

## PERANCANGAN DAN REALISASI ANTENA MIMO MIKROSTRIP 4X4 PATCH CIRCULAR PADA FREKUENASI 2,4 GHZ UNTUK APLIKASI WLAN 802.11N

Annisa Rizky<sup>1)</sup>, Koesmarjianto,<sup>2)</sup> Waluyo,<sup>3)</sup>

<sup>1,2,3)</sup>Program Studi Jaringan Telekomunikasi Digital, Teknik Elektro, Politeknik Negeri Malang  
Email: [rizkyannisa85@gmail.com](mailto:rizkyannisa85@gmail.com)

### Abstrak

Perkembangan teknologi tanpa kabel sangat pesat seiring dengan kebutuhan pengguna akan kualitas sistem komunikasi yang berkecepatan tinggi, efisien, handal dan berkualitas. Salah satu teknologi yang digandrungi oleh pengguna layanan telekomunikasi saat ini adalah Wireless Fidelity (WiFi) yang sudah didukung oleh teknologi MIMO. Multiple Input Multiple Output (MIMO) adalah suatu sistem yang terdiri dari lebih dari satu terminal atau antena pada sisi pengirim dan penerima. Dengan penggunaan antena lebih dari satu antena, MIMO mendukung spesifikasi media transmisi yang membutuhkan kapasitas besar pada sistem komunikasinya. Pada penelitian ini membahas perancangan serta realisasi antena MIMO 4x4 mikrostrip patch sirkular yang dapat bekerja pada pita frekuensi 2,4 GHz untuk aplikasi teknologi WiFi. Digunakan metode *inset feed* untuk mendapat nilai impedansi yang match antara patch dan saluran. Untuk penambahan gain digunakan metode array linear pada tiap antena. Dilakukan pengujian pengaruh jarak antar antena terhadap nilai *mutual coupling*. Serta dilakukan pengujian performansi *signal strength* antena jika diimplementasikan sebagai perangkat antena pada *access point*.

Hasil pengujian antena MIMO 4x4 Mikrostrip Patch Circular ini menunjukkan nilai  $Return Loss \leq -13,3$  dB;  $Mutual Coupling \leq -39,3$  dB;  $VSWR 1,482$ ;  $Signal Strength = -25$  dB.

**Kata kunci:** Antena mikrostrip sirkular, MIMO, Return Loss, VSWR, Mutual Coupling, Signal Strength

### 1. PENDAHULUAN

Teknologi telekomunikasi tanpa kabel (wireless) telah berkembang sangat pesat seiring dengan kebutuhan pengguna akan kualitas sistem komunikasi yang berkecepatan tinggi, efisien, handal dan berkualitas. Salah satu teknologi yang digandrungi oleh pengguna layanan telekomunikasi saat ini adalah Wireless Fidelity (WiFi). Standar 802.11x adalah standar yang ditetapkan oleh Institute for Electrical and Electronic Engineers (IEEE) untuk mendasari teknologi tersebut. WiFi dengan standar 802.11n merupakan standar yang bekerja pada frekuensi 2,4 GHz dan 5 GHz serta didukung oleh teknologi Multiple Input Multiple Output (MIMO).

Multiple Input Multiple Output (MIMO) adalah suatu sistem yang terdiri dari lebih dari satu terminal atau antena pada sisi pengirim dan penerima. Dengan penggunaan antena lebih dari satu antena, MIMO mendukung spesifikasi media transmisi yang membutuhkan kapasitas besar pada sistem

komunikasinya. Sistem ini menggunakan sejumlah M antena pemancar dan sejumlah N antena penerima, sehingga sering ditulis dengan sistem penulisan MIMO  $M \times N$ .

