

Perancangan Dan Implementasi Pandu Gelombang Persegi Panjang Dengan Menggunakan Pencetakan 3d Untuk Bts 5g S-Band

1st Yazid Muharram Malni
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

yazaydmalni@student.telkomuniversity.ac.id

2nd Heroe Wijanto
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

heroe@telkomuniversity.ac.id

3rd Yussi Perdana Saputera
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

yussips@telkomuniversity.ac.id

Abstrak - Teknologi generasi kelima (5G) merupakan perkembangan sistem komunikasi seluler setelah 4G dengan kemampuan transfer data yang besar, akselerasi data yang lebih tinggi, latensi rendah, serta memiliki konektivitas perangkat yang kuat pada jaringan telekomunikasi. *Rectangular waveguide* diperlukan karena dapat mentransfer energi dengan baik dari output pemancar ke antena, apabila proses transmisi gelombang tidak menggunakan waveguide maka akan terjadi loss atau rugi-rugi yang besar. Nilai VSWR simulasi didapat pada S_{11} dan S_{22} yaitu 1,176 sedangkan nilai VSWR implementasi didapat pada S_{11} dan S_{22} sebesar 4,03 dan 2,257. Nilai *return loss* simulasi pada S_{11} dan S_{22} yaitu -21,808 dB sedangkan *return loss* implementasi S_{11} dan S_{22} sebesar -4,473 dB dan -8,29 dB. Nilai *transmission loss* simulasi didapat pada S_{21} dan S_{12} yaitu -14,786 dB sedangkan nilai *transmission loss* implementasi S_{21} dan S_{12} sebesar -31,464 dan -32,103 dB. Nilai impedansi simulasi didapat pada S_{11} dan S_{22} yaitu 52,964 Ω dan nilai impedansi simulasi pada S_{21} dan S_{12} sebesar 19 dB, sedangkan nilai impedansi implementasi pada S_{11} , S_{21} , S_{12} dan S_{22} sebesar 27,345 Ω , 48,673 Ω , 48,424 Ω dan 24,959 Ω .

Kata Kunci : *Rectangular Waveguide, 3D Printing, 5G.*

I. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Teknologi pada industri 4.0 sudah berkembang pesat, terutama di bidang telekomunikasi. Munculnya 5G merupakan pengembangan dari generasi keempat (4G). Teknologi generasi kelima ini menawarkan akselerasi data yang lebih tinggi, latensi yang rendah, serta memiliki konektivitas perangkat yang kuat pada jaringan telekomunikasi sehingga dapat direalisasikan pada industri 4.0 [1]. Pada pembentukan jaringan 5G diperlukan saluran transmisi sebagai komponen penting dalam pembentukan jaringan 5G, contohnya *waveguide* pada BTS (*Base Transceiver Station*). BTS berfungsi mengirim dan menerima sinyal radio dari perangkat seluler dan mengubahnya menjadi sinyal digital.

Teknologi 3D *printing* adalah suatu teknologi yang memungkinkan pencetakan objek berdasarkan desain

yang diinginkan. Keberadaannya memberikan kemudahan dalam kehidupan sehari-hari dan berkontribusi pada pesatnya perkembangan teknologi telekomunikasi. Dalam konteks produksi alat atau objek, 3D *printing* dapat digunakan untuk mencetak peralatan telekomunikasi yang sebelumnya harus dibuat secara manual. Terdapat banyak contoh penggunaan 3D *printing* dalam bidang telekomunikasi, dan salah satunya adalah dalam pembuatan *waveguide* [2].

Waveguide merupakan sebuah jalur transmisi berbentuk tabung berongga yang umumnya terbuat dari material konduktor yang memiliki konduktivitas yang baik. Pandu Gelombang diperlukan karena mempunyai kapasitas daya yang tinggi sehingga pengiriman daya dapat tersalurkan dengan baik tanpa ada kerugian yang besar. Lalu, pandu gelombang cenderung lebih rendah untuk meradiasi energi dan lebih tahan terhadap gangguan eksternal disebabkan mempunyai lapisan dinding yang melindungi isinya dari interferensi elektromagnetik eksternal. Di dalam rongga *waveguide*, biasanya terdapat bahan dielektrik dengan kehilangan daya yang rendah, seperti udara kering. *Waveguide* biasanya digunakan sebagai jalur transmisi untuk frekuensi gelombang mikro (dalam kisaran GHz), baik sebagai saluran antara antena parabola dengan pemancar atau penerima, maupun sebagai elemen pengumpan. Saluran transmisi dengan frekuensi di kisaran GHz (selain serat optik) akan memiliki redaman yang cukup, yang disebabkan oleh efek penyerapan, radiasi, dan efek kulit. Dengan menggunakan rongga *waveguide*, gelombang elektromagnetik yang memiliki polarisasi non-planar dapat diarahkan untuk merambat ke arah tertentu. Bentuk yang umum digunakan untuk rongga *waveguide* adalah persegi panjang dan silinder, dengan material penghantar yang serupa [2].

