

Subarray 4×4 untuk Antena MIMO 5G dengan Elemen yang Menerapkan Teknik *Parasitic*

Fitri Amillia^{1,4}, Eko Setijadi², Gamantyo Hendranto³

^{1,2,3} Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Kampus ITS, Keputih, Surabaya 60111 (tel.: 031-594 7302; fax: 031-593 1237; email: ¹07111860010009@mhs.its.ac.id, ²ekoset@ee.its.ac.id, ³gamantyo@ee.its.ac.id)

⁴ Departemen Teknik Elektro, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau, Jl. H.R. Soebrandt No. 1551 KM.15 Simpang Baru Panam Pekanbaru 28293 (tel.: 0761-562051; fax: 0761-562052; email: ⁴fitriamillia@uin-suska.ac.id)

[Diterima: 10 Oktober 2022, Revisi: 26 Desember 2022]

Corresponding Author: Eko Setijadi

INTISARI — *Multiple-input multiple-output* (MIMO) merupakan sistem komunikasi nirkabel yang menggunakan banyak antena di sisi pemancar maupun penerima. Sistem ini dapat meningkatkan kualitas komunikasi nirkabel pada jaringan teknologi 5G. Teknologi 5G memiliki kecepatan data yang sangat tinggi dan tunda (*delay*) yang sangat rendah. Jaringan 5G di Indonesia menggunakan frekuensi menengah, yaitu pada pita frekuensi 3,5 GHz. Antena merupakan perangkat yang penting di jaringan nirkabel sistem MIMO. Oleh karena itu, penelitian ini mengusulkan perancangan elemen tunggal menggunakan teknik *parasitic* untuk memperlebar lebar bidang (*bandwidth*) guna memenuhi kebutuhan antena MIMO dan perancangan antena *subarray* 4×4 untuk MIMO 5G. Metode yang dilakukan pada penelitian ini diawali dengan menentukan spesifikasi target antena, kemudian melakukan perancangan elemen tunggal dengan *parasitic patch*. Penggunaan teknik *parasitic patch* pada elemen antena bertujuan untuk memperlebar *bandwidth* supaya memenuhi spesifikasi target. Frekuensi resonansi antena mikrostrip dipengaruhi oleh penambahan jumlah *parasitic patch*. Banyaknya frekuensi resonansi yang timbul menghasilkan *bandwidth* yang lebar. Kemudian, elemen tunggal dengan *parasitic patch* disusun menjadi *subarray* 4×4. Semua elemen disusun dalam satu substrat yang sama dengan jarak antarelemen dari titik pencatutan satu ke titik pencatutan lainnya sebesar 64,28 mm atau 0,75 λ . Desain *subarray* sudah memenuhi target spesifikasi antena jika elemen *subarray* sudah mempunyai *fractional bandwidth* lebih dari 20% dan *mutual coupling* kurang dari -20 dB. Bahan yang digunakan dalam desain dan fabrikasi antena adalah substrat FR-4 (*epoxy*) dengan konstanta dielektrik (ϵ_r) 4,3 dan ketebalan substrat (*h*) 1,6 mm. Hasil menunjukkan bahwa diperoleh *bandwidth* sebesar 735 MHz atau *fractional bandwidth* sebesar 20,35%, *return loss* -14,65 dB, *mutual coupling* -30,05 dB, dan *gain* 16,86 dB. Dengan demikian, *subarray* 4×4 untuk antena MIMO yang dirancang sudah memenuhi spesifikasi yang diinginkan.

KATA KUNCI — MIMO, *Subarray*, 5G, Mikrostrip, *Parasitic*.

I. PENDAHULUAN

Sistem *multiple-input multiple-output* (MIMO) menjadi salah satu kunci utama dari teknologi 5G [1], [2]. Teknologi MIMO berawal dari teknologi *antenna diversity* pada komunikasi nirkabel dan antena cerdas. Sistem ini adalah kombinasi dari *multiple-input single-output* (MISO) dan *single-input multiple-output* (SIMO) yang memiliki kelebihan dan karakteristik dari keduanya. Sistem MIMO mengandung beberapa pemancar dan penerima yang memiliki antena masing-masing [3]. Sistem ini memiliki beberapa keuntungan, antara lain kecepatan data, keandalan, dan efisiensi spektrum yang tinggi [4].

Antena merupakan perangkat yang penting dalam mendukung kinerja sistem MIMO teknologi nirkabel 5G. Salah satu alokasi frekuensi 5G yang direkomendasikan adalah frekuensi menengah, yaitu frekuensi 3,5 GHz. Frekuensi ini akan digunakan di Indonesia karena memiliki cakupan yang luas, sehingga menghemat biaya pengembangan jaringan [5]. Dalam merealisasikan sistem antena MIMO, diperlukan desain antena dengan *bandwidth* yang lebar, yang mendukung berbagai layanan sistem, dan *gain* yang tinggi [6]. Antena MIMO sering dirancang menggunakan teknologi mikrostrip karena biayanya murah, *low profil*, *compact*, dan mudah diintegrasikan. Akan tetapi, antena jenis ini mempunyai kekurangan, yaitu *bandwidth* yang sempit serta *gain* dan *directivity* yang kecil [7].

Beberapa desain antena untuk meningkatkan *bandwidth* telah diusulkan, misalnya desain antena *circular* metode *stacked patch* dengan *bandwidth* yang meningkat 7,3% [8]. Selain itu, terdapat desain antena tunggal dengan metode

modifikasi *parasitic patch* dengan *slot patch* [9]; dan desain elemen tunggal dengan kombinasi metode *u-shaped* dengan metode *parasitic* yang berhasil meningkatkan *bandwidth* sebesar 10,3% [10].