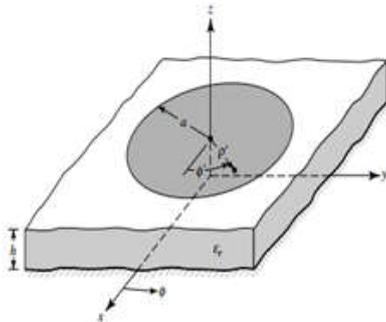
Antena mikrostrip merupakan jenis antena yang memiliki beberapa keuntungan dibanding jenis antena lainnya, yaitu memiliki beban ringan dan bentuk yang kecil, biaya fabrikasi murah sehingga dapat diproduksi dalam jumlah yang banyak. Antena mikrostrip dengan patch circular akan lebih mudah dimodifikasi untuk menghasilkan jarak nilai impedansi, pola radiasi, dan frekuensi kerja.

Pada penelitian ini membahas perancangan serta realisasi antena MIMO mikrostrip patch sirkular 4 elemen yang dapat bekerja pada pita frekuensi 2,4 GHz untuk aplikasi teknologi WiFi. Digunakan metode pencatutan *inset feed* untuk mendapat nilai impedansi yang match antara patch dan saluran. Untuk penambahan gain digunakan metode array linear pada tiap antena. Parameter yang akan diuji adalah *Return Loss*, *Mutual*

Coupling, VSWR, Pola radiasi, dan Gain. Penelitian ini akan membahas pembuatan desain antenna dengan software CST StudioSuite 2018, lalu dilakukan analisis perbandingan nilai parameter antenna hasil simulasi dan fabrikasi. Dan apabila telah memenuhi spesifikasi antenna yang baik, maka akan dilakukan pengujian performansi antenna dengan modem WiFi yang mendukung teknologi MIMO 4x4.

## 2. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1. Antena Mikrostrip Patch Sirkular



Gambar 1. Antena Mikrostrip Patch Sirkular

Antena adalah sebuah komponen yang dirancang untuk bisa memancarkan dan atau menerima gelombang elektromagnetik (Murdik, 2011). Antena mikrostrip merupakan salah satu jenis antena yang berbentuk papan tipis dan mampu bekerja pada frekuensi yang sangat tinggi. Antena mikrostrip dibuat dengan menggunakan sebuah substrat yang mempunyai tiga buah elemen dasar yaitu peradiasi (radiator), elemen substrat (substrate), dan elemen pentanahan (ground). Antena mikrostrip dengan patch lingkaran ini memiliki performa yang sama dengan antena mikrostrip segiempat. Dengan teknik pengaplikasian yang digunakan misalnya teknik array, patch circular akan menghasilkan keuntungan dibandingkan dengan patch lainnya. Selain itu, antena ini lebih mudah untuk dimodifikasi agar menghasilkan jarak nilai impedansi, pola radiasi dan frekuensi kerja (Rambe, 2008).

Persamaan-persamaan yang digunakan untuk menghitung dimensi antena (Balanis, 2005):

$$\alpha = \frac{F}{\left[1 + \frac{2h}{\pi \epsilon_r F} \left[ \ln \left( \frac{2F}{3h} \right) + 1.7726 \right] \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (1)$$

$$F = \frac{8.791 \times 10^9}{f \sqrt{\epsilon_r}} \quad (2)$$

Untuk menyesuaikan impedansi digunakan teknik transformator  $1/4\lambda$ . Impedansi

transformer dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (Balanis, 2005):

$$Z_T = \sqrt{Z_1 Z_3} \quad (3)$$

Panjang saluran untuk transformer dihitung dengan persamaan (Balanis, 2005):

$$L_T = \frac{\lambda_d}{4} \quad (4)$$

Persamaan-persamaan yang digunakan untuk menentukan lebar saluran pencatu (Grag, et al., 2001):

Untuk  $A > 1.52$

$$\frac{W}{h} = \frac{8 \exp(A)}{\exp(2A) - 1} \quad (5)$$

Untuk  $A \leq 1.52$

$$\frac{W}{h} = \frac{2}{\pi} \left\{ B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left[ \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right] \right\} \quad (6)$$