Penelitian sebelumnya telah menggunakan metode 3D *printing* untuk membuat *rectangular waveguide* pada frekuensi 2,4 GHz, dengan menggunakan *polylactic acid* (PLA) sebagai bahan cetakan dan dilapisi dengan *copper tape* pada bagian dalamnya [3]. Dalam penelitian ini, *rectangular waveguide* dirancang menggunakan metode *transverse electrical wave* (TE₁₀). *Rectangular waveguide* yang dicetak penulis menggunakan tembaga

sehingga hasil implementasi dapat menyalurkan gelombang yang baik. *Waveguide* ini dirancang untuk bekerja pada frekuensi *cutoff* 3,5 GHz dengan rentang frekuensi *S-Band* [3].

II. DASAR TEORI

A. Teknologi 5G

Teknologi generasi kelima (5G) merupakan perkembangan sistem komunikasi seluler setelah 4G atau LTE (*Long Term Evolution*). Perkembangan teknologi 5G juga mempengaruhi perkembangan teknologi RF, IoT dan antena gelombang 5G. Teknologi 5G memiliki tiga rentang spektrum yang mampu memberikan jangkauan yang lebih luas, yaitu sub-1 GHz, 1-6 GHz dan di atas 6 GHz. Pita frekuensi radio 3,5 GHz merupakan salah satu spektrum yang digunakan pada standar frekuensi di Indonesia untuk teknologi 5G dikarenakan frekuensi ini selaras untuk diaplikasikan di daerah tropis. *Bandwidth* yang dibutuhkan untuk kebutuhan spektrum untuk 5G NR (New Radio) yaitu 80-100 Mhz [1].

B. Waveguide

Waveguide atau pandu gelombang adalah alat yang dapat dilalui oleh gelombang yang berfungsi untuk masuk dan keluarnya gelombang dari suatu medium. Biasanya *waveguide* dapat digunakan untuk mentransmisikan energi frekuensi radio ke antena, jika pandu gelombang tidak digunakan dalam proses transmisi gelombang radio maka akan terjadi rugi-rugi yang sangat besar [3]. Sifat listrik dari saluran transmisi pandu gelombang tergantung pada struktur saluran. *Waveguide* seperti kapasitor panjang, perubahan respons kapasitifnya terlihat karena frekuensi telah berubah. Ketika energi listrik melewati konduktor panjang yang mempunyai medan magnet, maka juga menunjukkan sifat *parenting*. Contohnya berbagai macam jalur yang digunakan, dielektrik pada jalur, dan panjang jalur yang harus diperhatikan. Dampak dari reaktif induktif dan kapasitif jalur bergantung pada frekuensi yang diterapkan. Tidak ada dielektrik yang sempurna sebab elektron beralih dari satu konduktor ke konduktor lainnya melalui dielektrik [3].

C. Mode Propagasi Pada Waveguide

Perambatan gelombang pada pandu gelombang pada dasarnya berasal dari dua mode. Secara umum, pada dasarnya terdapat tiga mode propagasi, yaitu [4]:

1. Transverse Electromagnetic Wave

Transverse electromagnetic wave berarti medan magnet dan medan listrik tegak lurus terhadap arah rambat atau propagasi. Mode propagasi ini disebut mode TEM dengan ketentuan $E_z = H_z = 0$.

2. Transverse Magnetic Wave

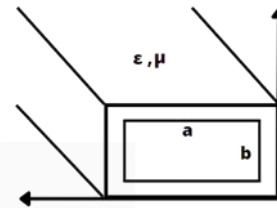
Transverse magnetic wave berarti medan magnet bersifat transversal. Transversal merupakan arah getar atau komponen gelombang bersifat tegak lurus terhadap arah rambat atau propagasi. Pada mode perambatan gelombang ini, jika gelombang merambat ke arah z, maka $H_z = 0$. Hanya ada H_x dan atau H_y . Pada mode ini E_z tidak 0, medan elektrik tidak transversal, serta memiliki komponen yang searah dengan propagasi. Mode propagasi ini disebut mode TM dengan ketentuan $E_z \neq 0 ; H_z = 0$.

3. Transverse Electric Wave

Transverse electric wave merupakan medan elektrik dengan arah getar atau komponen tegak lurus terhadap arah rambat atau propagasi. Pada mode perambatan gelombang ini, jika gelombang merambat ke arah z maka $E_z = 0$. Hanya ada E_x dan atau E_y . Pada mode ini H_z tidak 0, medan magnetik tidak transversal serta memiliki komponen yang searah dengan propagasi. Mode propagasi ini disebut mode TE dengan ketentuan $E_z = 0 ; H_z \neq 0$.