Referensi [11] membahas tentang desain antena yang terdiri atas lapisan *substrat* dengan empat *parasitic patch* yang ditempatkan pada lapisan atas antena, sedangkan aplikasi *array* diwujudkan dengan menggunakan kombinasi dua teknik *decoupling* dengan menyusun antena 2×2. Dua teknik yang digunakan adalah *decoupling walls* dan *neutralized networks*. *Metal wall* tidak hanya membuat dua *parasitic patch* akan mudah mengalami *short-circuit*, tetapi juga bertindak sebagai *decoupling walls* untuk mengurangi *mutual coupling* antara elemen-elemen antena yang merugikan. Selanjutnya, *decoupling* sederhana dengan *short-circuit stepped impedance structures* (SSIS) sebagai jaringan penetral ditambahkan untuk menekan *mutual coupling*. Antena ini terdiri atas dua lapisan substrat dengan ketebalan masing-masing 1,5 mm dan 2 mm. Struktur antena berupa *rectangular cavity* yang dibentuk *metal via as sidewalls*. Di sini, pada dua lapisan substrat digunakan teknik *decoupling* dengan SSIS dalam konfigurasi *array*. Hal ini menyebabkan fabrikasi antena menjadi lebih mahal dan dimensi antena kurang kompak. Desain ini beroperasi pada rentang frekuensi 3,35 GHz hingga 3,95 GHz atau *fractional bandwidth* 16%, *gain* 13,6 dB, dan *mutual coupling* di bawah -38 dB.

Referensi [12] menjelaskan desain *subarray* dua elemen menggunakan lima *parasitic patch* yang ditempatkan pada lapisan atas antena dan satu lapisan substrat. Rancangan disimulasikan dan disusun pada bidang-H dengan jarak 0,75 λ ,

yang menghasilkan *mutual coupling* sebesar $-29,76$ dB dan bidang-E sebesar $-33,56$ dB. Di sisi lain, *mutual coupling* pada bidang-E untuk jarak $0,5\lambda$ tidak memenuhi kriteria. *Fractional bandwidth* yang diperoleh sebesar 17%, dengan rentang frekuensi yang dihasilkan adalah 609,9 MHz sampai 616,4 MHz untuk semua variasi jarak elemen yang cocok untuk aplikasi 5G.

Kemudian, referensi [6] meneliti efek elemen *parasitic patch* pada kinerja antenna MIMO. Beberapa elemen *parasitic patch* persegi panjang ditambahkan di dekat masing-masing elemen *patch* persegi panjang. Elemen *parasitic* ini memengaruhi distribusi medan elektromagnetik dan akibatnya mengurangi *mutual coupling*. Selain itu, *bandwidth* yang lebih lebar juga tercapai. Desain yang diusulkan tersusun dari dua antenna MIMO yang digabungkan dalam bidang-H dan bidang-E dengan *bandwidth* terukur sebesar 14%.

Pada makalah ini diusulkan elemen menggunakan teknik *parasitic patch* untuk diimplementasikan pada desain *subarray* 4×4 pada antenna sistem MIMO dengan frekuensi kerja 3,5 GHz. Selanjutnya, penelitian ini mengembangkan teknik penambahan *parasitic patch* pada lapisan atas untuk menghasilkan beberapa frekuensi resonansi yang menghasilkan *bandwidth* yang lebih lebar [6], [12]–[15]. Jumlah *parasitic patch* yang digunakan pada penelitian sebelumnya adalah sebanyak tiga *parasitic patch* [6], [14], [15], empat *parasitic patch* [13], dan lima *parasitic patch* [12]. Sementara itu, pada penelitian ini diterapkan sepuluh *parasitic patch*. Kebutuhan *bandwidth* 5G untuk frekuensi 3,5 GHz minimum adalah 500 MHz, sesuai standar ETSI [16], kemudian *mutual coupling* harus lebih kecil dari -20 dB [6]. Penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan *bandwidth* lebih besar dari 600 MHz atau *fractional bandwidth* sekitar 20% serta *mutual coupling* yang lebih kecil dari -20 dB. Setelah didapatkan desain elemen yang sesuai dengan spesifikasi yang diinginkan, elemen-elemen tersebut disusun menjadi *subarray* 4×4 untuk sistem antenna MIMO dengan jarak antarelemen berdasarkan titik *feeding* sebesar $0,75\lambda$. Selanjutnya, dilakukan evaluasi kinerja *subarray* antenna MIMO dengan parameter-parameter *return loss*, *bandwidth*, *mutual coupling*, *gain*, *beamwidth*, dan *side lobe level* (SLL).

Makalah ini disusun menjadi lima bagian. Bagian pertama adalah pendahuluan, bagian kedua menjelaskan tentang antenna mikrostrip dan teknik *parasitic*, bagian ketiga membahas tentang desain antenna, bagian keempat merupakan hasil dan analisis, serta bagian akhir berisikan tentang kesimpulan.

II. ANTENA MIKROSTRIP

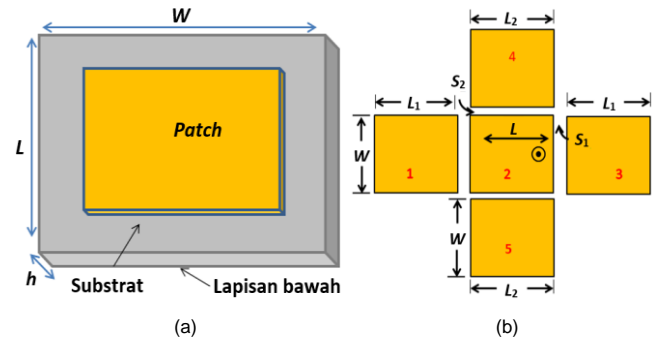
A. ANTENA MIKROSTRIP RECTANGULAR PATCH

Antena mikrostrip *rectangular patch* merupakan jenis antenna mikrostrip yang paling banyak digunakan karena jenis antenna ini lebih mudah untuk dianalisis. Struktur antenna mikrostrip *rectangular patch* memiliki tebal h , lebar W , dan terbentang sepanjang L . Struktur antenna mikrostrip terdiri atas *patch* (tambalan), substrat, dan *ground plane* (lapisan bawah), seperti diperlihatkan pada Gambar 1(a).

Dalam mendesain antenna mikrostrip *rectangular patch*, parameter yang perlu diketahui adalah L dan W . Untuk mendapatkan L dan W , dapat digunakan (1) sampai (4) sebagai berikut [17], [18].

