

**PERANCANGAN DAN REALISASI PANDU GELOMBANG PERSEGI PANJANG  
PADA FREKUENSI 2,4 GHz DENGAN MENGGUNAKAN 3D PRINTING  
DESIGN AND REALIZATION OF RECTANGULAR WAVEGUIDES AT 2.4 GHz  
FREQUENCY USING 3D PRINTING**

Muhammad Elsandrie Rakatama<sup>1</sup>, Dharu<sup>2</sup>, Edwar<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Universitas Telkom, Bandung

muhammadelsandrie@students.telkomuniversity.ac.id<sup>1</sup>, dharuarseno@telkomuniversity.ac.id<sup>2</sup>,  
edwarm@telkomuniversity.ac.id<sup>3</sup>

**Abstrak**

Sekarang kita sedang berada pada masa industri 4.0 dimana semua bidang produksi sudah bisa dibilang masuk ke sistem otomatis. Salah satu contoh metode dalam percetakan suatu alat yang sering digunakan yaitu adalah 3D printing. Dalam mencetak suatu alat atau benda tertentu, 3D printing mestinya dapat dihunukan dalam mencetak alat-alat telekomunikasi. Pada penelitian Tugas Akhir ini dirancang *rectangular waveguide* menggunakan metode 3D printing dengan bahan penyusun dari plastik jenis *polylactic acid*. Perancangan *rectangular waveguide* pada tugas akhir ini menggunakan mode TE<sub>10</sub> yang artinya menggunakan orde  $m=1$ ,  $n=0$ . Diameter *rectangular waveguide* adalah  $a = 62$  mm,  $b = 20$  mm, dan panjangnya 124 mm. Ketebalan *rectangular waveguide* adalah 0,5 mm. Dengan frekuensi *cutoff* 2,41 GHz, *rectangular waveguide* ini hanya efektif melewati sinyal pada hasil simulasi 2,7-3,35 GHz dengan *bandwidth* 640 Mhz. Nilai VSWR terendah yang diperoleh dari simulasi konvensional adalah 1,1 pada frekuensi 3 GHz. Nilai impedansi tertinggi diperoleh dari realisasi 3D printing yaitu 118,95  $\Omega$ . Sedangkan nilai impedansi terendah diperoleh sebesar 30,57  $\Omega$ . Panjang gelombang rata-rata dalam *rectangular waveguide* adalah 0,15 m. Impedansi karakteristik pada saluran transmisi *rectangular waveguide* ini memiliki nilai rata-rata 176  $\Omega$ . Nilai rata-rata rugi-rugi dielektrik dari penelitian ini adalah  $1,78 \times 10^{10}$  dB/m dan nilai rata-rata *loss* permukaan kulit adalah 0,01452  $\Omega$ /m.

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

**Abstract**

Now we are in the industrial era 4.0 where all fields of production can be said to have entered into an automated system. One example of a method in printing a tool that is often used is 3D printing. In printing a certain object, 3D printing can be used in printing telecommunications equipment. This can affect the manufacture of previous telecommunications equipment that was made manually. In a previous study, rectangular waveguides were made using the 3D printing method using an air-filled metal material called MPRW (Metal Pipe Rectangular Waveguides). In further research, to add scientific references and explore materials, plastic materials will be used for the manufacture of rectangular waveguides in order to minimize the price. In this final project, a rectangular waveguide is designed using the 3D printing method with the constituent material of polylactic acid plastic. The design of the rectangular waveguide in this final project uses TE<sub>10</sub> mode, which means using the order  $m=1$ ,  $n=0$ . The diameter of the rectangular waveguide is  $a = 62$  mm,  $b = 20$  mm, and the length is 124 mm. The thickness of the rectangular waveguide is 0.5 mm. With a cutoff frequency of 2.41 GHz, this rectangular waveguide is only effective in passing signals from the simulation results from 2.7 to 3.35 GHz with a bandwidth of 640 Mhz. The lowest VSWR value obtained from conventional simulations is 1.1 at a frequency of 3 GHz. The highest impedance value obtained from the realization of 3D printing is 118.95 . While the lowest impedance value is obtained at 30.57  $\Omega$ . The average wavelength in a rectangular waveguide is 0.15 m. The characteristic impedance of this rectangular waveguide transmission line has an average value of 176 . The average value of dielectric loss in this study is  $1.78 \times 10^{10}$  dB/m and the average value of skin surface loss is 0.01452  $\Omega$ /m.

