

**PENGEMBANGAN ANTENA MIKROSTRIP *ARRAY* MENGGUNAKAN
METASURFACE UNTUK APLIKASI 5G**

TESIS

Untuk Memenuhi Sebagai Persyaratan Mencapai Derajat Magister
Program Studi Fisika



Oleh:
FAUZAN AL HAQQI
NIM. 22229004

**PROGRAM STUDI FISIKA
PROGRAM MAGISTER
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS NEGERI PADANG
2024**

PERSETUJUAN AKHIR TESIS

Nama Mahasiswa : Fauzan Al Haqqi

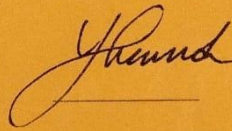
NIM : 22229004

Nama

Tanda Tangan

Tanggal

Prof. Yohandri, M.Si, Ph.D.
Pembimbing



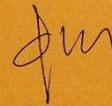
5 November 2024

Dekan FMIPA,
Universitas Negeri Padang



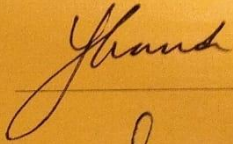
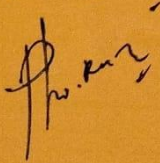
Prof. Dr. Yulkifli, S.Pd, M.Si
NIP. 19730702 200312 1 002

Koordinator Program Studi



Syafriani, M.Si, Ph.D
NIP. 19740305 1998022001

PERSETUJUAN KOMISI
UJIAN TESIS MAGISTER FISIKA

No	Nama	Tandan Tangan
1.	Prof. Yohandri, M.Si, Ph.D (Ketua)	
2.	Prof. Dr. Yulkifli, S.Pd, M.Si (Sekretaris)	
3.	Prof. Pakhrur Razi, S.Pd, M.Si, Ph.D (Anggota)	

Mahasiswa

Nama : Fauzan Al Haqqi

NIM : 22229004

Tanggal Ujian : 5 November 2024

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Dengan ini menyatakan bahwa tesis saya yang berjudul:

PENGEMBANGAN ANTENA MIKROSTRIP *ARRAY* MENGGUNAKAN *METASURFACE* UNTUK APLIKASI 5G

Tidak pernah diajukan untuk memperoleh gelar kemagisteran di suatu perguruan tinggi lain dan tidak terdapat keseluruhan atau sebagian tulisan orang lain yang saya akui seolah-olah sebagai tulisan saya sendiri tanpa memberikan pengakuan pada penulis aslinya. Apabila di kemudian hari saya terbukti melakukan tindakan menyalin atau meniru tulisan orang lain seolah-olah hasil pemikiran saya sendiri, gelar dan ijazah yang telah diberikan oleh universitas batal saya terima.

Padang, 14 Januari 2025
Yang memberi pernyataan



Fauzan Al Haqqi

ABSTRAK

Fauzan Al Haqqi. 2024. "Pengembangan Antena Mikrostrip Array Menggunakan Metasurface Untuk Aplikasi 5G". Tesis. Program Studi Magister Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Padang.

Bandwidth yang terbatas dan kapasitas saluran yang terbatas pada sistem nirkabel mendorong untuk melakukan inovasi pada desain antena untuk mendapatkan karakteristik yang diinginkan. Antena merupakan bagian penting dalam teknologi 5G dan sangat menentukan kualitas data yang ditransmisikan maupun yang diterima. Desain antena konvensional memiliki keterbatasan pada *bandwidth* yang sempit dan *gain* yang rendah. Oleh karena itu, pengembangan antena sangat urgen dalam pemenuhan antena sesuai dengan spesifikasi pada teknologi 5G. Beberapa penelitian telah berhasil mengembangkan antena untuk aplikasi 5G. Namun, antena yang dihasilkan masih memiliki keterbatasan seperti *bandwidth* yang sempit sehingga kinerjanya menjadi terbatas. Penelitian ini bertujuan untuk menghasilkan antena mikrostrip dengan *return loss* lebar (*broadband*) dan *gain* yang tinggi.

Pada Penelitian ini diusulkan antena mikrostrip array menggunakan metasurface untuk aplikasi 5G. Frekuensi kerja antena yang diusulkan adalah 3,5 GHz. Antena dibuat dengan menggunakan dua substrat yang ditumpuk dengan konstanta dielektri 2,17 dan ketebalan setiap substrat 1,6 mm. Penambahan *metasurface* digunakan untuk meningkatkan *impedance bandwidth* antena.