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

$$L = L_{eff} - 2\Delta L \quad (2)$$



Gambar 1. Antena mikrostrip, (a) antena mikrostrip *rectangular patch*, (b) konfigurasi antena dengan empat elemen *parasitic patch* [13].

$$L_{eff} = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{reff}}} \quad (3)$$

$$\Delta L = 0,412 h \frac{(\epsilon_{reff} + 0,3) + (\frac{W}{h} + 0,264)}{(\epsilon_{reff} + 0,258) + (\frac{W}{h} + 0,8)} \quad (4)$$

dengan

- f_r = frekuensi resonansi atau frekuensi kerja antenna (Hz)
- c = kecepatan cahaya (3×10^9 m/s)
- h = ketebalan *substrate* (mm)
- ϵ_r = konstanta dielektrik substrat
- L_{eff} = panjang *patch* efektif (mm)
- ϵ_{reff} = konstanta dielektrik efektif.

Sementara itu, panjang dan lebar *ground plane* dapat dihitung menggunakan (5) dan (6) sebagai berikut [18], [19].

$$L_g = xh + L \quad (5)$$

$$W_g = xh + W \quad (6)$$

dengan

- L_g = panjang *ground plane* (mm)
- W_g = lebar *ground plane* dan *substrate* (mm)
- x = faktor pengali dengan nilai ≥ 6 .

Pada pencatutan jenis *coaxial probe*, titik pencatutan antenna sangat memengaruhi kinerja antenna. Titik pencatutan antenna dihitung menggunakan (7) sampai (9) [18], [20].

$$\epsilon_{reff} = \frac{(\epsilon_r + 1) + (\epsilon_r - 1)}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (7)$$

$$X_f = \frac{L}{2\sqrt{\epsilon_{reff}}} \quad (8)$$

$$Y_f = \frac{W}{2} \quad (9)$$

dengan

- ϵ_{reff} = konstanta dielektrik efektif
- ϵ_r = konstanta dielektrik substrat
- h = ketebalan substrat (mm)
- W = lebar *patch* (mm)
- X_f = titik pencatutan sisi panjang (mm)
- Y_f = titik pencatutan sisi lebar (mm).

B. TEKNIK PARASITIC

Teknik *parasitic patch* diterapkan dengan menambahkan *patch* atau menempatkan *patch* di dekat tepi antenna *patch* asli. *Patch* baru ini, yang disebut *parasitic patch*, dapat terhubung ke antenna *patch* utama secara elektromagnetik. Teknik ini merupakan salah satu cara untuk meningkatkan *bandwidth* antenna mikrostrip [21].

Setiap *parasitic patch* dapat dirancang dengan cara yang sama dengan antena *patch* asli. Perancangan *parasitic patch* dilakukan berdasarkan perhitungan dari beberapa persamaan matematis yang telah disebutkan pada (1) sampai (9) serta disesuaikan dengan spesifikasi material yang digunakan. Panjang dan lebar *parasitic patch* menentukan frekuensi resonansi dan *bandwidth* yang dihasilkan [13].

Parasitic patch memperoleh arus listrik akibat induksi dari *patch* utama. *Patch* utama dicatu dengan arus listrik, kemudian arus listrik yang berada di *patch* utama menyebabkan induksi di sisi *parasitic patch* yang meradiasi. Dimensi *parasitic patch* yang berbeda memengaruhi perubahan frekuensi resonansi. *Coupling* antar-*parasitic patch* dipengaruhi oleh jarak antar-*parasitic patch* yang dapat mengontrol *matching impedance* antena. Kemudian, konfigurasi elemen *parasitic patch* 1, 2, dan 3 disusun secara horizontal, seperti ditunjukkan pada Gambar 1(b).

Karena jarak *parasitic patch* yang berdekatan satu sama lain, pada *parasitic patch* di sisi yang tidak meradiasi timbul arus listrik sebagai akibat induksi dari *parasitic patch* di sisi yang meradiasi. Hal ini terjadi karena medan listrik pada tepi yang tidak meradiasi tidak seragam, sedangkan pada tepi yang meradiasi medan listriknya seragam. Selanjutnya, konfigurasi elemen *parasitic patch* 4, 2, dan 5 disusun secara vertikal, seperti ditunjukkan pada Gambar 1(b).

Konfigurasi antena mikrostrip dengan *coupling* empat elemen *parasitic patch* menggabungkan dua metode, yaitu *coupling* melalui tepi yang meradiasi dan *coupling* melalui tepi yang tidak meradiasi. Hal ini dapat meningkatkan *bandwidth*, seperti diperlihatkan pada Gambar 1(b).

III. DESAIN ANTENA

Desain antena diawali dengan desain elemen tunggal menggunakan *parasitic patch* yang selanjutnya akan disusun dalam bentuk *subarray* dengan konfigurasi 4×4 untuk antena sistem MIMO 5G. Teknik pencatuan yang digunakan pada antena adalah *probe feeding coaxial*.

Spesifikasi yang ditargetkan adalah antena sistem MIMO dengan frekuensi kerja pada 3,5 GHz, sesuai dengan kebutuhan 5G [5], *bandwidth* ≥ 600 MHz [16], *fractional bandwidth* $\geq 20\%$, *return loss* ≤ -10 dB, *mutual coupling* ≤ -20 dB [6], [11], [12], dan *gain* > 3 dB [6]. Bahan yang digunakan dalam desain dan fabrikasi antena adalah substrat FR-4 (*epoxy*) dengan (ϵ_r) = 4,3 dan $h = 1,6$ mm.

Selanjutnya, pada tahap awal ini dilakukan desain elemen tunggal berbentuk *rectangular* tanpa *parasitic patch* yang sesuai spesifikasi yang diharapkan, yaitu bekerja pada frekuensi 3,5 GHz. Untuk mendesain elemen tunggal menggunakan teknik *parasitic patch* guna mendapatkan kinerja antena yang diinginkan, perlu dilakukan optimasi pada desain antena dengan melakukan perubahan parameter-parameter pada *parasitic patch*. Pada optimasi antena ini, dilakukan beberapa perubahan pada dimensi *parasitic patch* dengan cara mengurangi lebar dimensi dan menambahkan beberapa *parasitic patch* sedemikian rupa, sehingga mampu tercapai spesifikasi sesuai target, antara lain frekuensi kerja, *gain*, dan *bandwidth*.