D. Rectangular Waveguide (Pandu Gelombang Persegi Panjang)

Rectangular waveguide atau pandu gelombang persegi panjang merupakan tabung logam persegi panjang dimana gelombang elektromagnetik disebarkan dan dibatasi oleh tabung. *Waveguide* tidak dapat mentransfer mode elektromagnetik transversal dalam kabel tembaga, dan beberapa mode lain harus digunakan. Oleh karena itu, mereka tidak dapat dihubungkan langsung ke kabel, dan mekanisme untuk memulai mode pandu gelombang harus disediakan terlebih dahulu. Struktur pandu gelombang persegi panjang ditunjukkan pada gambar di bawah ini:



GAMBAR 2.1
Dimensi Pandu Gelombang Persegi Panjang

Dengan keterangan [6] :

a = Lebar dalam (m)

b = Tinggi dalam (m)

m = 0,1,2,3,... (Jumlah variasi orde m)

n = 0,1,2,3,... (Jumlah variasi orde n)

ϵ = Permittivitas ($8,854187817 \times 10^{-12}$ F/m)

μ = Permeabilitas ($4\pi \times 10^{-7}$ H/m)

Pandu gelombang persegi panjang dapat dirancang menggunakan mode TE₁₀. Program ini akan mendimensikan pandu gelombang persegi panjang untuk memasukkan frekuensi yang diberikan ke pusat mode TE₁₀. Frekuensi *cutoff* yang lebih rendah untuk mode yang diberikan dalam pandu gelombang persegi panjang ditentukan oleh persamaan berikut [7] :

$$(f_c)_{mn} = \frac{1}{2\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}$$

Setelah mendapatkan Frekuensi *cutoff* bawah maka kita bisa menghitung panjang *rectangular waveguide* dengan persamaan :

$$(\lambda_c)_{mn} = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}}$$

E. Pencetakan 3D

Pencetakan 3D atau *3D printing* merupakan alat cetak yang dibuat pada tahun 1980 oleh Dr. Kodama yang merupakan salah satu ilmuwan dari Negari Matahari Terbit, akan tetapi *3D printing* baru bisa masuk ke Indonesia pada tahun 2010 [9]. Alat pertama yang dibuat yaitu alat yang mencetak produk dalam lapisan bertumpuk dari gambar yang dihasilkan sebagai file digital. *Material Powder Bed Fusion* (Metal), *material Vat Polimerization* (Polimer), *material Extrusion*, dan *material Jetting* merupakan jenis pencetakan 3D berdasarkan metode pencetakan produk.

F. Transisi *Rectangular Waveguide* Terhadap *Coaxial*

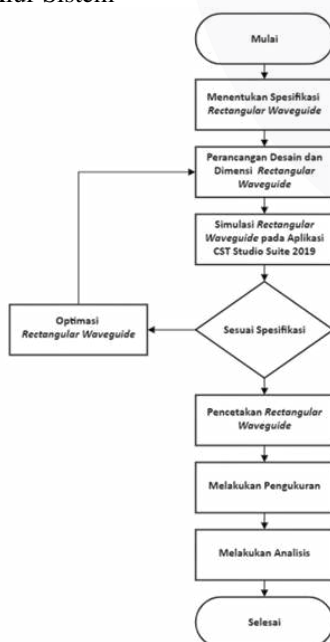
Dalam pengoperasian *waveguide*, dibutuhkan generator sinyal atau antena sebagai sumber sinyal yang akan bekerja melalui *waveguide* tersebut. Untuk menghubungkan generator sinyal atau antena, terdapat beberapa metode yang umum digunakan yang terkait dengan pandu gelombang. Salah satu cara umum adalah menggunakan adaptor untuk menghubungkan generator sinyal atau antena ke *rectangular waveguide*. Selain itu, kita juga dapat menggunakan kabel koaksial untuk mentransfer daya. Salah satu teknik penyambungan yang digunakan dalam *waveguide* adalah transisi dari koaksial ke *waveguide* [11].

III. MODEL SISTEM DAN PERANCANGAN

A. Perancangan Sistem Rectangular Waveguide

Rectangular waveguide dirancang menggunakan bahan penyusun *polylactic acid* dengan tembaga pada lapisan dalamnya. Pandu gelombang persegi panjang ini dirancang dengan menggunakan *software 3D Modeler* pada frekuensi *S-Band* dengan frekuensi tengah 3,5 GHz. Perancangan pandu gelombang harus sama dengan spesifikasi yang diinginkan yaitu nilai VSWR $\leq 1,5$ dan return loss ≤ -14 dB.

B. Desain Alur Sistem



GAMBAR 3.1

Diagram Alir Pembuatan *Rectangular Waveguide*

Dari ilustrasi pada Gambar 3.1, kita bisa mengamati Langkah-langkah yang diperlukan dalam pembuatan *rectangular waveguide* ini.