Dengan

$$A = \frac{Z_0 (\epsilon_r - 1)^{1/2}}{60 \left( \frac{\epsilon_r - 1}{2} \right)} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left\{ 0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right\} \quad (7)$$

$$B = \frac{60 \pi^2}{Z_0 \sqrt{\epsilon_r}} \quad (8)$$

Untuk menentukan panjang dan lebar insert feed digunakan persamaan (Wiguna, t.thn.):

$$y_0 = 0.3d \quad (9)$$

$$l_0 = \frac{l_d}{10} \quad (10)$$

Penentuan panjang gelombang dari suatu frekuensi antena dapat dilakukan dengan persamaan :

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_r} \quad (11)$$

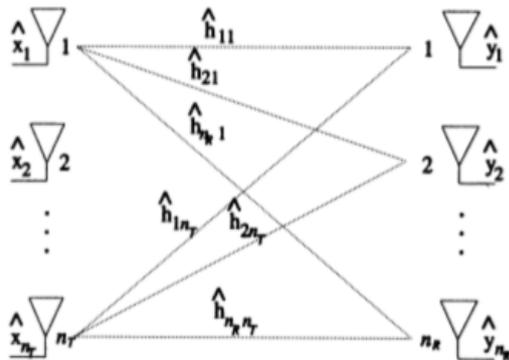
$$\lambda_d = \lambda_0 / \sqrt{\epsilon_r} \quad (12)$$

### 2.2. Wireless Local Area Network (WLAN) 802.11n

Saat ini teknologi Wireless Local Area Network (WLAN) lebih banyak dikenal masyarakat sebagai WiFi. Awalnya WiFi digunakan untuk penggunaan perangkat nirkabel dan jaringan area lokal, namun saat ini WiFi lebih banyak digunakan pengguna untuk mengakses internet melalui titik akses terdekat. Nama WiFi sendiri merupakan merk dagang dari Wi-Fi Alliance. Organisasi tersebut mendefinisikannya sebagai seluruh produk WLAN yang dibuat berdasarkan spesifikasi 802.11. Standar 802.11n merupakan standar yang dirilis pada tahun 2009, dan sudah banyak

diterapkan pada perangkat Wifi di pasaran saat ini. (Geier, 2010) menyatakan standar ini mengatur perangkat untuk dapat bekerja pada frekuensi 2,4 GHz dan 5 GHz, memiliki bandwidth selebar 20 MHz hingga 40 MHz, serta mendukung 4 MIMO spatial stream . WiFi pada frekuensi 2,4 GHz memiliki daerah cakupan yang lebih luas dibandingkan frekuensi 5 GHz. Selain itu pada frekuensi 5 GHz lebih besar kemungkinan terjadinya overlapping daripada frekuensi 2,4 GHz

### 2.3. Multiple Input Multiple Output (MIMO)



Gambar 2. Skema Sistem Multiple Input Multiple Output (MIMO)

Multiple Input Multiple Output (MIMO) adalah suatu sistem yang terdiri dari lebih dari satu terminal atau antenna pada sisi pengirim dan penerima. Dengan penggunaan antenna lebih dari satu antenna, MIMO mendukung spesifikasi media transmisi yang membutuhkan kapasitas besar pada sistem komunikasinya. Sistem ini menggunakan sejumlah M antenna pemancar dan sejumlah N antenna penerima, sehingga sering ditulis dengan sistem penulisan MIMO  $M \times N$ . Maka MIMO  $4 \times 4$  menyatakan bahwa jumlah antenna pada sisi pengirim dan penerima sama-sama berjumlah empat buah.