Hasil simulasi antena *array* menunjukkan antena bekerja pada frekuensi 3,24 GHz hingga 3,68 GHz. Nilai VSWR dan *gain* antena adalah 1,42 dan 13,46 dBi pada frekuensi 3,5 GHz. Setelah didapatkan hasil simulasi yang optimum, antena difabrikasi dan dikarakterisasi. Hasil pengukuran $S_{11} \leq -10$ dB menunjukkan antena memiliki *bandwidth* 370 MHz dengan rentang frekuensi 3,26 GHz – 3,63 GHz. Nilai VSWR pengukuran lebih kecil dibandingkan dengan simulasi yaitu 1,37 pada frekuensi 3,5 GHz. *Gain* yang dihasilkan pada frekuensi 3,5 GHz adalah 13,6 dBi. Hasil pengukuran menunjukkan *gain* antena lebih besar 0,14 dBi dibandingkan dengan hasil simulasi. Berdasarkan hasil penelitian, antena mikrostrip *array* menggunakan *metasurface* dapat digunakan untuk aplikasi 5G.

Kata kunci: antena mikrostrip, *metasurface*, *array*, *broadband*, 5G.

ABSTRACT

Fauzan Al Haqqi. 2024. "Development of Microstrip Array Antenna Using Metasurface for 5G Applications". Thesis. Graduate Program of Physics, Faculty of Mathematics and Natural Science, Universitas Negeri Padang.

The limited bandwidth and limited channel capacity of wireless systems encourage innovation in antenna design to obtain the desired characteristics. Antennas are an important part of 5G technology and determine the quality of transmitted and received data. Conventional antenna designs have limitations in narrow bandwidth and low gain. Therefore, antenna development is very urgent in fulfilling antennas according to specifications in 5G technology. Several studies have successfully developed antennas for 5G applications. However, the resulting antennas still have limitations such as narrow bandwidth so that their performance is limited. This research aims to produce a microstrip antenna with wide return loss and high gain.

In this research, a microstrip antenna array using metasurface is proposed for 5G applications. The working frequency of the proposed antenna is 3.5 GHz. The antenna is fabricated using two stacked substrates with a dielectric constant of 2.17 and a thickness of each substrate of 1.6 mm. The addition of a metasurface is used to increase the impedance bandwidth of the antenna.

The simulation results of the antenna array show that the antenna works at frequencies from 3.24 GHz to 3.68 GHz. The VSWR and gain values of the antenna are 1.42 and 13.46 dBi at 3.5 GHz. After obtaining the optimum simulation results, the antenna was fabricated and characterized. The measurement results of $S_{11} \leq -10$ dB show that the antenna has a bandwidth of 370 MHz with a frequency range of 3.26 GHz - 3.63 GHz. The measurement VSWR value is smaller than the simulation which is 1.37 at a frequency of 3.5 GHz. The resulting gain at a frequency of 3.5 GHz is 13.6 dBi. The measurement results show that the antenna gain is 0.14 dBi greater than the simulation results. From the research results, the microstrip array antenna using metasurface can be used for 5G applications.

Keywords: microstrip antenna, metasurface, array, broadband, 5G.

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur kehadirat Allah SWT, karena atas segala rahmat, nikmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis ini. Shalawat serta salam senantiasa kita curahkan kepada Nabi Muhammad SAW. Judul dari penelitian ini adalah **“Pengembangan Antena Mikrostrip Array menggunakan *Metasurface* untuk Aplikasi 5G”** disusun sebagai syarat untuk memperoleh gelar Magister Sains pada Program Studi Magister Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan, Alam, Universitas Negeri Padang.

Penelitian ini diselesaikan atas bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Bapak Prof. Yohandri, M.Si, Ph.D. sebagai pembimbing tesis, atas segala bantuannya yang tulus dan ikhlas memberikan motivasi, bimbingan, arahan dan saran dalam penyelesaian tesis ini.
2. Bapak Dr. Yulkifli, S.Pd, M.Si. dan Bapak Prof. Pakhrur Razi, S.Pd, M.Si. sebagai dosen penguji tesis yang telah meluangkan waktu untuk memberikan masukan, kritikan dan pandangan kepada peneliti untuk menyempurnakan tesis ini.
3. Ibu Syafriani, M.Si, Ph.D. sebagai Koordinator Program Studi Magister Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Padang.
4. Bapak dan Ibu Dosen Departemen Fisika FMIPA UNP.
5. Staf administrasi dan Laboran di Laboratorium Fisika FMIPA UNP.

6. Keluarga tercinta serta seluruh orang tersayang yang telah memberikan motivasi, bantuan material, non material, serta kasih sayang dan dukungan kepada peneliti.
7. Rekan-rekan dan semua pihak yang telah ikut membantu baik secara langsung maupun tidak langsung.

Dalam penyusunan tesis ini, peneliti menyadari bahwa masih banyak kekurangan dalam penyusunan tesis ini. Oleh karena itu, diharapkan adanya kritikan dan saran dari pembaca untuk menyempurnakan tesis ini. Sehingga, tesis ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca sebagai referensi serta sebagai sarana untuk menambah ilmu pengetahuan dan informasi.

