

# Implementasi Antena Microstrip *Patch* Elips pada Frekuensi 2,3 GHz untuk Penguatan Sinyal Internet

Andi Yasir Amsal<sup>1\*</sup>, Riklan Kango<sup>2</sup>, Mahsun<sup>3</sup>, Muhammad Albar<sup>4</sup>  
<sup>1,2,3,4</sup>Politeknik Negeri Balikpapan

Corresponding: andi.yasir@poltekba.ac.id \*

Submitted: 31-05-2025; Accepted: 14-06-2025; Published: 25-06-2025

## ABSTRACT

A poor internet signal is a major problem in many areas, including TK Tunas Bangsa Terpadu. This hinders learning activities that require a stable connection. This issue is caused by weak signals from service providers that are insufficient to support technology-based teaching and learning activities. The aim of this research is to design and implement an elliptical patch microstrip antenna operating at 2.3 GHz to improve internet signal quality. The antenna is designed using FR4 epoxy material with 2x2 and 4x4 MIMO configurations to amplify the signal and increase network capacity. This research uses the CST Studio Suite 2019 software for antenna simulation, followed by antenna fabrication and field testing to measure download, upload, PING and jitter speeds. Simulation results indicate that the 4x4 MIMO antenna achieves superior VSWR, return loss and gain values, offering significant performance enhancements over the 2x2 MIMO with superior download and upload speeds. While both configurations provided significant improvements, MIMO 4x4 demonstrated superior performance in the jitter and PING value tests. The 4x4 MIMO antenna developed in this research has effectively improved internet signal quality on a limited network in a school environment with weak signal problems.

*Keywords: Microstrip antenna, elliptical patch, MIMO, internet signal, 4G network*

## ABSTRAK

Kualitas sinyal internet yang buruk menjadi permasalahan utama di banyak area, termasuk di TK Tunas Bangsa Terpadu, yang menghambat proses pembelajaran yang memerlukan koneksi internet yang stabil. Masalah ini disebabkan oleh sinyal yang lemah dari penyedia layanan yang tidak memadai untuk mendukung kegiatan belajar mengajar berbasis teknologi. Penelitian ini bertujuan merancang dan mengimplementasikan antena microstrip *patch* elips pada frekuensi 2,3 GHz untuk meningkatkan kualitas sinyal internet. Sebagai solusi, antena dirancang menggunakan material FR4 epoxy dengan konfigurasi MIMO 2x2 dan MIMO 4x4 untuk memperkuat sinyal dan meningkatkan kapasitas jaringan. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah simulasi antena menggunakan perangkat lunak CST Studio Suite 2019, diikuti dengan fabrikasi antena dan pengujian lapangan untuk mengukur kecepatan unduh, unggah, PING, dan *jitter*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa antena MIMO 4x4 menghasilkan nilai VSWR, return loss, dan gain yang lebih baik serta memberikan peningkatan kinerja signifikan dibandingkan MIMO 2x2, dengan kecepatan unduh dan unggah yang lebih tinggi. Meskipun kedua konfigurasi antena memberikan peningkatan yang signifikan, penggunaan MIMO 4x4 menunjukkan kinerja yang lebih optimal pada pengujian nilai *jitter* dan PING. Penelitian ini mengembangkan antena MIMO 4x4 dengan efektif telah meningkatkan kualitas sinyal internet dengan pada jaringan terbatas di lingkungan sekolah dengan masalah sinyal yang lemah.

*Keywords: Antena microstrip, patch elips, MIMO, sinyal internet, jaringan 4G*

## 1. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi komunikasi nirkabel, terutama dalam hal jaringan internet, telah membawa dampak signifikan bagi berbagai sektor, termasuk pendidikan[1]. Di Indonesia, penggunaan internet semakin meluas, dengan sekitar 66,48% penduduk yang mengakses internet pada tahun 2022 menurut data BPS [2]. Hal ini menunjukkan bahwa teknologi informasi telah menjadi bagian integral dalam kehidupan sehari-hari, termasuk dalam dunia pendidikan. Namun, meskipun akses internet semakin berkembang, banyak wilayah, terutama daerah dengan keterbatasan infrastruktur, yang masih menghadapi masalah kualitas sinyal yang lemah. Masalah ini lebih terasa pada daerah-daerah dengan jaringan 4G yang tidak stabil, menghambat akses terhadap sumber daya

pendidikan yang penting, seperti materi ajar online dan komunikasi antara pengajar dan murid. Di TK Tunas Bangsa Terpadu, misalnya, kualitas sinyal yang buruk menghambat proses belajar mengajar yang berbasis internet.

Seiring dengan kemajuan teknologi komunikasi, kebutuhan akan solusi untuk memperkuat sinyal internet semakin mendesak. Salah satu solusi yang banyak dikembangkan adalah penggunaan antenna dengan konfigurasi MIMO (*Multiple Input Multiple Output*)[3][4], yang memungkinkan transmisi data melalui beberapa jalur sekaligus untuk meningkatkan kapasitas dan kualitas sinyal. Antena microstrip *patch* elips, khususnya, menawarkan desain kompak, biaya produksi rendah, dan kinerja yang efektif untuk aplikasi frekuensi tinggi [5], menjadikannya pilihan yang menjanjikan dalam memperkuat sinyal internet pada frekuensi 2,3 GHz [1][6]. Meskipun berbagai penelitian telah membahas pengembangan antenna untuk jaringan 4G [7] dan 5G [3], [8], [9], [10], [11], sebagian besar fokus pada desain dan analisis antenna MIMO untuk komunikasi jarak jauh, sementara aplikasi di lingkungan pendidikan dengan sinyal internet yang terbatas masih sangat kurang dibahas.