## 3. METODE PENELITIAN

### 3.1. Tahap Penelitian

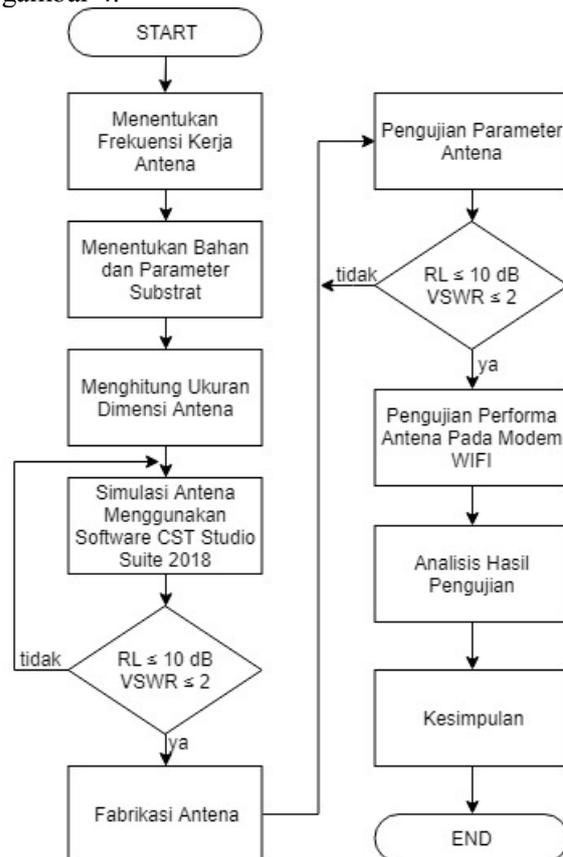
Adapun tahap penelitian yang akan ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Diagram Alur Tahap Penelitian

### 3.2. Perencanaan Sistem

Tahap perencanaan sistem ditunjukkan pada gambar 4.



Gambar 4. Tahap Perencanaan Sistem

Dalam perancangan antenna, digunakan frekuensi tengah pada kanal 7 dalam band frekuensi WiFi, yaitu 2,442 GHz. Jenis substrat yang digunakan adalah FR4 dengan konstanta

dielektrik ( $\epsilon_r$ ) = 4,4 dan ketebalan 1,5 mm. Jenis elemen peradiasi adalah tembaga dengan ketebalan 0.1 mm.

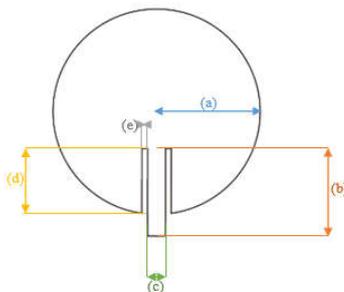
Spesifikasi antenna yang diharapkan ditunjukkan pada Tabel 1 berikut :

Tabel 1. SpesifikasiAntena yang Diinginkan

Bandwidth	>75 MHz
Return Loss (dB)	<-10
Mutual Coupling (dB)	<-20
Impedansi ( $\Omega$ )	50
VSWR	$\leq 1,5$
Polaradiasi	Unidireksional
Gain (dB)	>3

### 3.3. Simulasi Perancangan Antena

Proses simulasi dimulai dengan merancang antenna tunggal dengan menggunakan nilai dimensi antenna hasil perhitungan dengan menggunakan persamaan (1), (2), (5), (7), (9), (10), (11) dan (12).



(a) jari-jari antenna, (b) panjang saluran pencatu, (c) lebar saluran pencatu, (d) panjang inset fed, dan (e) lebar inset fed.

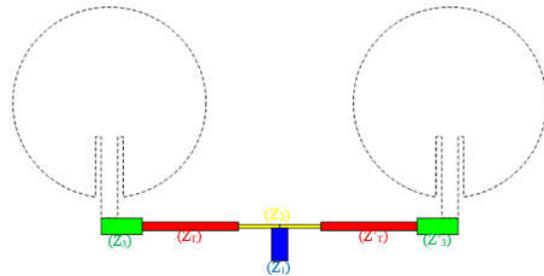
Namun, hasil simulasi antenna tunggal dengan nilai dimensi perhitungan tidak sesuai dengan spesifikasi awal antenna yang diinginkan, sehingga perlu dilakukan optimalisasi. Optimalisasi dilakukan dengan menggunakan algoritma *Trust Region Framework* yang telah disediakan oleh CST Studio Suite 2018. Nilai dimensi antenna hasil perhitungan dan optimalisasi ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Nilai Dimensi Antena Tunggal