Padang, Agustus 2024

Penulis

DAFTAR ISI

ABSTRAK	ii
ABSTRACT	vi
KATA PENGANTAR.....	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xii
BAB I PENDAHULUAN	13
A. Latar Belakang.....	13
B. Identifikasi Masalah	17
C. Perumusan Masalah.....	17
D. Batasan Masalah	17
E. Tujuan Penelitian	18
F. Manfaat Penelitian.....	18
BAB II KAJIAN PUSTAKA	19
A. Kajian Teori	19
B. Penelitian yang Relevan	40
C. Kerangka Konseptual.....	41
BAB III METODE PENELITIAN.....	43
A. Jenis Penelitian	43
B. Prosedur Penelitian	43
C. Subjek Penelitian	46
D. Variabel Penelitian.....	47
E. Instrumen	47
F. Teknik Pengumpulan Data.....	48
G. Teknik Analisis Data.....	48
H. Jadwal Penelitian	49
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	50
A. Hasil Penelitian.....	50
B. Pembahasan	64
BAB V PENUTUP.....	70
A. Kesimpulan.....	70
B. Saran	71
DAFTAR PUSTAKA	72
LAMPIRAN	78

DAFTAR GAMBAR

2.1. Alokasi spektrum frekuensi yang direncanakan untuk 5G	20
2.2. Spektrum 5G yang diusulkan	21
2.3. Antena mikrostrip	22
2.4. Beragam bentuk <i>patch</i>	23
2.5. Macam-macam polarisasi	27
2.6. Pengaturan umpan untuk susunan <i>patch</i> mikrostrip.	31
2.7. (a) Jalur transformator impedansi meruncing dan (b) $\lambda/4$ transformator untuk mencocokkan <i>patch</i> 100 ohm ke jalur 50 ohm	32
2.8. <i>Array</i> antena <i>patch</i> mikrostrip persegi panjang 10×10 dengan frekuensi kerja 2-2,3 GHz untuk komunikasi antariksa ke antariksa	33
2.9. Struktur antena <i>metasurface</i>	35
2.10. Rambatan gelombang permukaan pada antena berbasis <i>metasurface</i>	38
2.11. Ringkasan antena <i>metasurface</i> terpilih menggunakan <i>characteristic mode analysis</i>	39
2.12. Diagram alir perancangan dan pembuatan <i>array</i> antena mikrostrip	41
4.1. Desain antena tunggal dengan <i>metasurface</i>	50
4.2. Perbandingan antena tunggal dengan <i>metasurface</i> dan tanpa <i>metasurface</i>	52
4. 3. Hasil simulasi dengan variasi ukuran <i>major axis metasurface</i>	53
4.4. Hasil simulasi dengan variasi ukuran <i>patch</i>	54
4.5. Hasil simulasi dengan variasi ukuran sudut terpotong.....	54
4. 6. Konfigurasi desain antena <i>array</i> 2×2	55
4. 7. Karakteristik antena <i>array</i> 2×2 dengan pemisahan <i>patch</i> (<i>dx</i>)	57
4.8. Karakteristik antena <i>array</i> 2×2 dengan pemisahan <i>patch</i> (<i>dy</i>)..	58
4. 9. Perbandingan antena tunggal dan <i>array</i>	59
4. 10. Perbandingan antena <i>array</i> dengan <i>metasurface</i> dan tanpa <i>metasurface</i>	61
4.11. Fabrikasi antena <i>array</i> 2×2 dengan <i>metasurface</i>	62
4.12. Perbandingan hasil simulasi dan pengukuran.	63

DAFTAR TABEL

2.1. Perbandingan penelitian yang relevan	40
3.1. Spesifikasi parameter antenna	44
3.2. Kesenjangan antara hasil simulasi dan pengukuran parameter antenna	49
4.1. Dimensi antenna tunggal.....	51
4. 2. Demensi antenna <i>array</i> 2×2.....	56
4.3. Perbandingan hasil simulasi dan pengukuran	64
4.4. Perbandingan antenna pada frekuensi <i>mid-band</i> untuk aplikasi 5G	68

DAFTAR LAMPIRAN

1. Perhitungan dimensi antena	78
2. Pembuatan desain antena dan simulasi pada <i>software CST Studio Suite</i> ...	80
3. Dokumentasi fabrikasi dan pengukuran antenna	83
4. Data Hasil simulasi antena yang telah dioptimasi.....	85
5. Data Hasil Pengukuran.....	95

BAB I PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Jaringan nirkabel generasi keempat (4G) telah mendapatkan popularitas selama satu dekade terakhir sebagai teknologi komunikasi yang dapat diandalkan (Pei, 2019). Banyak aplikasi yang didukung oleh *long term evolution* (LTE) dan *wireless fidelity* (WiFi). Akan tetapi, dengan kebutuhan kinerja yang lebih menuntut dalam hal reliabilitas, latensi dan *throughput*, maka dibutuhkan teknologi yang dapat mengatasi hal tersebut (Andreoli, 2017; Ray 2023; Clancy, 2023). *Fifth Generation* (5G) hadir untuk mengatasi persoalan tersebut.