Setelah elemen tunggal yang menggunakan *parasitic patch* memenuhi target, elemen tersebut disusun dalam struktur *subarray* 4×4. Desain *subarray* dianggap sudah memenuhi target jika elemen *subarray* sudah mempunyai *fractional bandwidth* lebih dari 20% dan kriteria parameter antena sudah terpenuhi. Antena *subarray* disusun menggunakan konfigurasi

TABEL I
DIMENSI ELEMEN TUNGGAL

Simbol	Nilai (mm)	Simbol	Nilai (mm)	Simbol	Nilai (mm)
W_s	68,71	W_{p1}	10,31	W_{p4}	17,77
L_s	68,49	L_{p1}	18,27	L_{p4}	15,00
W_p	10,25	W_{p2}	13,13	W_{p5}	17,77
L_p	20,11	L_{p2}	16,97	L_{p5}	20,00
X_f	6,09	W_{p3}	20,39	W_{p6}	17,77
Y_f	2,80	L_{p3}	18,89	L_{p6}	10,00

planar 4×4. Semua elemen disusun dalam satu substrat yang sama dengan jarak antarelemen dari titik pencatuan satu ke titik pencatuan lainnya sebesar 64,28 mm atau $0,75\lambda$. Jarak antar elemen ini sudah memenuhi target, yaitu menghasilkan *mutual coupling* kurang dari -20 dB.

Setelah desain elemen tunggal dan *subarray* 4×4 sesuai target spesifikasi antena, dilakukan fabrikasi desain antena tersebut. Selanjutnya, dilakukan simulasi dan pengukuran antena di ruang *anechoic chamber* untuk elemen tunggal, sedangkan pada *subarray* 4×4 hanya dilakukan simulasi.

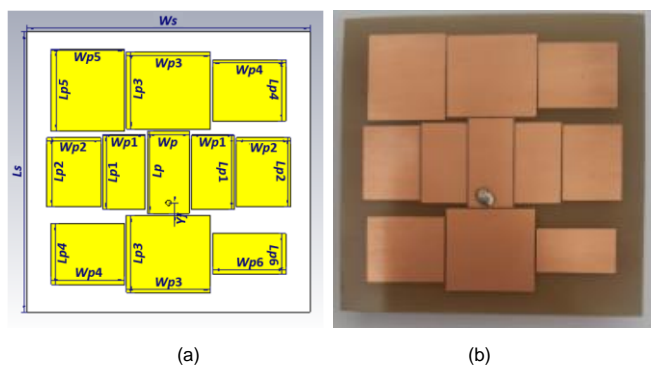
A. Desain Elemen Tunggal

Elemen tunggal didesain dengan menambahkan sepuluh *parasitic patch* yang bekerja pada frekuensi 3,5 GHz. Penggunaan teknik *parasitic patch* pada elemen tunggal dimaksudkan untuk memperlebar *bandwidth*. Penambahan *parasitic patch* [13] dilakukan dengan membuat beberapa perubahan pada *parasitic patch* terutama pada dimensi W_p dan L_p , W_{p1} dan L_{p1} , W_{p2} dan L_{p2} , W_{p3} dan L_{p3} , serta penambahan *parasitic patch* dengan dimensi W_{p4} dan L_{p4} , W_{p5} dan L_{p5} , W_{p6} dan L_{p6} , yang ditunjukkan pada Gambar 2(a). Panjang dan lebar *parasitic patch* serta penempatan *parasitic patch* secara horizontal (bidang-H) dan vertikal (bidang-E) menentukan frekuensi resonansi baru, yang dapat meningkatkan *bandwidth* [6], [12]–[15]. Letak *parasitic patch* dengan dimensi W_{p4} dan L_{p4} , W_{p5} dan L_{p5} , serta W_{p6} dan L_{p6} ditunjukkan pada Gambar 2(a). *Parasitic patch* mendapatkan arus listrik akibat induksi dari *parasitic patch* dimensi W_p dan L_p . Pada awalnya, *patch* dimensi W_p dan L_p dicatu dengan arus listrik, kemudian arus listrik yang ada di *parasitic patch* dimensi W_p dan L_p menyebabkan induksi di sisi *parasitic patch* yang meradiasi. Karena jarak *parasitic patch* yang berdekatan satu sama lain, pada *parasitic patch* di sisi yang tidak meradiasi akan timbul arus listrik akibat induksi dari *parasitic patch* di sisi yang meradiasi tersebut.

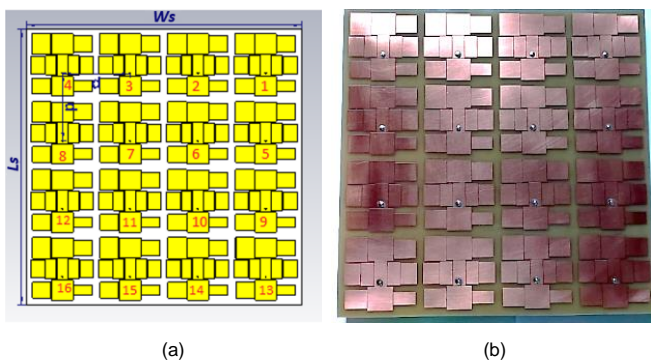
Penambahan *parasitic patch* dilakukan untuk mendapatkan dimensi dengan lebar dan panjang yang perlu dioptimasi supaya memberikan kinerja yang lebih optimal sesuai spesifikasi antena yang diharapkan. Dimensi desain elemen tunggal dengan sepuluh *parasitic patch* dihasilkan dari perhitungan matematis mengikuti (1) sampai (9) [17], [18]. Dimensi tersebut ditunjukkan pada Tabel I, sedangkan desain dalam bentuk geometri dan hasil fabrikasinya diperlihatkan pada Gambar 2. Kemudian, desain tersebut disusun menjadi *subarray* 4×4, seperti ditunjukkan pada Gambar 3.

B. Desain Subarray 4×4

Subarray 4×4, seperti tampak pada Gambar 3, terdiri atas 16 elemen. Jarak antarelemen yang bersebelahan, berdasarkan lokasi titik pencatuan masing-masing, adalah $0,75\lambda$ atau 64,28 mm. Lebar jarak antarelemen tersebut ditetapkan berdasarkan dimensi elemen yang cukup besar setelah penambahan sepuluh



Gambar 2. Elemen tunggal, (a) desain, (b) hasil fabrikasi.