C. Spesifikasi Rectangular Waveguide

Berikut ini merupakan spesifikasi *rectangular waveguide* yang akan dibuat dalam pengerjaan tugas akhir ini :

TABEL 3.1
Spesifikasi *Rectangular Waveguide*

Nama	Nilai
Frekuensi Tengah	3,5 GHz
Frekuensi Kerja	<i>S-Band</i>
VSWR	$\leq 1,5$
<i>Return Loss</i>	≤ -14 dB
Impedansi	50 Ω
<i>Bandwidth</i>	80-100 MHz

D. Desain Rectangular Waveguide

Pandu gelombang persegi panjang yang dibuat adalah tipe TE₁₀. Untuk mode TE₁₀, a = 42,8 mm, b = 20 mm, maka kita dapat menghitung frekuensi *cutoff* sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 (f_c)_{mn} &= \frac{1}{2\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2} \\
 &= \frac{3 \times 10^8}{2} \sqrt{\left(\frac{1}{42,8 \times 10^{-3}}\right)^2 + \left(\frac{0}{20 \times 10^{-3}}\right)^2} \\
 &= 3,504672897 \text{ GHz}
 \end{aligned}$$

Dengan keterangan : $\frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} = c = 3 \times 10^8$,

Maka panjang bagian dalam *rectangular waveguide* yaitu :

$$\begin{aligned}
 (\lambda_c)_{mn} &= \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}} \\
 &= \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{1}{42,8 \times 10^{-3}}\right)^2 + \left(\frac{0}{20 \times 10^{-3}}\right)^2}} \\
 &= 8,56 \text{ cm}
 \end{aligned}$$

Untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini penulis harus menyelesaikan dalam pembuatan *rectangular waveguide*. Maka dari itu harus ada terlebih dahulu suatu desain awal untuk pengerjaan Tugas Akhir ini. Disini perancangan awal desain dilakukan didalam aplikasi simulasi.

TABEL 3.2
Nilai Parameter Awal *Rectangular Waveguide*

Nilai Parameter Awal <i>Rectangular Waveguide</i>		
Nama	Parameter	Nilai
Lebar Bagian Dalam	a	42,8 mm

Tinggi Bagian Dalam	b	20 mm
Panjang Bagian Dalam	x	85,6 mm
Jumlah Variasi Orde	m	1
Jumlah Variasi Orde	n	0

Dari tabel ini dapat kita ketahui lebar dalam, tinggi dalam, dan panjang dalam dari *rectangular waveguide*. Setelah mengetahui nilai parameter pada tabel 3.2, maka kita membuat bagian *tape* terlebih dahulu, dengan memasukkan nilai parameter pada parameter list di aplikasi simulasi menggunakan bahan *copper (annealed)*.

Kemudian, kita membuat jaket *tape* dengan menggunakan bahan *polycarbonate (lossy)* dengan memasukan lebar luar atau $ax = a + h$, dan tinggi luar atau $bx = b + h$, dengan h adalah tebal *copper* yaitu 0,06 mm. Lalu kita memasukan juga tebal jaket sebesar 5 mm.

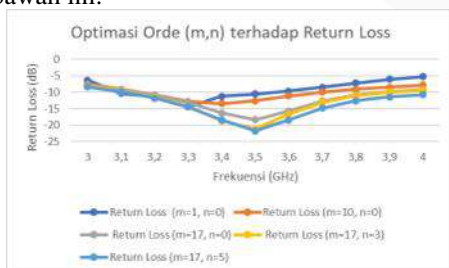
Lalu, kita membuat *pin* dengan menggunakan bahan *copper (annealed)* dengan nilai jari-jari *pin* atau $di = 0,35$ mm, lalu orde $m = 1$, orde $n = 0$, dan panjang *pin* atau $ls = 12,5$ mm. Setelah membuat *pin*, lalu membuat teflon untuk menyelimuti *pin* dengan bahan *polycarbonate (lossy)* dengan lapisan *pin* atau $dout = 1$.

Setelah itu, melakukan *transform selected object* dengan menggunakan *mirror* pada *operation* untuk *pin*, jaket *pin*, dan teflon. Kemudian, melakukan *waveguide port* pada bagian *simulation* yang dilakukan pada kedua *port*.



GAMBAR 3.1
Return Loss Orde (m=1, n=0)

Karena hasil simulasi masih kurang baik, maka dilakukan optimasi simulasi pada posisi pin atau orde m dan orde n . Berdasarkan gambar 3.2, semakin besar orde m dan orde n , maka *return loss* semakin baik dengan $m > n$. Hasil optimasi simulasi dapat dilihat pada gambar 3.10 dibawah ini.