Fifth Generation adalah generasi kelima dari sistem komunikasi nirkabel. Teknologi 5G diprediksikan memiliki kecepatan data hingga 20 Gbps (Shehab, 2021). Teknologi 5G menghadirkan konektivitas *broadband*, *low latency* yang ekstrim serta jaringan masif untuk manusia dan *Internet of Things* (IoT). *International Telecommunication Union* (ITU) mendefinisikan tiga skenario penggunaan diantaranya yaitu *enhanced Mobile Broadband* (eMBB), *ultra-Reliable and Low Latency Communications* (uRLLC) dan *massive Machine Type Communicatios* (mMTC). eMBB menyediakan kapasitas tinggi dan kecepatan tinggi. uRLLC dirancang untuk mengurangi latensi. mMTC menyediakan layanan hemat energi dengan biaya rendah (Khan, 2022).

Setiap karakteristik layanan pada teknologi 5G memiliki spektrum frekuensi yang berbeda-beda. Spektrum frekuensi yang digunakan untuk teknologi 5G yaitu *low-band*, *mid-band* dan gelombang milimeter (Ahmed, 2019; Huawei, 2020). *Low-band* menggunakan frekuensi di bawah 1 GHz. Frekuensi yang digunakan pada *mid-band* antara 1 GHz hingga 6 GHz. Pada gelombang

milimeter, frekuensi yang digunakan yaitu 6 GHz hingga 100 GHz (Awangga, 2018). Spektrum frekuensi 5G yang diusulkan di Eropa adalah 3,4-3,8 GHz pada mid-band dan 24,25-27,5 GHz pada gelombang milimeter. China, Korea Selatan dan Jepang mengusulkan spektrum frekuensi 5G secara berurutan adalah 3,3-3,6 GHz, 3,42-3,7 GHz dan 3,6-4,2 GHz. Sedangkan di Asia Tenggara mengusulkan spektrum frekuensi 5G pada frekuensi tengah yaitu 3,5 GHz (Qualcomm, 2019; Ali, 2022). Berdasarkan persyaratan untuk teknologi 5G, antenna harus memiliki bobot yang ringan, profil rendah, produksi massal berbiaya rendah, kemudahan pemasangan, konformal terhadap permukaan planar dan juga permukaan non-planar, kuat secara mekanis ketika dipasang pada permukaan yang kaku dan kompatibel dengan sirkuit terpadu monolitik (Shereen, 2022). Selain itu, antenna harus memiliki *bandwidth* yang lebar, *gain* dan efisiensi yang tinggi. Antena mikrostrip berpotensi menjadi kandidat yang lebih baik karena berbagai keuntungan yang ditawarkan.

Antena mikrostrip merupakan antenna yang terdiri dari elemen radiasi yang sangat tipis yang diletakkan dibagian *ground*. Antena mikrostrip terdiri dari beberapa bagian diantaranya *patch*, substrat, *ground* dan *feeding* (Balanis, 2016). Antena mikrostrip memiliki berbagai keuntungan seperti biaya rendah, ringan, *low profile*, mudah difabrikasi dan mudah diintegrasikan dengan perangkat elektronik lainnya. Antena mikrostrip mampu bekerja pada frekuensi tinggi (Shereen, 2022). Performansi antenna mikrostrip dapat dilihat dari beberapa parameter diantaranya seperti S-parameter (S_{11}), VSWR (*Voltage Standing Wave Ratio*), impedansi masukan, *gain*, pola radiasi dan polarisasi. Antena mikrostrip memiliki keterbatasan pada *bandwidth* yang sempit (An, 2018). Pada antenna

mikrostrip dengan *patch* konvensional memiliki keterbatasan dalam *bandwidth* S_{11} , efisiensi radiasi dan *gain* (Anab, 2020)

Berbagai desain antenna mikrostrip telah banyak dikembangkan untuk aplikasi 5G agar memiliki kinerja yang lebih baik. Pada tahun 2020, Ming Yang melakukan penelitian tentang antenna untuk aplikasi 5G. Antenna yang dibuat masih memiliki *gain* sebesar 1,1-3,9 dBi pada frekuensi kerja. Efisiensi antenna yaitu 42% hingga 65%. Pada penelitian yang dilakukan oleh Jiang tahun 2019, antenna yang di desain yaitu delapan elemen MIMO (*multi input multi output*) array. Bandiwidth S_{11} dan *gain* yang dihasilkan masing-masing adalah 300 MHz dan < 4,3 dB. Efisiensi antenna yang dihasilkan yaitu 40% hingga 60% pada frekuensi kerja. Pada tahun 2019, Thummaluru mendesain antenna MIMO dengan empat port yang menghasilkan *bandwidth* S_{11} sebesar 1,7 GHz. Namun, desain antenna ini masih menghasilkan nilai yang rendah yaitu 1 dB hingga 3 dB. Pada tahun 2022, Cheng melakukan penelitian tentang antenna mikrostrip MIMO. Antenna yang didesain bekerja pada frekuensi 4,4-5,04 GHz. *Gain* yang dihasilkan pada frekuensi kerja 3,05-7,16 dBi. Penelitian yang dilakukan oleh Kumar tahun 2023, desain antenna MIMO dengan enam *port* bekerja pada frekuensi 3,92 GHz hingga 5,2 GHz. Efisiensi dan *gain* yang dihasilkan adalah 86% dan 6,45 dB. Berdasarkan studi literatur, penelitian yang telah dilakukan masih memiliki keterbatasan seperti *bandwidth* yang sempit, *gain* dan efisiensi yang rendah. Untuk itu, diperlukan teknik untuk mengatasi kekurangan tersebut. Teknik yang dapat digunakan untuk meningkatkan *bandwidth*, *gain* dan efisiensi diantaranya adalah dengan menggunakan *metasurface*, teknik *array* dan *frequency selective surface* (Anab, 2020).