Gambar 3. Subarray 4x4, (a) desain, (b) hasil fabrikasi.

parasitic patch. Di lain pihak, jarak yang cukup lebar tersebut diharapkan akan mampu menekan efek *mutual coupling*. Desain *subarray* sudah memenuhi spesifikasi antenna jika elemen *subarray* sudah mempunyai *fractional bandwidth* lebih dari 20% dan *mutual coupling* kurang dari -20 dB. Maka, dihasilkan dimensi desain *subarray* sebesar $Ws = 261,55$ mm, $Ls = 261,33$ mm. Geometri *subarray* ditunjukkan pada Gambar 3(a).

IV. HASIL DAN ANALISIS

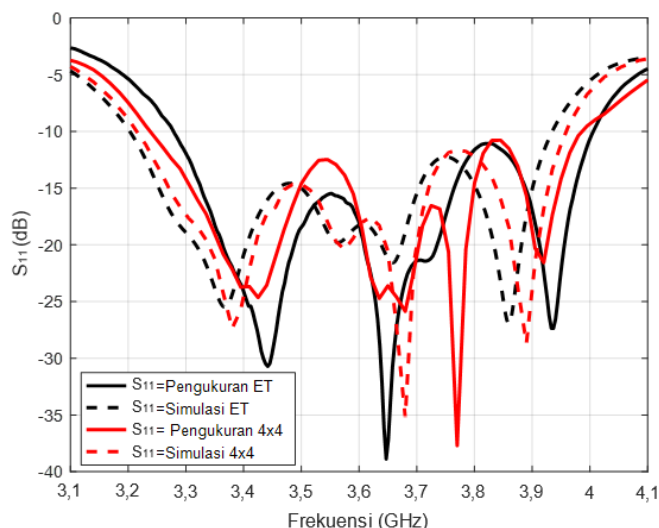
Pada bagian ini hasil simulasi dianalisis, dengan dibandingkan terhadap hasil pengukuran. Simulasi dilakukan menggunakan Computer Simulation Technology (CST), yang merupakan perangkat lunak untuk simulasi antenna; dalam hal ini, CST digunakan untuk mendesain elemen tunggal dan *subarray* 4x4. Parameter kinerja antenna yang diamati meliputi *return loss* (S_{11}), *bandwidth*, *mutual coupling* (S_{21}), SLL, dan *gain*.

A. KINERJA PARAMETER S

Hasil fabrikasi elemen tunggal ditunjukkan pada Gambar 2(b), sedangkan hasil fabrikasi *subarray* 4x4 ditunjukkan pada Gambar 3(b). Hasil simulasi dan pengukuran S_{11} dan *bandwidth* dari desain elemen tunggal dan *subarray* 4x4 pada frekuensi 3,5 GHz ditunjukkan pada Gambar 4.

Hasil simulasi elemen tunggal untuk parameter S_{11} adalah -14,99 dB, sedangkan *bandwidth* antenna dapat dihitung dari nilai S_{11} di bawah -10 dB. Diperoleh *bandwidth* sebesar 732 MHz dan *fractional bandwidth* adalah 20,52%. Sementara itu, pengukuran menghasilkan parameter S_{11} adalah -18,42 dB, *bandwidth* sebesar 722 MHz, dan *fractional bandwidth* 19,83%.

Kemudian, hasil simulasi desain *subarray* 4x4 untuk parameter S_{11} adalah -14,65 dB, dengan *bandwidth* sebesar 733 MHz dan *fractional bandwidth* sebesar 20,49%. Sebagai pembandingan, hasil pengukuran desain *subarray* 4x4 untuk parameter S_{11} adalah -14,59 dB, *bandwidth* sebesar 735 MHz, dan *fractional bandwidth* adalah 20,35%.



Gambar 4. Hasil simulasi dan hasil pengukuran *return loss* dan *bandwidth* pada elemen tunggal dan *subarray* 4x4.

Selanjutnya, Gambar 5 menunjukkan perbandingan hasil simulasi dan pengukuran parameter S_{11} dan S_{21} untuk desain *subarray* 4x4 pada frekuensi 3,5 GHz. Karena elemen-elemen pada *subarray* membentuk simetri seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5, hasil yang dilaporkan untuk mewakili *subarray* 4x4 tersebut adalah elemen ke-1, ke-2, ke-5, dan ke-6. Hasil simulasi S_{11} adalah -14,65 dB, S_{22} adalah -15,10 dB, S_{55} adalah -14,97 dB, S_{66} adalah -15,19 dB. Hasil simulasi S_{21} adalah -30,23 dB, S_{65} adalah -30,62 dB, S_{62} adalah -29,41 dB, dan S_{51} adalah -30,71 dB. Hasil pengukuran S_{21} adalah -30,05 dB, S_{65} adalah -32,81 dB, S_{62} adalah -24,76 dB, dan S_{51} adalah -24,81 dB. Pada elemen 3, 7, 9, dan 10, *mutual coupling* dengan elemen-elemen berdekatan seperti S_{67} mirip dengan S_{21} , S_{65} ; S_{610} mirip dengan S_{62} , S_{51} ; S_{23} mirip dengan S_{21} , S_{65} ; S_{59} mirip dengan S_{62} , S_{51} . Hal ini terjadi karena elemen-elemen tersebut pada *subarray* 4x4 membentuk simetri dengan elemen yang lainnya, seperti tampak pada Gambar 3(a).