Komponen	Nilai Perhitungan	Nilai Setelah Optimalisasi
Jari-jari elemen peradiasi	17,16 mm	17,327 mm
Panjang saluran pencatu	14,75 mm	14,75 mm
Lebar saluran pencatu	2,89 mm	2,96 mm
Panjang transformer	14,99 mm	14,99 mm

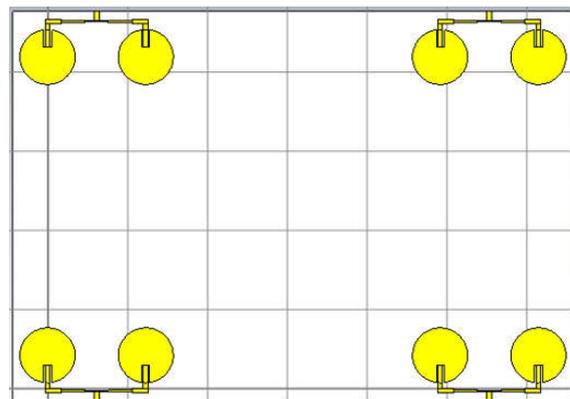
Panjang inset fed	11,44 mm	11,1 mm
Lebar inset fed	1,1 mm	1 mm

Setelah didapat nilai dimensi antenna tunggal yang sesuai spesifikasi awal, dilanjutkan dengan merancang antenna array linear untuk menambah gain dari antenna tunggal. Digunakan metode transformer  $1/4\lambda$  untuk matching impedansi saluran. Untuk menentukan panjang transformer  $1/4\lambda$  digunakan persamaan (3). Perencanaan impedansi saluran ditunjukkan pada Gambar



Gambar 4. Perencanaan Impedansi Saluran

Lebar saluran transmisi untuk masing-masing impedansi dihitung dengan menggunakan persamaan (5) dan (7). Dari hasil perhitungan maka didapatkan lebar saluran sebagai berikut:  
 $50\Omega = 2,964$  mm  
 $70,71\Omega = 1,53$  mm (transformer  $1/4\lambda$ )  
 $100\Omega = 0,66$  mm  
 Panjang transformer  $1/4\lambda$  berdasarkan persamaan (4) adalah sebesar 14.99 mm. Hasil perancangan desain dan simulasi antenna MIMO 4x4 ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Desain Antena MIMO 4x4

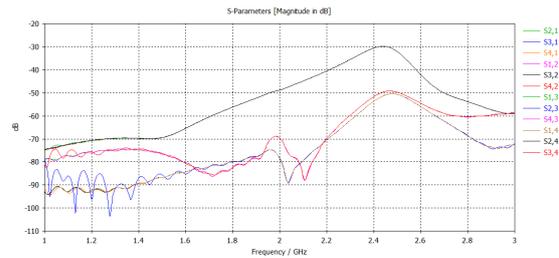
Jarak antar antenna dihitung dari titik pencatuan tiap antenna adalah sebesar dua lamda (246 mm). penempatan antenna dengan jarak tersebut ditujukan untuk mengurangi efek mutual coupling.