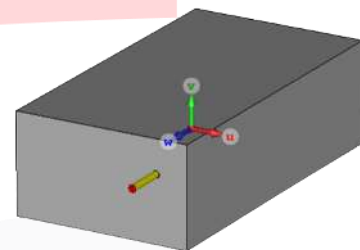


GAMBAR 3.2
Optimasi Orde (m,n) terhadap Return Loss

TABEL 3.3
Nilai Parameter Akhir *Rectangular Waveguide*

Nilai Parameter Akhir <i>Rectangular Waveguide</i>		
Nama	Parameter	Nilai

Lebar Bagian Dalam	a	42,8 mm
Tinggi Bagian Dalam	b	20 mm
Panjang Bagian Dalam	x	85,6 mm
Jumlah Variasi Orde	m	17
Jumlah Variasi Orde	n	5
Lebar Bagian Luar	ax	42,86 mm
Tinggi Bagian Luar	bx	20,06 mm
Tebal <i>Copper</i>	h	0,06 mm
Panjang Pin	ls	12,5 mm
Jari-Jari Pin	di	0,35 mm
Lapisan Pin	dout	1 mm
Tebal Plastik	t	5 mm



GAMBAR 3.3
Rectangular Waveguide Simulasi

E. Bahan Pembuatan *Rectangular Waveguide*

Desain *rectangular waveguide* akan menggunakan material plastik sebab penggunaan plastik dapat mengubah berat dari *rectangular waveguide*. Bagian dalam *rectangular waveguide* akan dilapisi dengan tembaga murni supaya menjadi penyalur gelombang yang baik.

TABEL 3.4
Daftar Bahan yang Digunakan

Bagian	Jenis Bahan	Ketebalan
Dalam	Tembaga (<i>Copper</i>)	0.06 mm
Luar	PLA+	5 mm

F. Bahan Konduktor Pada *Rectangular Waveguide*

Pada penelitian sebelumnya setelah proses 3D *printing* selesai, alat dilapisi bahan konduktif tembaga yaitu *copper tape*. Hasil pengukuran *rectangular waveguide* tidak akan optimal jika hasil cetakan 3D tidak dilapisi bahan konduktif [13]. Maka dari itu bagian dalam *rectangular waveguide* digunakan tembaga murni yang akan diukur dalam rentang frekuensi 3-4 GHz agar hasil implementasi maksimal [14].



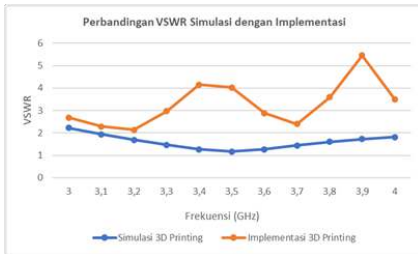
GAMBAR 3.4
Copper



GAMBAR 3.5
Implementasi Rectangular Waveguide

IV. HASIL DAN ANALISIS

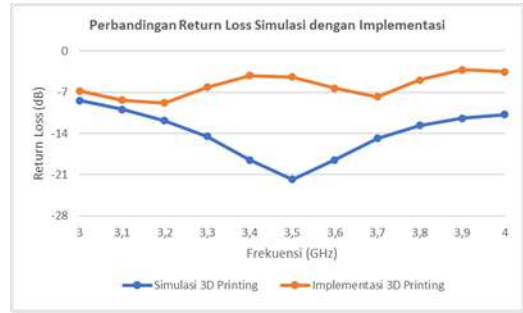
A. VSWR



GAMBAR 4.2
VSWR Simulasi S₂₂ dengan Implementasi S₂₂

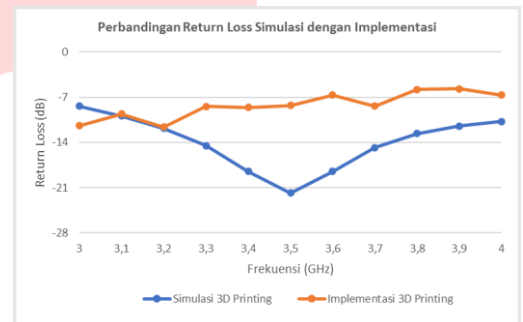
Dari hasil ini, kita dapat mengetahui nilai VSWR pada frekuensi tertentu pada simulasi dan implementasi. Berdasarkan data diatas, VSWR terendah pada simulasi didapatkan pada frekuensi 3,5 Ghz yaitu sebesar 1,176. Untuk VSWR terendah pada implementasi terdapat pada frekuensi 3,2 Ghz yaitu 1,684.

B. Return Loss



GAMBAR 4.3
Return Loss Simulasi S₁₁ dengan Implementasi S₁₁

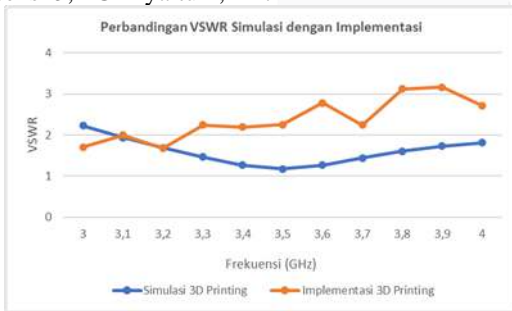
Nilai return loss terendah yang didapat pada hasil simulasi ialah -21,808 dB pada frekuensi 3,5 GHz dan return loss terendah yang diperoleh pada hasil pengukuran yaitu -8,81 dB pada frekuensi 3,2 Ghz dimana hasil pengukuran mengalami pergeseran frekuensi dikarenakan pengaruh permitivitas bahan yang berbeda.