Metasurface adalah struktur dua dimensi yang diterapkan untuk meningkatkan kinerja antenna. Desain antenna mikrostrip menggunakan *metasurface* telah banyak dikembangkan. Pada tahun 2020, Hussain mendesain antenna *metasurface* yang menghasilkan *bandwidth* S_{11} dan rasio aksial adalah 23,4% (24,5-31 GHz) dan 16.8 % (25-29.6 GHz). Efisiensi dan *gain* yang dihasilkan adalah >95% dan 11 dBic. Penelitian yang dilakukan oleh Liu tahun 2021, desain antenna dengan metasurface dapat menghasilkan *bandwidth* S_{11} 64,2% (5,24-10,1 GHz). Pada tahun 2022, Bhaskar mendesain *metasurface* persegi 4×4. Antenna menghasilkan *bandwidth* S_{11} dan rasio aksial masing-masing adalah 38,32% (4,05-5,97 GHz) dan 21% (4,07-5,02 GHz). *Gain* yang dihasilkan dari rentang 2 dBic hingga 3,5 dBic. Untuk meningkatkan *gain* yang dihasilkan antenna, maka antenna didesain dengan metode *array*.

Antenna *array* adalah antenna sejenis yang disusun dalam konfigurasi tertentu. Metode *array* digunakan untuk memperbesar *gain* antenna. Pada tahun 2022, Kiani mendesain antenna *array* yang bekerja pada frekuensi 26 GHz hingga 40 GHz. Efisiensi dan *gain* yang dihasilkan adalah 92% dan 10,1 dBi pada frekuensi 28 GHz. Penelitian yang dilakukan oleh Ullah tahun 2022 mendesain antenna *array* 1×8 yang menghasilkan frekuensi kerja dari 20 GHz hingga 65 GHz. *Gain* yang dihasilkan pada frekuensi kerja adalah 9,5 dB hingga 15 dB. Berdasarkan studi literatur, antenna *array* merupakan metode yang baik untuk meningkatkan *gain* antenna.

Dalam penelitian ini, *array* dan *metasurface* di desain untuk meningkatkan performa dari parameter antenna seperti S_{11} , VSWR, efisiensi dan *gain*. Antenna mikrostrip yang dirancang bekerja pada frekuensi mid-band. Frekuensi tengah

yang diusulkan dalam penelitian ini adalah 3,5 GHz. Antena mikrostrip di desain menggunakan *software CST Studio Suite*. Berdasarkan uraian di atas, penelitian ini yaitu merancang dan membuat antena mikrostrip *array* dengan menggunakan *metasurface* untuk aplikasi 5G.

B. Identifikasi Masalah

Berdasarkan uraian yang telah dikemukakan pada latar belakang, maka dapat diidentifikasi masalahnya yaitu:

1. *Bandwidth S-parameter (return loss)* antena yang masih sempit.
2. *Gain* yang dihasilkan antena masih rendah.
3. Efisiensi antena masih rendah.

C. Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dikemukakan, maka dapat dirumuskan rumusan masalahnya seperti berikut:

1. Bagaimana pengaruh *metasurface* dan dimensi *patch* terhadap parameter antena?
2. Bagaimana pengaruh *array* terhadap parameter antena?
3. Bagaimana karakteristik antena dari hasil simulasi dan pengukuran?

D. Batasan Masalah

Agar penelitian ini lebih terfokus, maka diperlukan beberapa batasan masalah sebagai berikut:

1. Menggunakan *software CST studio suite* untuk desain dan simulasi antena.
2. Karakteristik antena ditentukan oleh parameter antena diantaranya S_{11} , VSWR, impedansi masukan dan *gain*.
3. Antena bekerja pada frekuensi 3,5 GHz.

E. Tujuan Penelitian

Tujuan dilakukan penelitian adalah:

1. Menyelidiki pengaruh *metasurface* dan dimensi *patch* terhadap parameter antena.
2. Menyelidiki pengaruh *array* terhadap parameter antena.
3. Menyelidiki karakteristik antena dari hasil simulasi dan pengukuran.

F. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah:

1. Bagi peneliti, sebagai syarat untuk menyelesaikan Program Magister Fisika dan pengembangan diri dalam bidang kajian Fisika.
2. Kelompok kajian elektronika dan instrumentasi, dapat memberikan ilmu pengetahuan dalam pengembangan antena menggunakan *metasurface* untuk aplikasi 5G.
3. Peneliti, Sebagai referensi dalam pengembangan penelitian yang berkaitan dengan antena mikrostrip dan *metasurface*.
4. Pembaca, dapat menambah pengetahuan dan wawasan dalam bidang kajian antena.

BAB V PENUTUP

A. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Penambahan *metasurface* pada bagian atas *patch* mempengaruhi nilai *return loss* dan *gain* antena. Antena memiliki *return loss* dan *gain* yang baik dengan menerapkan *metasurface*. Penambahan *metasurface* menggeser frekuensi kerja dan memperluas lebar frekuensi resonansi. *Gain* yang dihasilkan dengan menambahkan *metasurface* juga lebih besar dibandingkan tanpa *metasurface*. Disamping itu, perubahan dimensi *patch* antena ke ukuran *patch* yang lebih besar mengakibatkan frekuensi kerja antena bergeser ke arah frekuensi yang lebih kecil.
2. Desain antena dengan konfigurasi *array* 2×2 mampu meningkatkan nilai *gain* menjadi 13,46 dBi dalam simulasi. Jarak antara elemen *patch* juga mempengaruhi parameter antena. Semakin besar jarak elemen *patch* pada sumbu y, maka frekuensi kerja bergeser ke arah frekuensi yang lebih rendah.
3. Berdasarkan hasil simulasi dan pengukuran, *return loss bandwidth* yang dihasilkan antena *array* adalah 440 MHz (3,24 GHz – 3,68 GHz) dan 370 MHz (3,26 GHz – 3,63 GHz). Hasil simulasi dan pengukuran dari nilai VSWR pada frekuensi 3,5 GHz adalah 1,42 dan 1,37. *Gain* yang dihasilkan dari simulasi dan pengukuran adalah 13,46 dBi dan 13,6 dBi pada frekuensi 3,5 GHz. Antena *array* memiliki polarisasi linier. Meskipun terdapat perbedaan antara simulasi dan pengukuran, antena masih sesuai dengan spesifikasi yang ditetapkan.

B. Saran

Berdasarkan penelitian yang dilakukan, maka disarankan untuk penelitian selanjutnya yaitu:

1. Dari hasil penelitian, antena *array* memiliki polariasi linier. Disarankan untuk mendesain antena dengan polarisasi melingkar karena memiliki banyak keuntungan seperti terhindar dari efek *Faraday*, ketidakpekaan terhadap posisi polarisasi dan kemampuan anti-interferensi yang kuat.
2. Melakukan fabrikasi dengan lebih teliti agar frekuensi kerja tidak bergeser terlalu jauh dari hasil simulasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmed, A. M., Hasan, S. A., & Majeed, S. A. (2019). 5G mobile systems challenges and technologies: A survey. *J. Theor. Appl. Inf. Technol.*, 97(11), 3214-3226.
- Alam, S., & Nugroho, R. F. (2018). Perancangan Antena Mikrostrip Array 2x1 untuk Meningkatkan Gain Untuk Aplikasi LTE Pada Frekuensi 2300 MHz. *Elektrokrisna*, 6(3).
- Alaydrus, M. (2011). Antena Prinsip dan Aplikasi. *Graha Ilmu. Yogyakarta. Cetakan pertama*.
- Ali, S. A., Wajid, M., Kumar, A., & Alam, M. S. (2022). Design challenges and possible solutions for 5G SIW MIMO and phased array antennas: A review. *IEEE Access*, 10, 88567-88594.
- Anab, M., Khattak, M. I., Owais, S. M., Ali Khattak, A., & Sultan, A. (2020). Design and Analysis of Millimeter Wave Dielectric Resonator Antenna for 5G Wireless Communication Systems. *Progress In Electromagnetics Research*, 98, 239-255.
- Andreoli-Fang, J., & Chapman, J. T. (2017, December). Latency reduction for mobile backhaul by pipelining LTE and DOCSIS. In *GLOBECOM 2017-2017 IEEE Global Communications Conference* (pp. 1-6). IEEE.
- An, W., Li, S., Sun, W., & Li, Y. (2019). Low-Profile Wideband Microstrip Antenna Based on Multiple Modes With Partial Apertures. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 18(7), 1372-1376.
- Asadchy, V. S., Albooyeh, M., Tsvetkova, S. N., Díaz-Rubio, A., Ra'di, Y., & Tretyakov, S. A. (2016). Perfect control of reflection and refraction using spatially dispersive metasurfaces. *Physical Review B*, 94(7), 075142.
- Awangga F S A, Riva'atul A.W, Ariyanti S, Kusumawati D, Erisvha K.P dan Aziz A. 2018. *Studi Lanjutan 5G Indonesia 2018 Spektrum Outlook dan Use Case untuk Lanjutan 5G*. Jakarta. Pustlibang Sumber Daya, Perangkat dan Penyelenggaraan Pos dan Informatika.
- Baharuddin, M. Z. (2016). Study on circularly polarized synthetic aperture radar: Patch array antennas and scattering experiments in an anechoic chamber (Doctoral dissertation, 千葉大学= Chiba University).