Karakteristik antenna hasil simulasi ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Simulasi Antena Tunggal

Frekuensi kerja	2.452 GHz
-----------------	-----------

Return loss	-28.648 dB
VSWR	1.077
Mutual coupling	<-35 dB
Bandwidth	95 MHz
Impedansi	46,89 ohm
Gain	4.99 dB
Polarisasi	Elips
Pola Radiasi	Unidireksional



Gambar 7. Grafik Hasil Simulasi Mutual Coupling

#### 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

##### 4.1. Hasil Pengukuran Return Loss

Tabel 4. Hasil Pengukuran Return Loss

Ferk	S11	S22	S33	S44	CST
2.412	-1,2	-1,1	-1,1	-1,1	-11,31
2.417	-2	-1,8	-2,4	-1,6	-12,31
2.422	-5,5	-4,6	-4,4	-3,4	-13,48
2.427	-6,5	-5,2	-6,4	-5,5	-14,86
2.432	-9,2	-8,2	-9,1	-8,2	-16,55
2.437	-13,2	-10,2	-11,9	-11,4	-18,68
2.442	-14	-11,6	-13	-13,7	-21,44
2.447	-13,4	-12,6	-12	-13,1	-25,14
2.452	-11	-12,1	-10,1	-11,2	-28,6
2.457	-9,4	-10,4	-8,5	-9,1	-26,59
2.462	-7,8	-8,6	-7,2	-7,6	-22,6
2.467	-6,5	-7,3	-6,2	-6,5	-19,49
2.472	-5,6	-6,2	-5,5	-5,6	-17,1
2.484	-4,5	-4,8	-4,3	-4,3	-13,17

Pada Tabel 4 ditampilkan nilai return loss pada frekuensi tengah tiap kanal frekuensi. Nilai return loss pada simulasi terendah terdapat pada frekuensi 2,452 GHz (kanal 9) yaitu senilai -28 dB. Sedangkan pada antenna fabrikasi, nilai return loss terendah pada frekuensi 2.442 GHz dengan nilai -14 dB. Pada pengujian return loss antenna terfabrikasi idapat nilali bandwidth 19 MHz. Hal ini menunjukkan bahwa antenna dapat bekerja pada seluruh band frekuensi WiFi, meskipun frekuensi kerjanya bergeser dari frekuensi awal sebesar 10 MHz.

##### 4.2. Hasil Simulasi Mutual Coupling

Tabel 5. Hasil Simulasi Mutual Coupling

Frekuensi	S21	S31	S41	S12	S32	S42	S13	S23	S43	S14	S24	S34
2.412	-62,87	-40,12	-53,03	-62,87	-53,03	-40,12	-40,37	-48,91	-61,6	-48,91	-40,37	-61,6
2.417	-62,27	-39,96	-52,85	-62,27	-52,85	-39,96	-40,17	-48,84	-61,09	-48,84	-40,17	-61,09
2.422	-61,71	-39,82	-52,69	-61,71	-52,69	-39,82	-39,98	-48,79	-60,61	-48,79	-39,98	-60,61
2.427	-61,19	-39,71	-52,56	-61,19	-52,56	-39,71	-39,82	-48,77	-60,16	-48,77	-39,82	-60,16
2.432	-60,71	-39,61	-52,45	-60,71	-52,45	-39,61	-39,67	-48,77	-59,75	-48,77	-39,67	-59,75
2.437	-60,28	-39,54	-52,37	-60,28	-52,37	-39,54	-39,55	-48,79	-59,38	-48,79	-39,55	-59,38
2.442	-59,89	-39,49	-52,32	-59,89	-52,32	-39,49	-39,46	-48,84	-59,04	-48,84	-39,46	-59,04
2.447	-59,54	-39,46	-52,31	-59,54	-52,31	-39,46	-39,39	-48,92	-58,75	-48,92	-39,39	-58,75
2.452	-59,23	-39,48	-52,32	-59,23	-52,32	-39,48	-39,35	-49,03	-58,49	-49,03	-39,35	-58,49
2.457	-58,96	-39,52	-52,36	-58,96	-52,36	-39,52	-39,34	-49,16	-58,27	-49,16	-39,34	-58,27
2.462	-58,73	-39,58	-52,44	-58,73	-52,44	-39,58	-39,36	-49,33	-58,09	-49,33	-39,36	-58,09
2.467	-58,54	-39,67	-52,54	-58,54	-52,54	-39,67	-39,4	-49,52	-57,94	-49,52	-39,4	-57,94
2.472	-58,39	-39,79	-52,68	-58,39	-52,68	-39,79	-39,48	-49,74	-57,83	-49,74	-39,48	-57,83
2.484	-58,15	-40,19	-53,16	-58,15	-53,16	-40,19	-39,76	-50,39	-57,68	-50,39	-39,76	-57,68