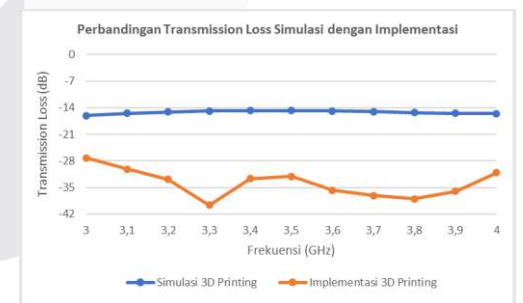
GAMBAR 4.4
Return Loss Simulasi S₂₂ dengan Implementasi S₂₂

Nilai return loss terendah yang didapat pada hasil simulasi ialah -21,808 dB pada frekuensi 3,5 GHz dan return loss terendah yang diperoleh pada hasil pengukuran yaitu -11,633 dB pada frekuensi 3,2 Ghz.

C. Transmission Loss



GAMBAR 4.2

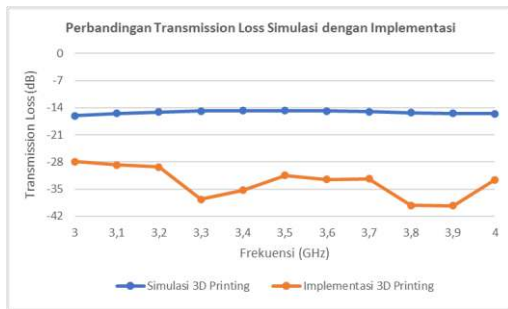


GAMBAR 4.5
Transmission Loss Simulasi S₁₁ dengan Implementasi S₁₁

Nilai transmission loss terendah yang didapat pada hasil simulasi ialah -16,04 dB pada frekuensi 3 GHz dan transmission loss terendah yang diperoleh pada hasil pengukuran yaitu -39,675 dB pada frekuensi 3,3 GHz.

□
1
1

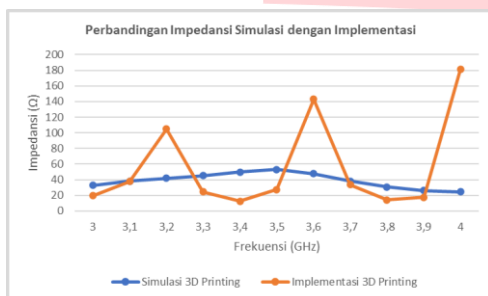
d
e
n
g
a
n



GAMBAR 4.6
Transmission Loss Simulasi S_{11} dengan Implementasi S_{11}

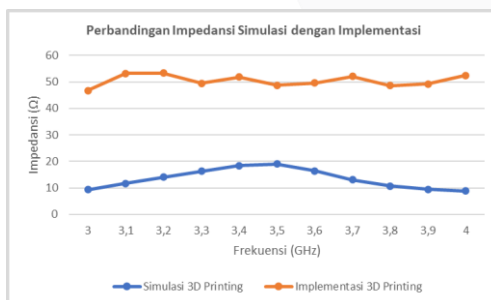
Nilai *transmission loss* terendah yang didapat pada hasil simulasi ialah -16,04 dB pada frekuensi 3 GHz dan *transmission loss* terendah yang diperoleh pada hasil pengukuran yaitu -39,203 dB pada frekuensi 3,9 GHz.

D. Impedansi



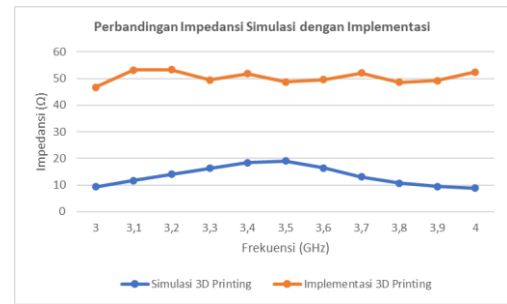
GAMBAR 4.7
Impedansi Simulasi S_{11} dengan Implementasi S_{11}

Nilai impedansi *terbaik* yang didapat pada hasil simulasi ialah yang mendekati nilai 50 Ω, maka dari itu impedansi terbaik hasil simulasi berada pada frekuensi 3,4 GHz dengan nilai impedansi sebesar 49,884 Ω, sedangkan untuk impedansi terbaik hasil pengukuran berada pada frekuensi 3,1 GHz dengan nilai impedansi sebesar 37,622 Ω.