**Keywords:** Waveguide, 3D Printing, Rectangular

**1. Pendahuluan**

Sekarang kita sedang berada pada masa industri 4.0 dimana semua bidang produksi sudah bisa masuk ke sistem otomatis. Salah satu contoh metode dalam percetakan suatu alat yang sering digunakan yaitu adalah 3D printing. Dalam mencetak suatu alat atau benda tertentu, 3D printing mestinya dapat dihunukan dalam mencetak alat-alat telekomunikasi. Hal ini dapat berpengaruh terhadap pembuatan alat telekomunikasi sebelumnya yang pembuatannya secara manual. Isi dari rongga pada *waveguides* biasanya adalah bahan dielektrik dengan rugi-rugi minim yang umumnya berupa udara kering. Pandu gelombang umumnya dimanfaatkan untuk saluran transmisi frekuensi gelombang mikro, sebagai saluran dari antena parabola menuju ke *transmitter* atau *receiver*, atau sebagai *feed elemen* [1].

Pada penelitian sebelumnya pandu gelombang yang dibuat dengan metode 3D printing menggunakan bahan logam berisi udara yang disebut MPRW (*Metal Pipe Rectangular Waveguide*) [2]. Logam yaitu bahan

dielektrik yang sangat efektif untuk memaparkan medan listrik, sehingga sering digunakan untuk pembuatan pandu gelombang dan antena. Pada penelitian selanjutnya untuk menambah referensi keilmuan dan mengeksplorasi bahan maka akan digunakan bahan plastik untuk pembuatan pandu gelombang agar meminimalisir harga [3].

Pada penelitian tugas akhir ini akan menggunakan metode 3D *printing* untuk pembuatan pandu gelombang persegi panjang dari bahan plastik yang akan digunakan sebagai standar pengukuran antena. Hasil pandu gelombang dari cetakan 3D juga sangat ringan dikarenakan terbuat dari plastik yang dilapisi dengan lapisan logam dan akan bekerja pada frekuensi *cutoff* 2.4 GHz dengan rentang frekuensi *S-band* [3].

Pada penyusunan Tugas Akhir ini membahas tentang uji coba metode untuk pembuatan pandu gelombang rectangular. Oleh karena itu, dibutuhkan pandu gelombang dengan bentuk proposional dan bahan yang tepat untuk memenuhi spesifikasi. Adapun manfaat dari penelitian ini yaitu dapat merancang dan merealisasikan pandu gelombang persegipanjang dengan menganalisa parameter yang telah ditentukan. Parameter yang akan diukur antaranya VSWR, impedansi karakteristik, dan panjang gelombang pada *waveguide rectangular*.

## 2. Dasar Teori

### 2.1 Waveguide (Pandu Gelombang)

*Waveguide* atau Pandu Gelombang merupakan sebuah alat yang dapat mengalirkan suatu gelombang atau bisa juga sebagai wadah untuk keluar masuknya gelombang dari media tertentu. Tujuan dari alat ini hanya untuk mengalirkan energi dari output pemancar ke antena. Karakteristik listrik dari jalur transmisi *waveguide* tergantung pada pembangunan jalur [4]. Efek dari reaktif induktif dan kapasitif garis tergantung pada frekuensi yang diterapkan. Karena tidak ada dielektrik yang sempurna, elektron berhasil berpindah dari satu konduktor ke konduktor lainnya melalui dielektrik.