Pada Tabel 5 ditunjukkan nilai mutual coupling antar antenna. Jarak antar antenna sejauh 246 mm. Nilai mutual coupling antar antenna yang baik bernilai  $\leq -20$  dB. Hasil simulasi menunjukkan nilai mutual coupling paling besar bernilai -62,87 dB pada S21 dan S12.

Secara teori, efek mutual coupling akan menyebabkan meningkatnya nilai standing wave, koefisien refleksi, dan nilai transmisi. Pada simulasi yang telah dilakukan, kita mendapati bahwa meskipun nilai mutual couple antar antenna  $\leq 20$  dB, tetapi tetap terjadi pergeseran frekuensi kerja antenna sebesar 10MHz. Salah satu faktor yang mempengaruhi dampak mutual couple adalah letak posisi elemen-elemen antenna. Semakin dekat jarak elemen, efek mutual coupling semakin meningkat.

Desain antenna dalam penelitian ini berjarak dua lamda dihitung dari titik pencatuan antenna. Tidak bisa dipungkiri bahwa kelemahan metode array untuk menambah gain adalah pada dimensi antenna yang lebih besar, sehingga jarak antar elemen antenna satu dan elemen antenna lainnya lebih dekat, meskipun jarak antar titik pencatu sudah mencapai satu lamda. Efek mutual coupling nantinya akan lebih jelas setelah dilakukan pengujian karena jarak antar elemen dapat diatur. Pada penelitian ini, pengujian antenna terfabrikasi belum dilaksanakan.

##### 4.3. Hasil Pengukuran VSWR

Tabel 6. Hasil Pengukuran VSWR

Frek	VSWR (1)	VSWR (2)	VSWR (3)	VSWR (4)	CST
2.412	14,5	15,81	15,81	15,81	1,75
2.417	8,72	9,69	7,28	10,89	1,64
2.422	3,26	3,86	4,03	5,17	1,54
2.427	2,8	3,44	2,84	3,26	1,44
2.432	2,06	2,27	2,08	2,27	1,35
2.437	1,56	1,89	1,68	1,74	1,26
2.442	1,5	1,71	1,58	1,52	1,19
2.447	1,54	1,61	1,67	1,57	1,12
2.452	1,78	1,66	1,91	1,76	1,08
2.457	2,03	1,87	2,2	2,08	1,1
2.462	2,37	2,18	2,55	2,43	1,16
2.467	2,8	2,52	2,92	2,8	1,24

2,472	3,21	2,92	3,26	3,21	1,32
2,484	3,95	3,71	4,12	4,12	1,56

Pada Tabel 6 ditunjukkan nilai VSWR terendah hasil simulasi pada frekuensi 2,452 GHz, sebesar 1,08. Nilai VSWR penguian terendah pada frekuensi 2,442 dengan nilai rata-rata 1,48. Nilai VSWR maksimal antenna untuk dapat bekerja dengan baik adalah  $\leq 2$ . Kinerja antenna akan lebih baik apabila nilai VSWR mendekati 1 yang berarti tidak terdapat refleksi ketika saluran dalam keadaan matching sempurna. Hasil fabrikasi menunjukkan nilai VSWR antenna sudah sesuai dengan nilai yang diharapkan.

#### 4.4. Hasil Pengujian Signal Strength

Tujuan dari pengujian dengan *access point* adalah untuk melihat performansi antenna, yaitu *signal strength* antenna. Akan dilakukan pengujian kuat signal dengan parameter berupa jarak pengujian terhadap posisi *access point*. Serta dilakukan perbandingan hasil performansi AUT dengan antenna Built-In pada perangkat. Hasil pengujian ditunjukkan pada tabel 7.