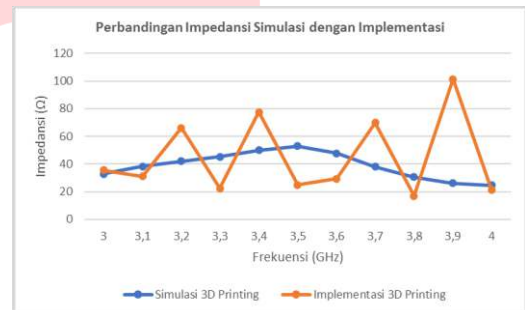
GAMBAR 4.8
Impedansi Simulasi S_{12} dengan Implementasi S_{12}

Nilai impedansi *terbaik* yang didapat pada hasil simulasi ialah yang mendekati nilai 50 Ω, maka dari itu impedansi terbaik hasil simulasi berada pada frekuensi 3,4 GHz dengan nilai impedansi sebesar 18,469 Ω, sedangkan untuk impedansi terbaik hasil pengukuran berada pada frekuensi 3,6 GHz dengan nilai impedansi sebesar 49,702 Ω.



GAMBAR 4.9
Impedansi Simulasi S_{21} dengan Implementasi S_{21}

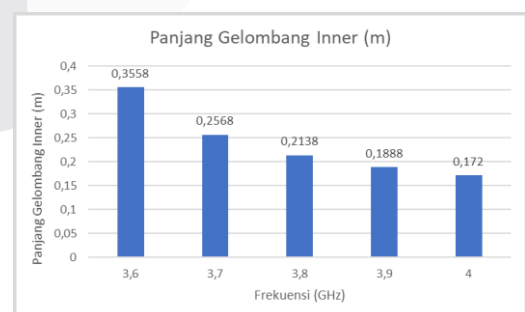
Nilai impedansi *terbaik* yang didapat pada hasil simulasi ialah yang mendekati nilai 50 Ω, maka dari itu impedansi terbaik hasil simulasi berada pada frekuensi 3,4 GHz dengan nilai impedansi sebesar 18,469 Ω, sedangkan untuk impedansi terbaik hasil pengukuran berada pada frekuensi 3,6 GHz dengan nilai impedansi sebesar 49,583 Ω.



GAMBAR 4.10
Impedansi Simulasi S_{22} dengan Implementasi S_{22}

Nilai impedansi *terbaik* yang didapat pada hasil simulasi ialah yang mendekati nilai 50 Ω, maka dari itu impedansi terbaik hasil simulasi berada pada frekuensi 3,4 GHz dengan nilai impedansi sebesar 49,884 Ω, sedangkan untuk impedansi terbaik hasil pengukuran berada pada frekuensi 3 GHz dengan nilai impedansi sebesar 35,626 Ω.

E. Perhitungan Panjang Gelombang Inner



GAMBAR 4.11
Panjang Gelombang Inner berdasarkan Frekuensi

Dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi frekuensi operasional, panjang gelombang pada saluran transmisi menjadi lebih pendek. Panjang gelombang terpanjang terjadi pada frekuensi 3,6 GHz dengan panjang gelombang 0,3558 m, sementara panjang gelombang

terpendek terjadi pada frekuensi 4 GHz dengan panjang gelombang 0,172 m.

F. Perhitungan Impedansi Karakteristik



GAMBAR 4.12
Impedansi Karakteristik berdasarkan Frekuensi

Menurut gambar diatas, semakin besar frekuensi maka semakin besar nilai impedansi karakteristiknya. Dapat dilihat impedansi karakteristik yang paling besar pada frekuensi 4 GHz dengan nilai 201,335 Ω. Sedangkan impedansi karakteristik terkecil menurut gambar diatas pada 3,6 GHz dengan nilai 181,201 Ω. Berdasarkan gambar diatas, maka semakin besar nilai frekuensi maka nilai impedansi karakteristik semakin besar.

G. Perhitungan Kerugian Daya

TABEL 4.1
Kerugian Daya berdasarkan Frekuensi

Frekuensi (GHz)	Kerugian dielektrik (dB/m)	Kerugian Permukaan Kulit (Ω /m)
3,6	$1,119 \times 10^{-9}$	0,0154
3,7	$0,807 \times 10^{-9}$	0,0156
3,8	$0,672 \times 10^{-9}$	0,0158
3,9	$0,593 \times 10^{-9}$	0,0160
4	$0,541 \times 10^{-9}$	0,0162

Dari grafik diatas menyatakan bahwa semakin besar frekuensi maka nilai kerugian dielektrik semakin kecil. Sedangkan semakin besar frekuensi maka nilai kerugian permukaan kulit semakin besar.

V. KESIMPULAN

A. Kesimpulan

Dari hasil perancangan dan implementasi *rectangular waveguide* penulis menarik beberapa kesimpulan, seperti :