### 2.2 Mode Propagasi Dalam Waveguide

Perambatan gelombang di dalam *waveguides* pada dasarnya berasal dari 2 mode. Namun, secara keseluruhan pada dasarnya ada 3 mode, yaitu sebagai berikut [4]:

1. *Transverse Electric Wave* : Dalam mode perambatan gelombang ini, komponen medan listrik benar-benar melintang ke arah perambatan gelombang sedangkan medan magnet tidak sepenuhnya melintang ke arah perambatan gelombang. Ini sering dinamakan sebagai mode TE dengan ketentuan  $E_z = 0 ; H_z \neq 0$
2. *Transverse Magnet Wave* : Dalam mode perambatan gelombang ini, komponen medan magnet benar-benar melintang ke arah perambatan gelombang sementara medan listrik tidak sepenuhnya melintang ke arah perambatan gelombang. Ini sering dinamakan sebagai mode TM dengan ketentuan  $E_z \neq 0 ; H_z = 0$
3. *Transverse Electromagnetic Wave* : Dalam mode perambatan gelombang ini, baik komponen yang ada yaitu, medan listrik dan magnet benar-benar melintang ke arah perambatan gelombang. Ini sering dinamakan sebagai mode TEM dengan ketentuan  $E_z = H_z = 0$

### 2.3 Waveguide Rectangular

*Rectangular Waveguides* adalah tabung logam persegi Panjang di mana gelombang elektromagnetik disebarkan dan dikurung oleh tabung. *Waveguides* tidak mampu mentransmisikan mode elektromagnetik melintang yang ditemukan dalam garis tembaga dan harus menggunakan beberapa mode lain. Bentuk dari *waveguide* yaitu bermacam-macam mengikuti medan atau kondisi alam yang akan dipasangkan dengan sebuah jalur transmisi. Salah satu bentuk *waveguide* yang umum atau cukup sering digunakan yaitu *waveguide rectangular*. Bentuk dari *waveguide* dapat mempengaruhi dari hasil yang diperlukan untuk kepentingan tertentu. Struktur bentuk *waveguide rectangular* dapat dilihat seperti gambar dibawah ini [4]:

Selanjutnya, kita dapat merancang *waveguides* persegi panjang menggunakan program ini. Jika pengguna memasukkan properti media dan frekuensi, yang dengannya kita ingin *waveguides* persegi panjangnya untuk *mobile*, program ini merancang *waveguides* persegi panjang dengan dimensi sehingga frekuensi yang diberikan disisipkan di tengah mode TE<sub>10</sub> dan TE<sub>20</sub>. Frekuensi *cutoff* bawah untuk mode tertentu dalam *waveguides* persegi panjang ditentukan oleh persamaan berikut [5]:

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

Selain dapat menghitung Frekuensi *cutoff* bawah kita juga dapat menghitung panjang *waveguide rectangular* dengan persamaan :

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

### 2.4 Metode 3D Printing

Printer 3D merupakan alat cetak yang berkaitan dengan kondisi revolusi industri 4.0. Ilmuwan Jepang Dr. Kodama mulai membuat *printer* 3D pada tahun 1980. Perkembangan printer 3D yang ditemukan sejak 1980, terbukti baru bisa masuk ke Indonesia pada 2010. Dari pembahasan beberapa produk dan hasil penelitian

*printer* 3D masih sedikit [2]. Sejak penemuan *printer* 3D ini telah mengembangkan beberapa jenis *printer* 3D. Ada beberapa jenis *printer* 3D berdasarkan bahan yang digunakan sebagai bahan produk. Jenis *printer* 3D dapat didasarkan pada metode pembentukan produk.

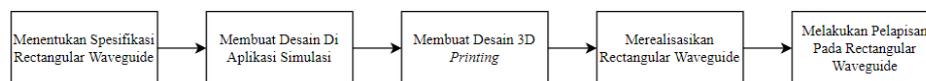
### 2.5 Transisi Waveguide Terhadap Coaxial

Suatu *waveguide* adalah alat penghubung gelombang yang merupakan komponen pasif, itu artinya *waveguide* memerlukan pembangkit sinyal atau antenna agar *waveguide* ini dapat bekerja. Yang paling umum yaitu menggunakan adaptor untuk menghubungkan ke pembangkit sinyal atau pun antenna dan sejenisnya. Selain menggunakan adaptor *waveguide* juga dapat dicatu menggunakan kabel *coaxial*. Dalam transisi *coaxial* terhadap *waveguide* digunakan kawat tebal sebagai pengganti adaptor yang sering digunakan. Penggunaan kawat agar dapat lebih akurat dalam medan listrik dan medan magnet [6].