Penelitian ini bertujuan untuk merancang, mensimulasikan, dan mengimplementasikan antenna microstrip *patch* elips pada frekuensi 2,3 GHz untuk meningkatkan kualitas sinyal internet di TK Tunas Bangsa Terpadu. Penelitian ini juga akan mengeksplorasi penggunaan konfigurasi MIMO 2x2 dan 4x4 untuk memperkuat sinyal dan meningkatkan kapasitas jaringan. Dengan menggunakan perangkat lunak CST Studio Suite 2019, desain antenna akan disimulasikan untuk menghitung parameter penting seperti VSWR, return loss, dan gain [12]. Selanjutnya, pengujian lapangan akan dilakukan untuk mengukur kecepatan unduh dan unggah, serta stabilitas sinyal menggunakan antenna yang dirancang. Melalui penelitian ini, dapat memberikan solusi praktis yang dapat diterapkan pada sekolah-sekolah dengan masalah serupa, serta memberikan kontribusi pada pengembangan teknologi komunikasi untuk memperkuat jaringan di daerah dengan infrastruktur yang terbatas.

Metode yang digunakan dalam penelitian ini mencakup perancangan antenna menggunakan software simulasi, fabrikasi antenna, dan pengujian kinerja antenna di lapangan [13]. Penelitian ini menguji kedua konfigurasi antenna, yaitu MIMO 2x2 dan MIMO 4x4, untuk membandingkan kinerjanya dalam meningkatkan kecepatan dan stabilitas sinyal internet. Penelitian ini memberikan kontribusi pada pengembangan teknologi antenna MIMO dengan konfigurasi 2x2 dan 4x4 pada frekuensi 2,3 GHz, yang secara efektif meningkatkan kualitas sinyal internet di lingkungan dengan jaringan yang terbatas. Kebaruan dari penelitian ini terletak pada penerapannya untuk solusi praktis di sektor pendidikan, khususnya di daerah dengan masalah sinyal yang lemah.

## 2. METODE PENELITIAN

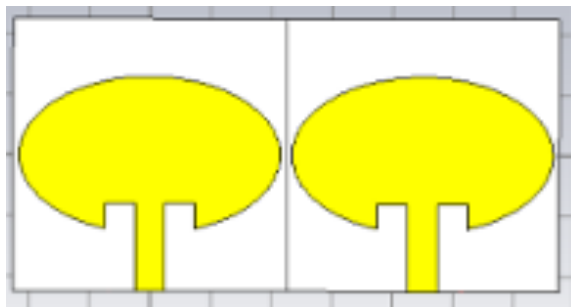
Penelitian ini dimulai dengan perancangan antenna microstrip *patch* elips yang digunakan untuk memperkuat sinyal internet pada frekuensi 2,3 GHz. Desain antenna menggunakan konfigurasi MIMO 2x2 dan 4x4 untuk meningkatkan kapasitas dan stabilitas sinyal. Langkah pertama adalah pemilihan material substrat yang digunakan, yaitu FR4 epoxy, yang memiliki sifat dielektrik yang sesuai untuk aplikasi pada frekuensi tinggi.

Tabel 1. Dimensi antenna hasil perhitungan matematis hasil optimasi

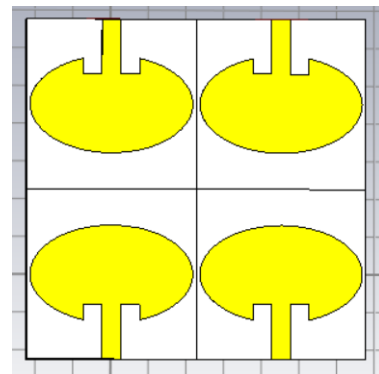
| Notasi | Hasil Optimasi | Keterangan       |
|--------|----------------|------------------|
| a      | 21,17          | Sumbu mayor      |
| b      | 12,94          | Sumbu minor      |
| Ls     | 23,34          | Panjang substrat |
| Ws     | 16,97          | Lebar substrat   |
| Lg     | 45             | Panjang ground   |
| Wg     | 64             | Lebar ground     |

|    |      |                         |
|----|------|-------------------------|
| wf | 5    | Lebar saluran pencatu   |
| lf | 20   | Panjang saluran pencatu |
| xi | 4,8  | Panjang insert feed     |
| yi | 4,94 | Lebar inset feed        |

Proses perancangan dimulai dengan perhitungan dimensi antenna berdasarkan rumus-rumus matematika yang disesuaikan dengan bentuk elips [4]. Tabel 1, menyajikan perhitungan mencakup panjang *patch*, lebar *patch*, dan dimensi substrat, serta penentuan panjang feed line untuk memastikan impedansi antenna yang sesuai dengan karakteristik frekuensi 2,3 GHz. Gambar 1, menampilkan desain kedua antenna MIMO (2x2 dan 4x4) dirancang dengan elemen-elemen antenna yang diatur untuk memastikan efisiensi dalam mengirim dan menerima sinyal.