- Balanis, C. A. (2012). *Advanced engineering electromagnetics*. John Wiley & Sons.
- Balanis, C. A. (2016). *Antenna theory: analysis and design*. John Wiley & sons.
- Bhaskar, V. S., & Tan, E. L. (2021). Same-sense circularly polarized grid-slotted patch antenna with wide axial ratio bandwidth. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 70(2), 1494-1498.
- Cai, Q., Li, Y., Zhang, X., & Shen, W. (2019). Wideband MIMO antenna array covering 3.3–7.1 GHz for 5G metal-rimmed smartphone applications. *IEEE Access*, 7, 142070-142084.
- Chaimool, S., Rakluea, C., & Akkaraekthalin, P. (2011, December). Low-profile unidirectional microstrip-fed slot antenna using metasurface. In *2011 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communications Systems (ISPACS)* (pp. 1-5). IEEE.
- Chen, Z. N., Qing, X., Shi, J., Khan, G. C., Sun, M., Lau, P. Y., & Liu, W. (2014). *Metamaterials-based antennas: from concepts to technology*.
- Chen, Z., Liu, Y., Yuan, T., & Wong, H. (2023). A Miniaturized MIMO Antenna With Dual-Band for 5G Smartphone Application. *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*, 4, 111-117.
- Cheng, B., & Du, Z. (2022). A wideband low-profile microstrip MIMO antenna for 5G mobile phones. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 70(2), 1476-1481.
- Clancy, J., Mullins, D., Deegan, B., Horgan, J., Ward, E., Denny, P., ... & Glavin, M. (2023). Feasibility Study of V2X Communications in Initial 5G NR Deployments. *IEEE Access*.
- Dase, S. (2022). *Antena dan Propagasi: Teori dan Praktik*. Yogyakarta: Penerbit Andi.
- Fitri, I. (2008). Studi karakteristik pancaran antena mikrostrip slot array dengan pencatutan model garpu untuk memperlebar bandwidth.
- Fransco, H.S., Hanafiah. (2015). Analisis Penentuan Ukuran Slot pada Karakteristik Antena Mikrostrip Patch Segiempat dengan Pencatu Aperture Coupled. *SINGUDA ENSIKOM*. Vol.10 No.27

- Garg, R. Bhartia, P. Bahl, P. Ittipiboon, A. (2001). Microstrip antenna design handbook. Norwood: Artech house.
- Hanafiah, Ali R. (2012). Antena Mikrostrip : Konsep dan Aplikasinya. *JiTEKH. Edisi 1 Vol. 01*.
- Hossain, M. A. (2015). *Design And Analysis Of Rectangular Microstrip Patch Antennas Loaded With Plastic And Barium Titanate Substrates* (Doctoral dissertation, Bangladesh University of Engineering and Technology).
- Huawei. (2020). 5G Spectrum Public Policy Position. Huawei Technologies Co., Ltd.
- Hussain, N., Jeong, M. J., Abbas, A., & Kim, N. (2020). Metasurface-based single-layer wideband circularly polarized MIMO antenna for 5G millimeter-wave systems. *Ieee Access*, 8, 130293-130304.
- Javad Jangi Golezani, Selcuk Paker and Constantine A. Balanis. (2017). Compact Expression for the Directivity of Binomial Array with no Restriction in Element Spacing. *IEEE Journal & Magazines*, Vol. 16, pp. 653-656.
- Jiang, W., Liu, B., Cui, Y., & Hu, W. (2019). High-isolation eight-element MIMO array for 5G smartphone applications. *IEEE Access*, 7, 34104-34112.
- Khan, B. S., Jangsher, S., Ahmed, A., & Al-Dweik, A. (2022). URLLC and eMBB in 5G industrial IoT: A survey. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 3, 1134-1163.
- Kiani, S. H., Alharbi, A. G., Khan, S., Marey, M., Mostafa, H., & Khan, M. A. (2022). Wideband three loop element antenna array for future 5G mmWave devices. *IEEE Access*, 10, 22472-22479.
- Kraus, J. D, Marhefka. R, Khan, A.S. (2010). Antenna's and wave propagation. Fourth Edition. New Delhi: Tata McGraw-Hill Education Private Limited. Special Indian Edition.
- Kukushkin, A. (2018). *Introduction to Mobile Network Engineering: GSM, 3G-WCDMA, LTE and the Road to 5G*. John Wiley & Sons.
- Kumar, A., Mohanty, J., Pattanayak, P., Sabat, D., & Prasad, G. (2023). Six-port mid-bands Low-SAR MIMO antenna for WLAN, 5G mobile terminals, and C-band applications. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 166, 154665.