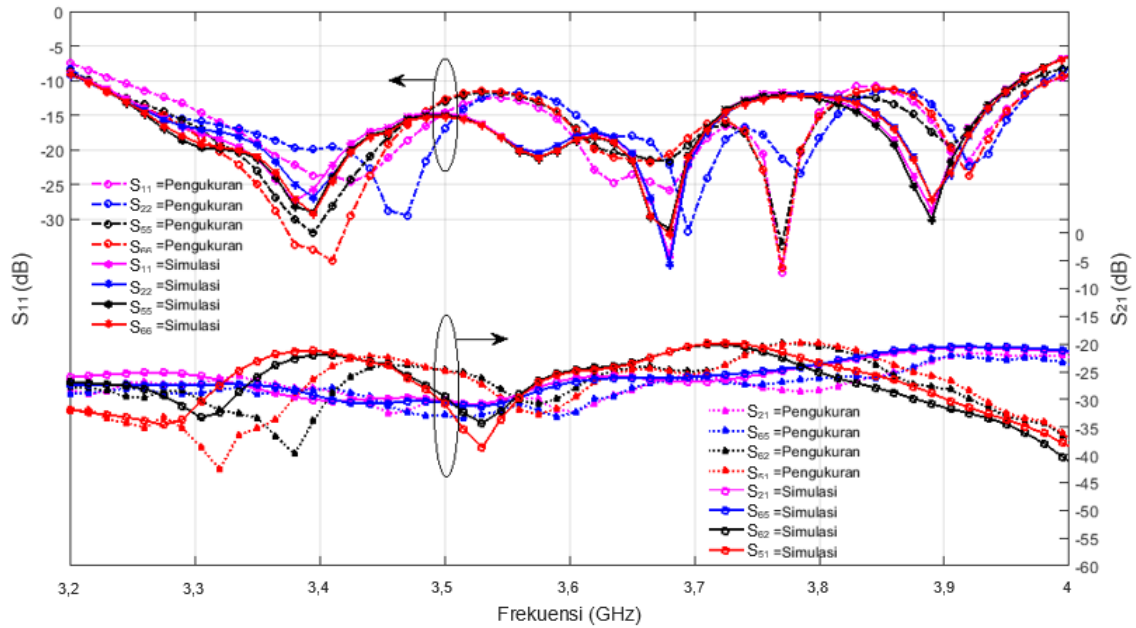
B. KINERJA POLA RADIASI

Hasil simulasi pola radiasi *far-field* 3D dan *gain* ditunjukkan pada Gambar 6(a) untuk antenna elemen tunggal dan Gambar 6(b) untuk *subarray* 4x4. Kekuatan nilai parameter *gain* ditampilkan dengan degradasi warna. Degradasi warna biru memperlihatkan *gain* rendah, kemudian degradasi warna merah memperlihatkan *gain* tertinggi. *Gain* untuk antenna elemen tunggal adalah 4,36 dB, sedangkan *gain* untuk *subarray* 4x4 adalah 16,86 dB.

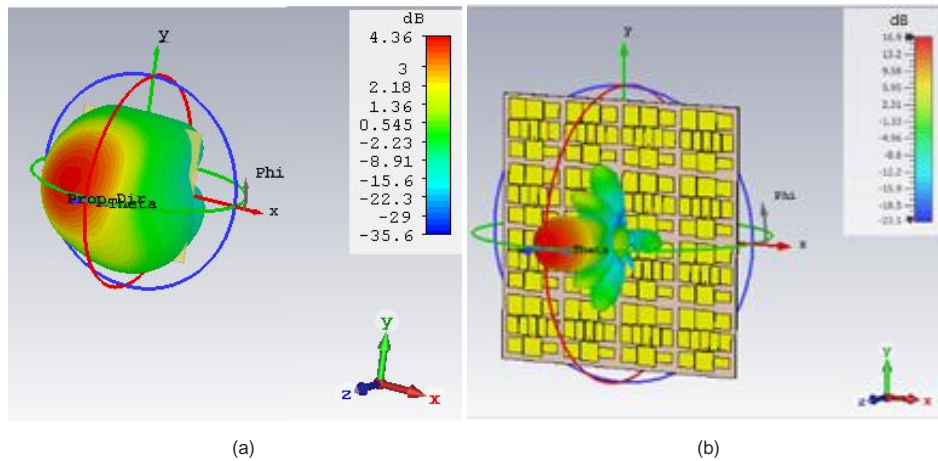
Gambar 7 menunjukkan pola radiasi elemen tunggal pada frekuensi 3,5 GHz yang bersifat *directional*. Pada bidang E dengan $\phi = 90^\circ$, *main lobe* mempunyai magnitudo sebesar 4 dB, *main lobe direction* 10° , *angular beamwidth* (3 dB) sebesar 87° , dan SLL sebesar $-9,3$ dB. Pada bidang H dengan $\phi = 0^\circ$, dihasilkan *main lobe* dengan magnitudo sebesar 4,27 dB, *main lobe direction* 14° , *angular beamwidth* (3 dB) sebesar $70,6^\circ$, dan SLL sebesar $-17,0$ dB.

Perbandingan pola radiasi elemen tunggal antara hasil simulasi dan pengukuran diperlihatkan pada Gambar 7. Simulasi memberikan *gain* sebesar 4,36 dB, lebih kecil daripada *gain* hasil pengukuran, yaitu 5,34 dB. *Gain* antenna elemen tunggal sudah melebihi spesifikasi desain antenna yang ditargetkan.

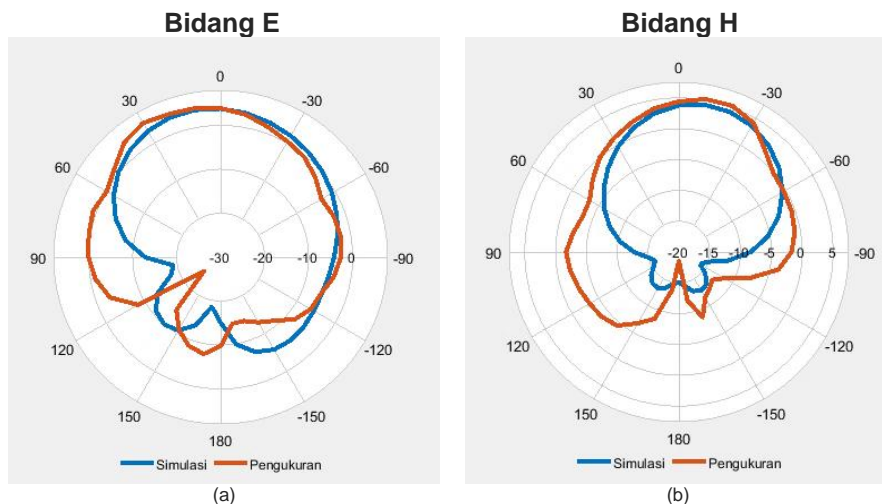
Gambar 8 menunjukkan pola radiasi *subarray* 4x4 pada bidang polar. Pola radiasi bidang E dengan $\phi = 90^\circ$ mempunyai magnitudo *main lobe* sebesar 16,9 dB, *angular*



Gambar 5. Hasil simulasi dan hasil pengukuran parameter S pada elemen tunggal dan subarray 4x4.