(a) Desain antenna dua *patch*



(b) Desain antenna empat *patch*

Gambar 1. Diagram desain antenna microstrip *patch* elips

Langkah selanjutnya melakukan simulasi menggunakan perangkat lunak CST Studio Suite 2019. Perangkat lunak ini digunakan untuk memodelkan antenna dan menghitung parameter penting Return Loss, VSWR (Voltage Standing Wave Ratio), Gain, dan pola radiasi antenna. Simulasi dilakukan untuk kedua konfigurasi MIMO, yaitu 2x2 dan 4x4, dengan tujuan untuk mengevaluasi kinerja masing-masing antenna dalam memperkuat sinyal pada frekuensi 2,3 GHz. Tabel 2 memberikan hasil simulasi CST Studio Suite yang meliputi nilai VSWR, return loss, serta pola radiasi directional yang menunjukkan arah pancaran sinyal dari antenna.

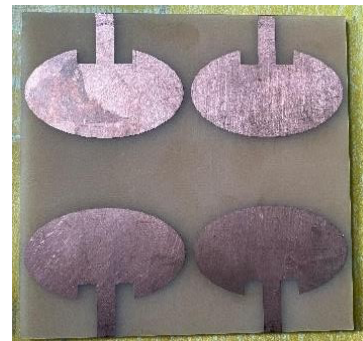
Tabel 2. Hasil simulasi CST Studio Suite 2019

| Parameter    | Spesifikasi Antena | MIMO 2x2    | MIMO 4x4    |
|--------------|--------------------|-------------|-------------|
| VSWR         | <-10               | 1.91160     | 1.8754747   |
| Return Loss  | <2                 | -25.2379    | -35.048     |
| Gain         | >2                 | 2.304 dB    | 2.18 dB     |
| Pola radiasi | Directional        | Directional | Directional |
| Bandwith     | 100 Mhz            | 100 Mhz     | 100 Mhz     |

Berdasarkan Tabel 2 yang menunjukkan hasil simulasi yang sesuai dengan spesifikasi maka dilakukan fabrikasi desain antenna. Proses fabrikasi dimulai dengan mengonversi desain antenna per-layer dari file CST ke dalam format DXF, yang kemudian diimpor ke dalam software desain grafis seperti Corel Draw. Di dalam Corel Draw, desain antenna tersebut diproses dengan memberi warna hitam pada bagian *patch* dan ground plane antenna. Desain yang telah selesai kemudian dipotong menggunakan mesin pemotong laser untuk menghasilkan antenna fisik. Gambar 2, menampilkan hasil fabrikasi yang dilakukan untuk dua konfigurasi antenna, yaitu MIMO 2x2 dan MIMO 4x4, dengan bahan FR4 epoxy yang digunakan sebagai substrat antenna.



(a) Antena MIMO *patch* 2x2



(b) Antena MIMO *patch* 4x4

Gambar 2. Proses fabrikasi antena microstrip MIMO *patch*

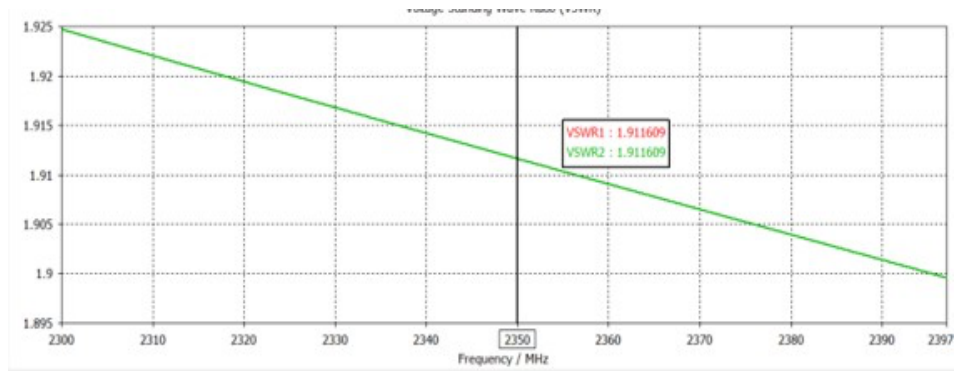
Setelah antena selesai difabrikasi, dilakukan pengujian kinerja antena di lapangan untuk mengevaluasi kecepatan internet yang dapat dicapai dengan menggunakan antena yang telah dirancang. Uji lapangan melibatkan pengujian kecepatan unduh (*download*), unggah (*upload*), PING, dan *jitter*. Pengujian menggunakan modem Bolt yang terhubung ke jaringan provider Smartfren. Uji kecepatan dilakukan pada tiga skenario: (1) tanpa menggunakan antena, (2) menggunakan antena MIMO 2x2, dan (3) menggunakan antena MIMO 4x4. Kecepatan internet yang diukur mencakup rata-rata kecepatan unduh, unggah, PING, dan *jitter* yang dicatat pada perangkat yang terhubung.

Terakhir data yang diperoleh dari pengujian kecepatan internet dianalisis untuk membandingkan performa antara ketiga skenario pengujian. Perbandingan meliputi analisis kecepatan unduh dan unggah, serta evaluasi terhadap stabilitas sinyal berdasarkan nilai PING, dan *jitter*. Data hasil pengujian digunakan untuk menentukan konfigurasi antena mana yang memberikan peningkatan kinerja terbaik, serta memberikan rekomendasi tentang penerapan antena MIMO 2x2 dan MIMO 4x4 dalam konteks penguatan sinyal internet di lokasi dengan kualitas jaringan yang buruk.