- Lepley, T. A. (2020). Wideband Metasurface Antenna (Thesis, Air Force Institute of Technology (Ohio)).
- Li, Y., Zhao, Z., Tang, Z., & Yin, Y. (2019). Differentially-fed, wideband dual-polarized filtering antenna with novel feeding structure for 5G sub-6 GHz base station applications. *IEEE Access*, 7, 184718-184725.
- Lin, F. H., Li, T., & Chen, Z. N. (2019, March). Recent progress in metasurface antennas using characteristic mode analysis. In *2019 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)* (pp. 1-5). IEEE.
- Liu, S., Yang, D., Chen, Y., Sun, K., Zhang, X., & Xiang, Y. (2021). Design of single-layer broadband omnidirectional metasurface antenna under single mode resonance. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 69(10), 6947-6952.
- Munir, A., & Nur, L. O. (2015, May). Bandwidth improvement of square patch array-based AMC using multiple slots technique. In *2015 3rd International Conference on Information and Communication Technology (ICoICT)* (pp. 146-149). IEEE.
- Nasimuddin, N., Chen, Z. N., & Qing, X. (2016). Bandwidth Enhancement of a Single-Feed Circularly Polarized Antenna Using a Metasurface: Metamaterial-based wideband CP rectangular microstrip antenna. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 58(2), 39-46.
- Park, I. (2018). Application of metasurfaces in the design of performance-enhanced low-profile antennas. *EPJ Applied Metamaterials*, 5, 11
- Pei, E., & Jiang, J. (2019). Performance analysis of licensed-assisted access to unlicensed spectrum in LTE release 13. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 68(2), 1446-1458.
- Qualcomm Technologies. 2019. *Global Update on 5G Spectrum*. Qualcomm Technologies. Inc.
- Ray, J. K., Sultana, R., Bera, R., Alfred, Q. M., & Sil, S. (2023, February). Evaluation of BLER and throughput during the coexistence of both 4G LTE and 5G NR. In *2023 11th International Conference on Internet of Everything, Microwave Engineering, Communication and Networks (IEMECON)* (pp. 1-6). IEEE.

- Sahandabadi, S. (2021). Microstrip Array Antenna for Wireless Power Transfer (Doctoral dissertation, University of Windsor (Canada)).
- Santosa, C. E., Sumantyo, J. T. S., Yam, C. M., Urata, K., Ito, K., & Gao, S. (2018). Subarray design for C-band circularly-polarized synthetic aperture radar antenna onboard airborne. *Progress In Electromagnetics Research*, 163, 107-117.
- Shehab, M. J., Kassem, I., Kutty, A. A., Kucukvar, M., Onat, N., & Khattab, T. (2021). 5G networks towards smart and sustainable cities: A review of recent developments, applications and future perspectives. *IEEE Access*, 10, 2987-3006.
- Shereen, M. K., Khattak, M. I., & Nebhen, J. (2022). A review of achieving frequency reconfiguration through switching in microstrip patch antennas for future 5G applications. *Alexandria Engineering Journal*, 61(1), 29-40.
- Soesilo, T. D. (2019). Ragam dan prosedur penelitian tindakan. Salatiga: Satya Wacana University Press
- Sugiyono. (2013). Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif, R&D. Bandung: IKAPI.
- Thummaluru, S. R., Ameen, M., & Chaudhary, R. K. (2019). Four-port MIMO cognitive radio system for midband 5G applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 67(8), 5634-5645.
- Tretyakov, S. A. (2015). Metasurfaces for general transformations of electromagnetic fields. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 373(2049), 20140362.
- Ullah, R., Ullah, S., Ullah, R., Din, I. U., Kamal, B., Khan, M. A. H., & Matekovits, L. (2022). Wideband and high gain array antenna for 5G smart phone applications using frequency selective surface. *IEEE Access*, 10, 86117-86126.
- Wu, S., & Shang, F. (2023). Broadband Dual-Polarized Magnetoelectric Dipole Antenna With Compact Structure for 5G Base Station. *IEEE Access*, 11, 20806-20813.
- Yang, M., Sun, Y., & Zhou, J. (2020). Hybrid antenna array for 4G/5G smartphone applications. *Progress In Electromagnetics Research M*, 96, 109-118.

- Yohandri, Wissan, V., Firmansyah, I., Rizki Akbar, P., Sri Sumantyo, J. T., & Kuze, H. (2011). Development of circularly polarized array antenna for synthetic aperture radar sensor installed on UAV. *Progress in Electromagnetics Research*, 19, 119-133.
- Yuan, X. T., He, W., Hong, K. D., Han, C. Z., Chen, Z., & Yuan, T. (2020). Ultra-wideband MIMO antenna system with high element-isolation for 5G smartphone application. *IEEE Access*, 8, 56281-56289.
- Zhang, F. (2019). *Radio Frequency Switch Design for 5G Communication and ESD Design on Advanced Technology* (Doctoral dissertation, UC Riverside).