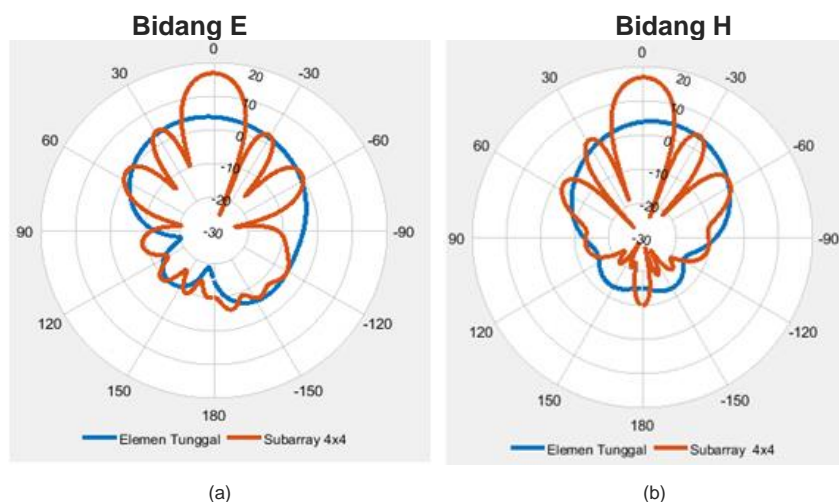
Gambar 6. Gain, (a) elemen tunggal, (b) subarray 4x4.



Gambar 7. Perbandingan hasil simulasi dan hasil pengukuran pola radiasi pada elemen tunggal, (a) bidang E, (b) bidang H.

beamwidth (3 dB) sebesar 17,2°, dan SLL sebesar -12,9 dB. Pola radiasi bidang H dengan phi = 0° menghasilkan magnitudo main lobe sebesar 16,9 dB, angular beamwidth (3 dB) sebesar 17,3°, dan SLL sebesar -12,7 dB. Perbandingan pola radiasi elemen tunggal dan subarray 4x4 hasil simulasi pada Gambar 8 menunjukkan peningkatan gain pada subarray 4x4.

Seluruh hasil simulasi dan pengukuran kinerja parameter S dan pola radiasi ditabulasi pada Tabel II. Subheader Sim dan Ukur pada Tabel II menunjukkan simulasi (Sim) dan pengukuran (Ukur). Hasil pengukuran subarray 4x4 menunjukkan bahwa bandwidth lebih lebar 13 MHz, fractional bandwidth meningkat 0,52%, dan gain lebih tinggi 12,5 dB



Gambar 8. Perbandingan hasil simulasi pola radiasi pada elemen tunggal dan subarray 4x4, (a) bidang E, (b) bidang H.

TABEL II
 KINERJA HASIL SIMULASI DAN PENGUKURAN
 ELEMEN TUNGGAL DAN SUBARRAY 4x4

Parameter Kinerja	Elemen Tunggal		Subarray 4x4	
	Sim	Ukur	Sim	Ukur
Return loss (dB)	-14,99	-18,42	-14,65	-14,59
Bandwidth (MHz)	732	722	733	735
Fractional bandwidth (%)	20,52	19,83	20,49	20,35
Mutual coupling (dB)	N/A	N/A	-30,23	-30,05
Gain (dB)	4,36	5,34	16,86	-

dibandingkan dengan elemen tunggal. Subarray 4x4 menunjukkan nilai *return loss* yang lebih kecil, tetapi masih memenuhi target spesifikasi antena. Kemudian, *mutual coupling* subarray 4x4 adalah -30,05 dB, lebih kecil dari -20 dB, sehingga sesuai dengan target yang diharapkan. Maka, tidak diperlukan metode lain untuk melakukan reduksi *mutual coupling*. Dengan demikian, elemen tunggal dan subarray 4x4 menghasilkan *bandwidth* mencapai 700 MHz atau *fractional bandwidth* meningkat hingga 20%, sehingga sudah memenuhi target spesifikasi antena yang diinginkan.

V. KESIMPULAN

Antena subarray 4x4 yang terdiri atas elemen-elemen menggunakan teknik *parasitic* untuk MIMO 5G pada frekuensi 3,5 GHz sudah didesain dan diuji, baik dengan simulasi maupun pengukuran. Setiap elemen antena mempunyai bentuk *rectangular patch* yang ditambah dengan sepuluh *parasitic patch*. Elemen-elemen tersebut selanjutnya disusun menjadi sebuah subarray 4x4. Penambahan *parasitic patch* pada tiap elemen diharapkan dapat meningkatkan *bandwidth* sekaligus memperbesar dimensi maupun jarak elemen, sehingga *mutual coupling* tidak lagi menjadi masalah. Berdasarkan hasil simulasi dan pengukuran, desain antena sudah memenuhi spesifikasi target yang diinginkan, antara lain *bandwidth* meningkat hingga 20,35%, *gain* mencapai 16,86 dB, dan *mutual coupling* adalah -30,05 dB. Jadi, semua kinerja parameter elemen tunggal meningkat setelah disusun menjadi subarray 4x4.

KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis menyatakan bahwa tidak terdapat konflik kepentingan dalam penelitian dan penulisan artikel ini.

KONTRIBUSI PENULIS

Konseptualisasi, Fitri Amillia, Eko Setijadi, dan Gamantyo Hendranto; metodologi, Fitri Amillia; penulisan—

penyusunan draf asli, Fitri Amillia, Eko Setijadi, dan Gamantyo Hendranto; penulisan—peninjauan dan penyuntingan, Eko Setijadi dan Gamantyo Hendranto; pengawasan, Eko Setijadi; *corresponding author*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Studi doctoral Fitri Amillia didanai oleh Kementerian Agama Republik Indonesia melalui Program Beasiswa Ministry of Religious Affairs (MORA) 5000 Doktor nomor 2644/DJ.I/Dt.I.III/PP.04/08/2018. Penelitian yang dilaporkan didanai oleh Kementerian Riset, Teknologi, dan Pendidikan Tinggi Republik Indonesia melalui hibah penelitian Konsorsium Riset Unggulan Perguruan Tinggi (KRUP) nomor 705/PKS/ITS/2019.