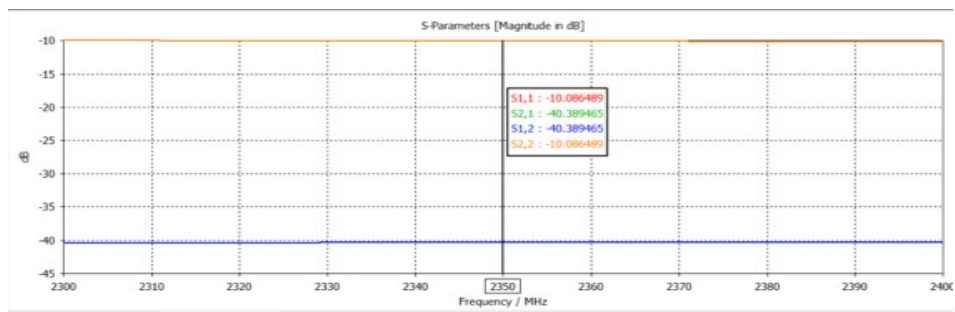
### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1. Hasil

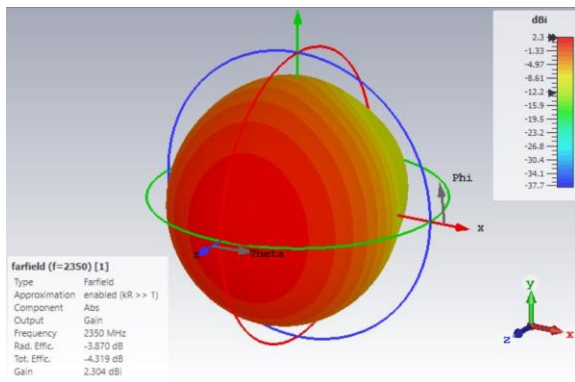
Pada tahap simulasi, antena microstrip *patch* elips MIMO 2x2 diuji untuk menilai kinerjanya dalam memperkuat sinyal pada frekuensi 2,3 GHz. Hasil simulasi menunjukkan bahwa antena ini memiliki nilai VSWR rata-rata sebesar 1.91160 (Gambar 3), yang menunjukkan tingkat kecocokan yang baik antara antena dan sumber daya transmisi. Selain itu, nilai return loss antena MIMO 2x2 rata-rata adalah -25.2379 dB (Gambar 4), yang menunjukkan bahwa sebagian besar sinyal diterima oleh antena tanpa pantulan signifikan. Gambar 5, menunjukkan bahwa penguatan (*gain*) antena ini tercatat rata-rata sebesar 2.304 dB. Kemudian untuk pola radiasi yang dihasilkan antena dua *patch* ini pada Gambar 6 adalah Directional.



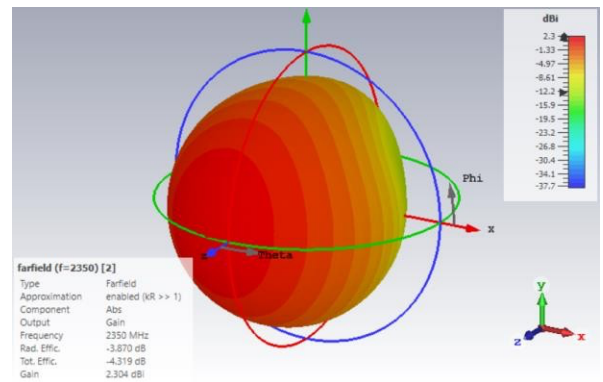
Gambar 3. Hasil parameter VSWR untuk MIMO 2x2



