkan medan listrik pada sumbu X sebesar 8216.3 V/m dan

pada sumbu Y sebesar 7941.91V/m. Dari kedua informasi diatas didapatkan:

$$Axial Ratio = \frac{8216.3}{7941.91} = 1.03$$

$$Axial Ratio(dB) = 10 \log 1 = 0.1 \text{ dB}$$

nilai *axial ratio* mendekati nilai 1 atau kurang dari 3dB. Dengan demikian antenna yang telah dibuat memenuhi syarat sebagai antenna dengan polarisasi sirkular [4].



Gambar 18 Pola Radiasi MIMO 4×4

Berdasarkan Gambar 18 merupakan hasil dari simulasi polar radiasi antenna MIMO 4×4. Terdapat informasi nilai *gain*. *Gain* pada antenna MIMO 4×4 meningkat dibandingkan dengan antenna mikrostrip elemen tunggal T-slot pada simulasi sebelumnya. *Gain* yang dihasilkan berdasarkan hasil simulasi sebesar 4.66 dB. Pola radiasi dari antenna direksional memiliki *side lobe level* -24dB

4. KESIMPULAN

Penggunaan bahan dielektrik artifisial dapat membawa efek miniaturisasi antenna walaupun reduksi dimensi antenna tidak terlalu signifikan maka diperlukan iterasi kembali dalam penggunaan strip-strip. Iterasi yang diperlukan adalah lebar dari strip, jumlah strip, dan jarak antar strip. Jika dibandingkan dengan metode fabrikasi dielektrik artifisial sebelumnya dengan menggunakan penyisipan kawat-kawat akan lebih mudah menggunakan metode strip-strip karena dicetak menggunakan PCB fr4 0.8mm.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Fajar Wahyu Ardianto, Nachwan Mufti A., Budi Syihabuddin, "Analisis Simulasi Antena MIMO 4 4 Susunan Persegi dan Sirkular pada Frekuensi 15 GHz," *JNETI*, pp. 1-9, 2018.
- [2] H. L. Cucun Noviyanti, "Perancangan dan Realisasi Antena Mikrostrip 4x4 MIMO Berbahan Material Dielektrik Artifisial dengan Menggunakan Mode Gelombang TM11 (Pola Crepes) untuk Meningkatkan Gain Antena Repeater pada Aplikasi LTE," *IRWNS*, pp. 1-7, 2019.
- [3] Hepi Ludayati, Yughta Prafitri, Achmad Munir,

- “Performance Analysis of Microstrip Circular Patch Antenna Composed of Artificial Dielectric Material,” *IEEE*, pp. 1-4, 2018.
- [4] A. I. Pribadi, “Realisasi Antena Mikrostrip Dengan Polarisasi Sirkular pada Frekuensi 924MHz,” Politenik Negeri Bandung, Bandung, 2018.
- [5] A. Syawaludin, “Rancang Bangun Antena Mikrostrip Linier Array 4 Element Dengan Pencatuan Proximity Coupling Frekuensi 1,5GHz – 1,6GHz Pada Aplikasi Mobile Satellite,” Universitas Negeri Jakarta, Jakarta, 2016.
- [6] Triyastika Amaliya, Hepi Ludyati, “Realisasi Antena Mikrostrip Persegi Panjang Menggunakan Substrat FR4 Termodifikasi dengan Metode TM01 dan TM12 pada Frekuensi Kerja Radar Altimeter Pesawat,” dalam *IRWNS*, Bandung, 2019.