REFERENSI

- [1] D. Borges, P. Montezuma, R. Dinis, dan M. Beko, "Massive MIMO Techniques for 5G and Beyond—Opportunities and Challenges," *Electron.*, Vol. 10, No. 14, hal. 1–29, Jul. 2021, doi: 10.3390/electronics10141667.
- [2] K. Jones A.S., L. Olivia N., dan B. Syihabuddin, "Perancangan Antena MIMO 2x2 Array Rectangular Patch dengan U-Slot untuk Aplikasi 5G," *J. Nas. Tek. Elektro, Teknol. Inf.*, Vol. 6, No. 1, hal. 93-98, Feb. 2017, doi: 10.22146/jnteti.v6i1.299.
- [3] Q. Wang dkk., "5G MIMO Conformal Microstrip Antenna Design," *Wirel. Commun., Mob. Comput.*, Vol. 2017, hal. 1-11, Des. 2017, doi: 10.1155/2017/7616825.
- [4] N.L. Nguyen, "Gain Enhancement in MIMO Antennas Using Defected Ground Structure," *Prog. Electromagn. Res. M*, Vol. 87, hal. 127–136, Des. 2019, doi: 10.2528/pierm19091102.
- [5] Tim Peneliti Puslitbang SDPPI, *Studi Lanjutan 5G Indonesia 2018 Spektrum Outlook dan Use Case untuk Layanan 5G Indonesia*, E.A. Maranny, H.R. Sekar H., and A. Anggorosesar, Eds., Jakarta, Indonesia: Puslitbang Sumber Daya, Perangkat, dan Penyelenggaraan Pos dan Informatika, Badan Penelitian dan Pengembangan Sumber Daya Manusia, Kementerian Komunikasi dan Informatika, 2018.
- [6] H.H. Tran dan N. Nguyen-Trong, "Performance Enhancement of MIMO Patch Antenna Using Parasitic Elements," *IEEE Access*, Vol. 9, hal. 30011–30016, Feb. 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3058340.
- [7] W.L. Stutzman dan G.A. Thiele, *Antenna Theory and Design*, 3rd ed., Charleston, AS: John Wiley & Sons, Inc., 2012.
- [8] Y. Wen dkk., "Bandwidth Enhancement of Low-Profile Microstrip Antenna for MIMO Applications," *IEEE Trans. Antennas, Propag.*, Vol. 66, No. 3, hal. 1064–1075, Mar. 2018, doi: 10.1109/TAP.2017.2787542.
- [9] M. H. Reddy, R. M. Joany, M. J. Reddy, M. Sugadev, dan E. Logashanmugam, "Bandwidth Enhancement of Microstrip Patch Antenna Using Parasitic Patch," *2017 IEEE Int. Conf. Smart Technol., Manage. Comput. Commun. Controls Energy, Mater. (ICSTM)*, 2017, hal. 295–298, doi: 10.1109/ICSTM.2017.8089172.
- [10] X.-P. Chen, N.-W. Liu, dan G. Fu, "A Compact Wideband Microstrip-Fed Patch Antenna Using a U-Shaped Parasitic Element," *2019 IEEE Int.*

- Conf. Comput. Electromagn. (ICCEM)*, 2019, hal. 1–3, doi: 10.1109/COMPEN.2019.8779079.
- [11] K.D. Xu, J. Zhu, S. Liao, dan Q. Xue, "Wideband Patch Antenna Using Multiple Parasitic Patches and Its Array Application with Mutual Coupling Reduction," *IEEE Access*, Vol. 6, hal. 42497–42506, Jul. 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2860594.
- [12] A.R. Pratiwi, E. Setijadi, dan G. Hendratoro, "Design of Two-Elements Subarray with Parasitic Patch for 5G Application," *2020 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA)*, 2020, hal. 311–316, doi: 10.1109/ISITIA49792.2020.9163785.
- [13] S.A.R. Parizi, "Bandwidth Enhancement Techniques," dalam *Microstrip Antennas Trends in Research on Antennas*, S. Chattopadhyay, Ed. London, Inggris: IntechOpen, 2017, doi: 10.5772/intechopen.70173, access date: 20-Sep-2022.
- [14] K. Ding, C. Gao, B. Zhang, Y. Wu, dan D. Qu, "A Compact Printed Unidirectional Broadband Antenna with Parasitic Patch," *IEEE Antennas, Wirel. Propag. Lett.*, Vol. 16, hal. 2341–2344, Jun. 2017, doi: 10.1109/LAWP.2017.2718000.
- [15] K.D. Xu, H. Xu, Y. Liu, J. Li, dan Q.H. Liu, "Microstrip Patch Antennas with Multiple Parasitic Patches and Shorting Vias for Bandwidth Enhancement," *IEEE Access*, Vol. 6, hal. 11624–11633, Jan. 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2794962.
- [16] (2018) "ETSI Deliverable Status," [Online], <https://portal.etsi.org/TB/ETSI-Deliverable-Status>, tanggal akses: 28-Okt-2022.
- [17] S.K. Jose dan S. Suganthi, "Rectangular Microstrip Antenna for WLAN Application," *2015 Int. Conf. Innov. Inf. Embed., Commun. Syst. (ICIIECS)*, 2015, hal. 1–5, doi: 10.1109/ICIIECS.2015.7192986.
- [18] C.A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 4th ed., Hoboken, AS: John Wiley & Sons, Inc., 2016.
- [19] S.T. Thilagam J. dan G. Babu T.R., "Rectangular Microstrip Patch Antenna at ISM Band," *2018 Second Int. Conf. Comput. Methodol., Commun. (ICCMC)*, 2018, hal. 91–95, doi: 10.1109/ICCMC.2018.8487877.
- [20] A. Majumder, "Rectangular Microstrip Patch Antenna Using Coaxial Probe Feeding Technique to Operate in S-Band," *Int. J. Eng. Trends, Technol.*, Vol. 4, No. 4, hal. 1206–1210, Apr. 2013.
- [21] G. Kumar dan K.P. Ray, *Broadband Microstrip Antenna*. Norwood, AS: Artech House. Inc, 2003.