Gambar 4. Return loss untuk MIMO 2x2

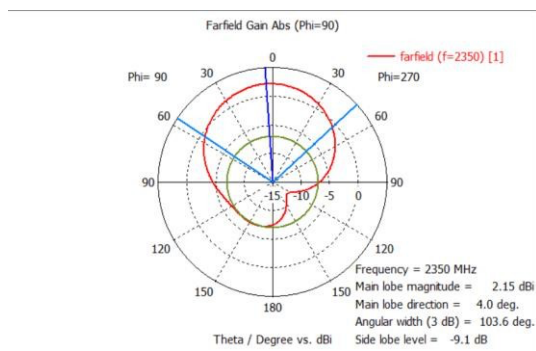


(a) Antena 1

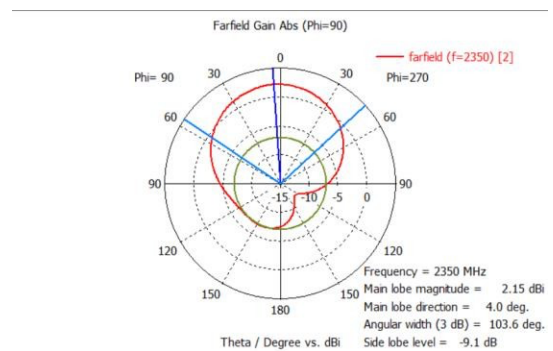


(b) Antena 2

Gambar 5. Gain antenna untuk MIMO 2x2 (a) antenna 1, (b) antenna 2



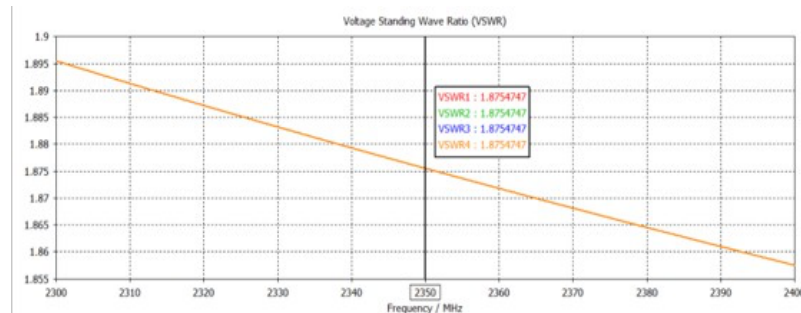
(a) Antena 1



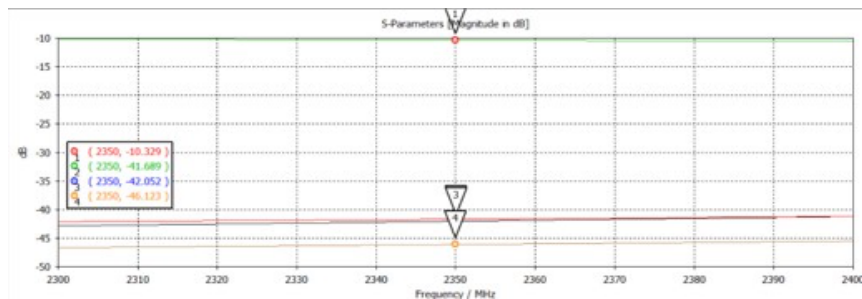
(b) Antena 2

Gambar 6. Pola Radias untuk MIMO 2x2 (a) antenna 1, (b) antenna 2

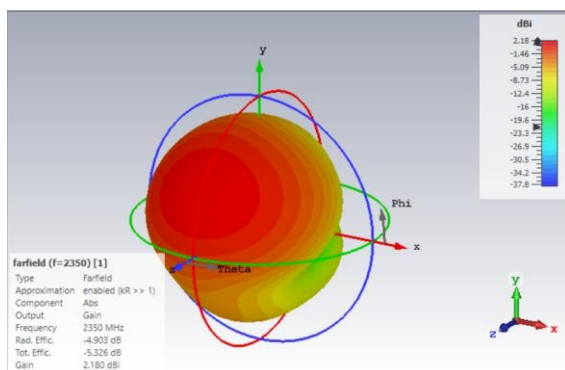
Simulasi untuk antenna MIMO 4x4 menunjukkan hasil yang lebih optimal dibandingkan dengan MIMO 2x2. Antena MIMO 4x4 memiliki nilai VSWR rata-rata sebesar 1.87547 (Gambar 7), yang lebih rendah dibandingkan MIMO 2x2, menandakan tingkat kecocokan yang lebih baik. Gambar 8, menyajikan return loss untuk antenna ini adalah -35.048 dB, yang lebih baik daripada MIMO 2x2, hal ini menunjukkan bahwa lebih banyak sinyal yang diterima oleh antenna. Sedangkan nilai Gain antenna MIMO 4x4 tercatat rata-rata sebesar 2.188 dB (Gambar 9), sedikit lebih rendah dibandingkan MIMO 2x2. Pola radiasi yang dihasilkan oleh antenna empat *patch* ini sesuai Gambar 10 adalah Directional.



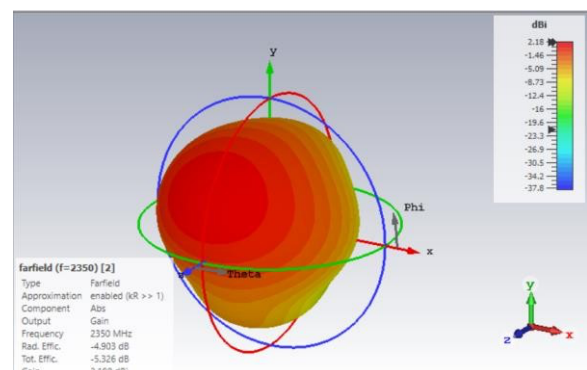
Gambar 7. Hasil parameter VSWR untuk MIMO 4x4