1. *Rectangular waveguide* telah dirancang menggunakan *software 3D Modelar* dengan mode TE10 dengan frekuensi tengah 3,5 GHz hanya efektif melewati sinyal pada 3,3 - 3,7 GHz atau *bandwidth* sebesar 400 MHz pada simulasi dengan dimensi lebar atau $a = 42.8$ mm, tinggi atau $b = 20$ mm, serta panjang atau $x = 85,6$ mm yang diperuntukkan untuk BTS 5G *S-Band*.
2. Hasil simulasi dan implementasi mengalami perbedaan disebabkan oleh ketidakakuratan dalam

proses fabrikasi, yang tidak sepenuhnya identik dengan desain simulasi. Terdapat perbedaan signifikan antara hasil simulasi dan implementasi pada nilai VSWR, *return loss*, *transmission loss* dan impedansi untuk frekuensi 3,5 GHz. Pada VSWR S_{11} terdapat selisih 2,854 dan VSWR S_{22} terdapat selisih 1,081. Pada *return loss* S_{11} terdapat selisih 17,435dB dan *return loss* S_{22} terdapat selisih 13,518. Pada *transmission loss* S_{12} terdapat selisih 17,317 dB dan *transmission loss* S_{21} terdapat selisih 16,678 dB. Pada impedansi S_{11} , S_{12} , S_{21} dan S_{22} terdapat selisih 25,619 Ω, 29,424 Ω, 29,673 Ω dan 28,005 Ω.

B. Saran

1. Saat melakukan pengukuran pandu gelombang persegi panjang, adaptor harus sesuai dengan jenis pandu gelombang yang digunakan.
2. Menggunakan mode propagasi lain seperti mode TM (*Transverse Magnetic*) dan menggunakan bahan logam lain untuk penelitian selanjutnya, seperti aluminium.

Referensi

- [1] D. U. Campos-delgado and S. Member, "5G and Beyond: Past, Present and Future of the Mobile Communications," vol. 19, no. 10, pp. 1702–1736, 2021.
- [2] M. D. Auria *et al.*, "3-D Printed Metal-Pipe Rectangular Waveguides," pp. 1–11, 2015.
- [3] M. E. Rakatama, "Perancangan Dan Realisasi Pandu Gelombang Persegi Panjang Pada Frekuensi 2,4 Ghz Dengan Menggunakan 3d Printing," vol. 8, no. 6, pp. 11753–11760, 2021.
- [4] M. Q. Khairuzzaman, Pozar. "Microwave Engineering", vol. 4, no. 1. 2016.
- [5] J. Weiner, F. Nunes. "Transmission Lines and Waveguides," *Light Interact.*, pp. 154–210, 2017.
- [6] C. Guo *et al.*, "A 3-D Printed E-Plane Waveguide Magic-T Using Air-Filled Coax-to-Waveguide Transitions," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 67, no. 12, pp. 4984–4994, 2019.
- [7] M. R. Hidayat, A. Poetra, T. Elektro, U. Jenderal, and A. Yani, "Purwarupa Mode Konverter Rectangular Waveguide Menggunakan Double-Trench," vol. 19, no. 01, pp. 53–59, 2020.
- [8] D. H. Whittum, "Introduction to Microwave Linacs," *Tech. Concepts High Energy Phys. X*, no. January 1999, pp. 387–486, 1999.
- [9] O. A. Saputra, *Pengoperasian Mesin Cetak 3D*, December. 2019.
- [10] R. Widiyanto and E. Safrianti, "Analisa Hasil Simulasi Antena Mikrostrip Yagi Pada Frekuensi Kerja 1,9-2,1 Ghz Menggunakan Aplikasi Ansoft HSFF V.13.0," ISSN 2502- 3632 ISSN 2356-0304 J. Online Int. Nas. Vol. 7 No.1, Januari – Juni 2019 Univ. 17 Agustus 1945 Jakarta, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2019.
- [11] F. D. Quesada Pereira, J. L. Gómez Tornero, D. Cañete Rebenaque, J. Pascual García, and A. Alvarez Melcón, "Wire and patch method of moments models of coaxial to arbitrary waveguide transitions," *IEEE Antennas Propag. Soc. AP-S Int. Symp.*, vol. 3 B, no. August, pp. 251–254, 2005.
- [12] P. N. Laina, "Design of a rectangular waveguide connected biosensor for frequencies from 220 to 1100 GHz," 2015.
- [13] S. Results, "Design and Test of a 3D Printed Horn

- Antenna Design and Test of a 3D Printed Horn Antenna,” pp. 14–17, 2015.
- [14] P. M. Plastic and H. T. Reliability, “RF / Microwave High-Reliability,” vol. 45, no. 2, 2018.
- [15] Kontributor Wikipedia. "Base Transceiver Station." *Wikipedia, Ensiklopedia Bebas*. 12 April 2023.
- [15] T. Peneliti and P. Sdppi, *Studi Lanjutan 5G Indonesia 2018 Spektrum Outlook dan Use Case untuk Layanan 5G Indonesia*. 2018.
- [16] Kominfo, PDSI. "Siaran Pers No. 14/HM/KOMINFO/01/2022 Tentang Menkominfo Tegaskan Frekuensi 5G Di Indonesia Tak Ganggu Penerbangan." Website Resmi Kementerian Komunikasi Dan Informatika RI. 2022.
- [17] S. A. Amalia, “Perancangan Dan Analisis Antena Superstrate Dengan Substrate Integrated Waveguide Untuk Teknologi 5G,” 2022.