Jarak	Built-in (dBm)	AUT (dBm)
0m	-25	-25
5m	-58	-62
10m	-63	-71
15m	-78	-82
20m	-85	-90

Berdasarkan pengujian yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa antenna Built-In pada *access point* memiliki kuat signal yang lebih tinggi dibanding antenna MIMO 4x4 Mikrostrip Patch Circular. Hal ini bisa dikarenakan frekuensi kerja antenna fabrikasi berada pada frekuensi 2,442 GHz (kanal 7) sedangkan pada setting digunakan kanal 1. Namun, berdasarkan kuat signal yang didapat, akses poin dengan antenna fabrikasi masih memiliki performa yang baik hingga jarak 10 m.

#### 5. KESIMPULAN

Berdasarkan perancangan antenna MIMO 4x4 mikrostrip patch circular menggunakan frekuensi 2.442 GHz, jari-jari elemen peradiasi 17,16 mm, lebar saluran pencatu 2.89 mm, lebar saluran transformer 1.521 mm, panjang transformer 14,99 mm.

Berdasarkan hasil simulasi dengan software CST Studio Suite 2018 didapat nilai return loss sebesar -28.648 dB, pada frekuensi 2.452 GHz, VSWR 1.077, dan mutual coupling <-35 dB.

Berdasarkan hasil pengujian return loss, didapat nilai rata-rata return loss sebesar -13.3 dB, pada frekuensi 2.442, VSWR 1.482.

Hasil pengujian performa signal strength antenna MIMO 4x4 Mikrostrip Patch Circular sebagai antenna pada *access point*, didapat kuat signal sebesar -25 dB pada jarak 0m, dan -90 dB pada jarak 20 m. Performansi kuat signal masih dianggap baik pada jarak 10 m, yaitu -71 dB.

Nilai mutual coupling dan impedansi dapat berubah apabila dilakukan perubahan jarak antar antenna. Jarak antar antenna dengan nilai mutual coupling paling baik pada jarak  $2\lambda$  (246 mm).

#### REFERENSI

- Balanis, C., 2005. *Antenna Theory Analysis and Design 3rd ed.* Canada: John Wiley & Sons Inc.
- Budi, I. M., Nugraha, E. S. & Agung, A., 2017. Perancangan dan Analisis Antena Mikrostrip MIMO Circular Pada Frekuensi 2,35 Ghz Untuk Aplikasi LTE. *JURNAL INFOTEL*, Volume 9, pp. 136-146.
- Grag, R., Bahtaria, P., Bahl, I. & Ittipiboon, A., 2001. *Microstrip Antenna Design Handbook.* Boston: Artech House.
- Murdik, A., 2011. *Antena Prinsip dan Aplikasi.* Cetakan Pertama ed. Yogyakarta: Graha Ilmu.
- Rambe, A. H., 2008. Perancangan Antena Mikrostrip Patch Segi Empat Elemen Tunggal Dengan Pencatuan Aperture-Coupled Untuk Aplikasi CPE Pada Wimax.
- Rizhi, R. & Sharma, S., 2017. Impedance Matching Techniques for Microstrip Patch Antenna. *Indian Journal of Science and Technology, Vol 10(28)*, .
- Widyawati, E., 2013. Perancangan dan Realisasi Antena Mikrostrip dengan Substrat Alumina Menggunakan Teknologi Thick Film untuk Aplikasi Radar Pengawas Panta.
- Wiguna, I. B. N. W., n.d. PERANCANGAN DAN PEMBUATAN ANTENA MIKROSTRIP CIRCULAR PATCH ARRAY EMPAT ELEMEN DENGAN KONFIGURASI SYMMETRY PARALLEL FEED NETWORK UNTUK FREKUENSI KERJA 2,4 GHz.