Gambar 8. Return loss untuk MIMO 4x4

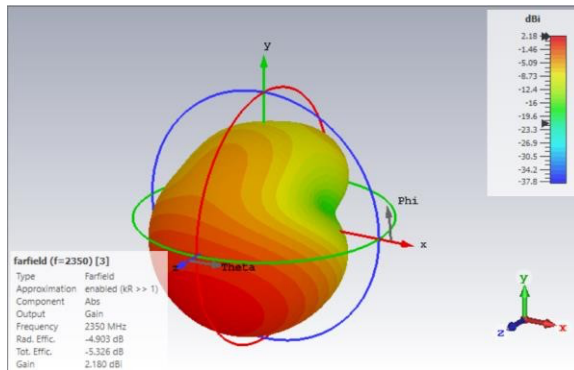


(a) Antena 1

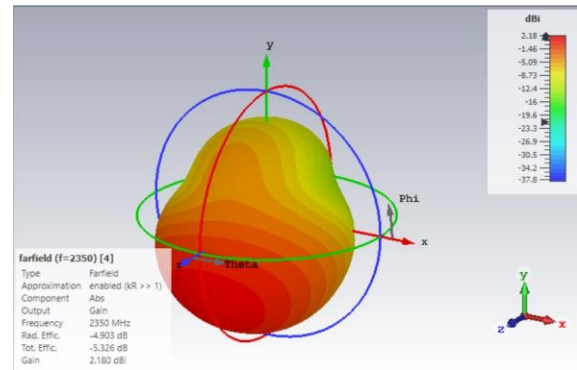


(b) Antena 2



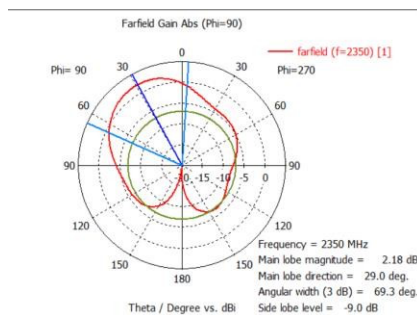


(c) Antena 3

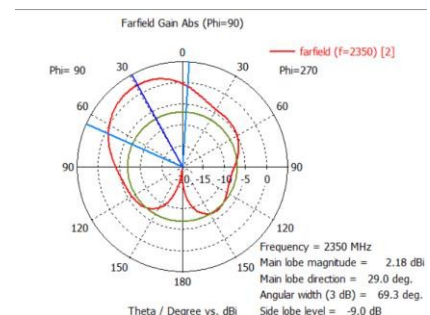


(d) Antena 4

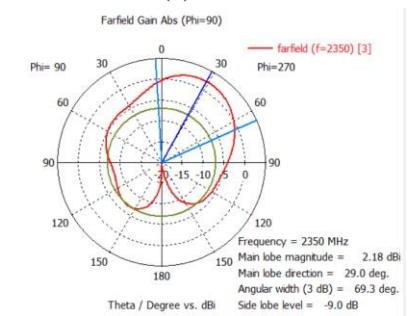
Gambar 9. Gain Antena untuk MIMO 4x4



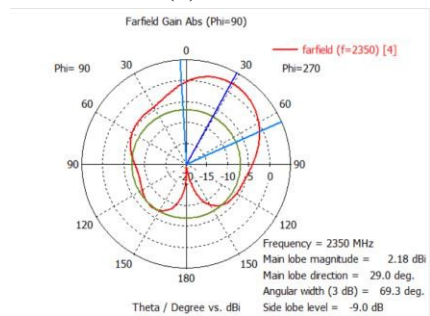
(a) Antena 1



(b) Antena 2



(c) Antena 3



(d) Antena 4

Gambar 10. Pola Radian untuk MIMO 4x4

Tabel 3. Hasil simulasi MIMO 2x2 dan MIMO 4x4

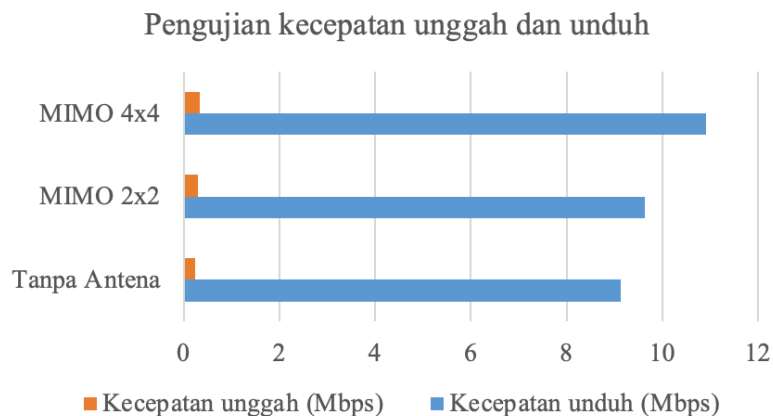
| Parameter    | Spesifikasi Antenna | MIMO 2x2    | MIMO 4x4    |
|--------------|---------------------|-------------|-------------|
| Return loss  | < -10               | -25.2379    | -35.048 dB  |
| VSWR         | < 2                 | 1.91160     | 1.8754747   |
| Gain         | >2                  | 2.304 dB    | 2.180 dB    |
| Pola radiasi | Directional         | Directional | Directional |
| Bandwith     | 100 Mhz             | 100 MHz     | 100 Mhz     |

Gambar 11 menunjukkan pengujian antenna yang dilakukan di TK Tunas Bangsa Terpadu. Pengujian di lapangan dilakukan untuk mengukur kinerja antenna dengan menggunakan modem Bolt dan provider Smartfren.

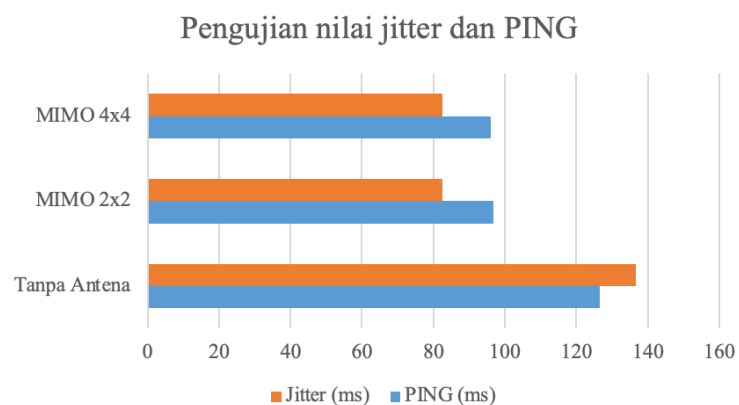
Kecepatan internet diuji dalam tiga skenario: (1) tanpa antenna, (2) menggunakan antenna MIMO 2x2, dan (3) menggunakan antenna MIMO 4x4. Hasil pengujian pada Gambar 12 menunjukkan bahwa kedua konfigurasi MIMO memberikan peningkatan yang signifikan dalam kecepatan unduh dan unggah dibandingkan dengan kondisi tanpa antenna.



Gambar 11. Pengukuran kinerja antenna di lapangan



Gambar 12. Perbandingan kecepatan unduh dan unggah pada masing-masing skenario



Gambar 13. Latensi jaringan dan stabilitas koneksi



### 3.2. Pembahasan

Berdasarkan hasil simulasi dan pengujian, antenna MIMO 4x4 menunjukkan kinerja yang lebih optimal dibandingkan dengan MIMO 2x2. Pada simulasi, antenna MIMO 4x4 memiliki nilai VSWR yang lebih rendah (1.87547) dibandingkan dengan MIMO 2x2 (1.91160), yang menunjukkan bahwa antenna MIMO 4x4 memiliki tingkat kecocokan yang lebih baik antara antenna dan sumber daya transmisi. Selain itu, return loss untuk MIMO 4x4 adalah -35.048 dB, yang lebih baik dari MIMO 2x2 dengan -25.2379 dB, menunjukkan bahwa lebih banyak sinyal diterima oleh antenna MIMO 4x4 dengan lebih sedikit pantulan. Tabel 3 hasil simulasi menunjukkan bahwa gain antenna MIMO 2x2 (2.304 dB) sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan MIMO 4x4 (2.188 dB), meskipun perbedaan ini tidak terlalu signifikan. Namun, keunggulan utama MIMO 4x4 terletak pada kemampuannya untuk menyediakan lebih banyak jalur transmisi [4], yang meningkatkan kapasitas dan stabilitas jaringan secara keseluruhan.

Hasil pengujian lapangan memperlihatkan perbedaan yang signifikan dalam kecepatan unduh dan unggah antara ketiga skenario pengujian. Tanpa menggunakan antenna, kecepatan unduh hanya mencapai 9.126 Mbps dan unggah 0.246 Mbps, sedangkan menggunakan antenna MIMO 2x2, kecepatan unduh meningkat menjadi 9.627 Mbps dan unggah tercatat 0.304 Mbps. Penggunaan antenna MIMO 4x4 memberikan hasil yang lebih baik lagi dengan kecepatan unduh 10.924 Mbps dan unggah meningkat menjadi 0.342 Mbps yang menunjukkan bahwa ada efisiensi antenna dalam memperkuat sinyanya. Gambar 13 menunjukkan hasil pengujian bahwa penggunaan antenna MIMO 4x4 tidak hanya meningkatkan kecepatan unduh maupun unggah, tetapi mengurangi nilai *jitter* dan nilai PING secara signifikan. Nilai *jitter* untuk MIMO 2x2 adalah 82,6 ms, sedangkan MIMO 4x4 menurunkan nilai tersebut menjadi 82,5 ms, yang menunjukkan bahwa MIMO 4x4 lebih efektif dalam menjaga stabilitas koneksi pada jaringan. Peningkatan kinerja yang signifikan pada MIMO 4x4 terutama terlihat pada pengujian dengan kecepatan unggah dan PING yang lebih rendah. Selain itu, nilai PING pada MIMO 2x2 adalah 96.7 ms, dan pada MIMO 4x4, sedikit lebih rendah, yaitu 96.1 ms yang menunjukkan bahwa latensi pada jaringan berkurang.

Antena microstrip *patch* elips dengan konfigurasi MIMO 2x2 dan 4x4 terbukti efektif dalam meningkatkan kualitas sinyal dan kecepatan internet, yang sangat penting untuk mendukung kegiatan belajar mengajar. Hal ini sejalan dengan penelitian [4], [10], [14] bahwa teknologi multiple-input multiple-output (MIMO) adalah teknologi yang memanfaatkan beberapa antenna, lebih dari satu di pemancar dan penerima, yang secara koheren memproses lebih banyak informasi dibandingkan dengan menggunakan satu antenna. Penerapan antenna ini di TK Tunas Bangsa dapat membantu siswa dan tenaga pengajar untuk mengakses sumber daya pendidikan secara lebih efisien, terutama di area dengan kualitas jaringan yang rendah. Penelitian ini juga memberikan kontribusi pada pengembangan teknologi komunikasi di Indonesia, khususnya untuk aplikasi jaringan 4G yang masih banyak digunakan di banyak wilayah. Dengan meningkatnya penggunaan teknologi MIMO, koneksi internet di area kawasan pendidikan dapat lebih optimal, mendukung pemerataan akses informasi dan pengetahuan.

Meskipun hasil penelitian ini menunjukkan peningkatan signifikan dalam kualitas sinyal, terdapat beberapa keterbatasan pada faktor lingkungan (faktor cuaca dan hambatan fisik) yang mempengaruhi kinerja antenna. Rekomendasi penelitian selanjutnya dilakukan pengujian antenna dalam kondisi lingkungan yang beragam dan pada frekuensi lebih tinggi. Selain itu, penggunaan antenna MIMO dengan lebih banyak elemen, seperti MIMO 8x8, juga dapat dipertimbangkan untuk mengukur apakah peningkatan elemen antenna lebih lanjut dapat memberikan manfaat yang lebih besar dalam meningkatkan kualitas sinyal dan kecepatan internet.

#### 4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi, pengujian, dan analisis yang dilakukan pada antenna microstrip *patch* elips dengan konfigurasi MIMO 2x2 dan MIMO 4x4 pada frekuensi 2,3 GHz, dapat disimpulkan bahwa antenna MIMO 4x4 memberikan peningkatan kinerja yang lebih signifikan dibandingkan MIMO 2x2, dengan kecepatan unduh dan unggah yang lebih tinggi. Meskipun MIMO 2x2 sudah memberikan peningkatan yang baik, penggunaan MIMO 4x4 menunjukkan hasil yang lebih optimal, terutama pada pengujian nilai jiter dan PING. Pengujian menunjukkan bahwa antenna microstrip *patch* elips dapat memperkuat sinyal di lokasi dengan kualitas jaringan yang buruk, memberikan solusi praktis untuk masalah sinyal lemah, terutama di daerah pendidikan. Kemudian saran penelitian kedepan dapat melakukan pengujian di kondisi geografis dan lingkungan seperti di area dengan berbagai jenis hambatan fisik daerah dengan banyak bangunan tinggi. Penggunaan frekuensi yang lebih tinggi (misalnya, 5 GHz) untuk meningkatkan kapasitas dan jangkauan antenna. Selain itu peningkatan konfigurasi antenna MIMO dengan lebih banyak elemen, seperti MIMO 8x8.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian yang dilaporkan dalam publikasi ini didukung oleh Pusat Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (P3M), Politeknik Negeri Balikpapan dengan nomor hibah 0218/PL32/PP/2025. Proyek ini melalui skema Penelitian Dasar yang didanai oleh DIPA Poltekba untuk tahun anggaran 2025.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. S. Rana, S. Hossain, S. B. Rana, and M. M. Rahman, "Microstrip patch antennas for various applications: a review," *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 29, no. 3, pp. 1511–1519, Mar. 2023, doi: 10.11591/IJEECS.V29.I3.PP1511-1519.
- [2] "Indeks Pembangunan Teknologi Informasi dan Komunikasi 2023 - Badan Pusat Statistik Indonesia." Accessed: May 31, 2025. [Online]. Available: <https://www.bps.go.id/id/publication/2024/09/30/b50f00b8615fc8716c8e02d4/indeks-pembangunan-teknologi-informasi-dan-komunikasi-2023.html>
- [3] K. B. Velip and S. Borkar, "Antenna Design for 4x4 MIMO 5G Communication," *International Research Journal of Engineering and Technology*, 2022, [Online]. Available: [www.irjet.net](http://www.irjet.net)
- [4] A. M. Damanik, E. Kusumawardhani, and F. Imansyah, "Design of 2x2 MIMO Microstrip Antenna With 4 Circular Patch Array Elements for Wifi Technology at 2.4 GHz Operating Frequency," *Journal of Electrical Engineering, Energy, and Information Technology (J3EIT)*, vol. 12, no. 1, p. 249, Apr. 2024, doi: 10.26418/j3eit.v12i1.75742.
- [5] M. S. Rana, B. K. Sen, M. T. Al Mamun, S. Islam Sheikh, M. S. Mahmud, and M. Mostafizur Rahman, "Design of S-Band Microstrip Patch Antenna for Wireless Communication Systems Operating at 2.45GHz," *2022 13th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies, ICCCNT 2022*, 2022, doi: 10.1109/ICCCNT54827.2022.9984490.
- [6] H. Ghennioui, M. El Kamili, and I. Berrada, "Foreword," *Proceedings - 2019 International Conference on Wireless Networks and Mobile Communications, WINCOM 2019*, Oct. 2019, doi: 10.1109/WINCOM47513.2019.8942489.
- [7] M. Ulfah, "Rancang Bangun Antena Mikrostrip Mimo 2x2 dan 4x4 Circular Patch Dengan Frekuensi 2300-2400 Mhz untuk Teknologi 4G LTE," *THETA OMEGA: Journal of Electrical Engineering*, p. 2021.
- [8] S. K. Ezzulddin, S. O. Hasan, and M. M. Ameen, "Microstrip patch antenna design, simulation and fabrication for 5G applications," *Simul Model Pract Theory*, vol. 116, p. 102497, Apr. 2022, doi: 10.1016/J.SIMPAT.2022.102497.

- [9] H. Hadiwiyatno, S. Wirayoga, and A. M. Imamuddin, "PERANCANGAN DAN IMPLEMENTASI ANTENA MIKROSTRIP HARDWARE KOMUNIKASI WIRELESS MISO 2X1 DENGAN FREKUENSI KERJA 2,4 GHz DAN 5 GHz UNTUK ACCESS POINT," *JURNAL ELTEK*, vol. 22, no. 1, pp. 1–7, Apr. 2024, doi: 10.33795/eltek.v22i1.4015.
- [10] P. Mounika and T. Jaya, "Design of 4X4 Microstrip Patch Array Antenna for 5G mmWave Applications," *SSRG International Journal of Electronics and Communication Engineering*, vol. 12, no. 1, pp. 104–117, Jan. 2025, doi: 10.14445/23488549/IJECE-V12I1P108.
- [11] R. Tiwari, R. Sharma, and R. Dubey, "2X2 & 4X4 dumbbell shape microstrip patch antenna array design for 5G Wi-Fi communication application," *Mater Today Proc*, Mar. 2023, doi: 10.1016/J.MATPR.2023.03.348.
- [12] "CST Studio Suite | SIMULIA - Dassault Systèmes." Accessed: May 25, 2025. [Online]. Available: <https://www.3ds.com/products/simulia/cst-studio-suite>
- [13] M. S. Rana, B. K. Sen, M. T. Al Mamun, M. S. Mahmud, and M. M. Rahman, "A 2.45 GHz microstrip patch antenna design, simulation, and analysis for wireless applications," *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, vol. 12, no. 4, pp. 2173–2184, Aug. 2023, doi: 10.11591/EEI.V12I4.4770.
- [14] P. Kim-Thi and T. Pham-Danh, "Compact and high isolated microstrip patch antenna system for full-duplex/MIMO applications," *Heliyon*, vol. 10, no. 19, p. e38980, Oct. 2024, doi: 10.1016/J.HELİYON.2024.E38980.