## 3. PERANCANGAN DAN SIMULASI SISTEM

### 3.1 Desai Sistem

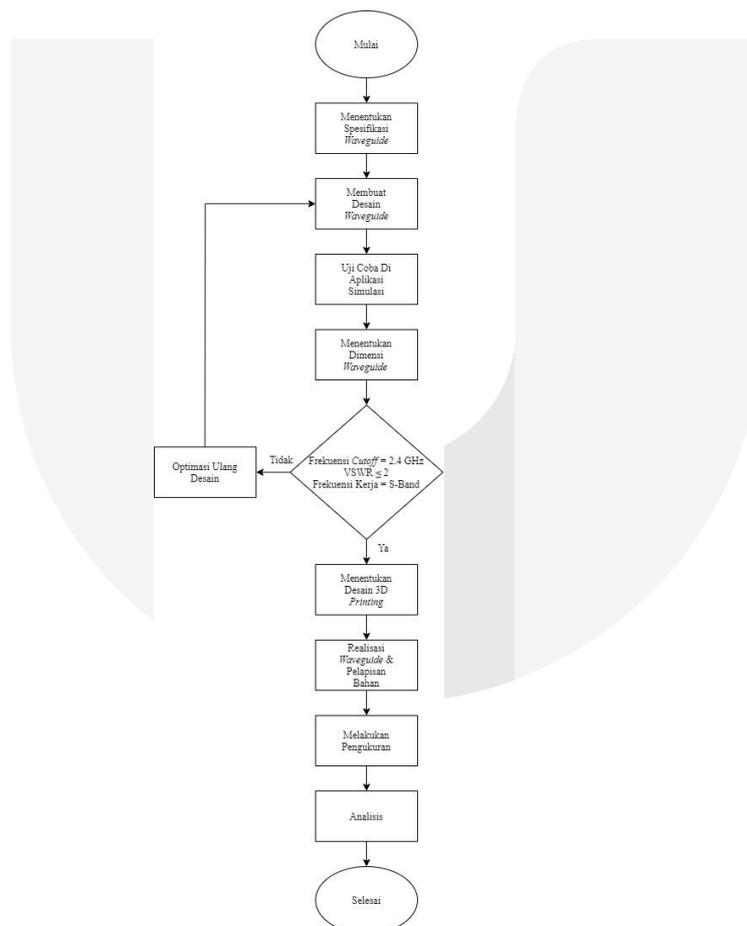
Pada penelitian tugas akhir ini Akan merancang *waveguides rectangular* dengan metode *3D printing* ditujukan untuk penggunaan sebagai filter. Didalam kasus ini *waveguides* dengan frekuensi *cutoff* 2.4 GHz. Aplikasi yang akan digunakan dalam simulasi perancangan *waveguides* adalah aplikasi simulasi.



Gambar 3.1 Blok diagram arsitektur perancangan

### 3.2 Sistematika Pembuatan Waveguide Rectangular

Pada gambar 3.2 di bawah dapat dilihat diagram alir dari perancangan sistem.



Gambar 3.2 Diagram alir pembuatan waveguide

Dari gambar 3.2 diatas kita dapat melihat berbagai macam proses yang harus dilakukandalam pembuatan *waveguides* ini. Diawali dengan penentuan spesifikasi dari *waveguides* nya itu sendiri maka harus sesuai dengan

kebutuhan pengaplikasiannya. Dengan begitu proses simulasi menggunakan aplikasi simulasi dapat dilakukan sebagaimana nantinya dapat mempengaruhi desain *waveguides*.

### 3.3 Spesifikasi *Waveguide Rectangular*

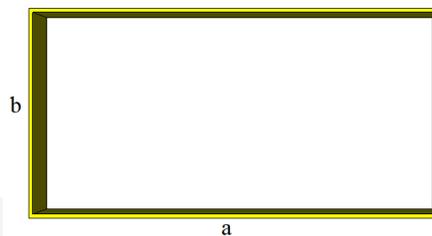
Dalam pembuatan suatu alat tentunya alat tersebut harus mempunyai spesifikasi yang spesifik. Berikut merupakan spesifikasi *waveguides* yang akan dibuat dalam pengerjaan tugas akhir ini :

**Tabel 3.1** Nilai diameter desain *waveguide rectangular*

Parameter	Nilai
Frekuensi <i>Cutoff</i>	2,4 GHz
VSWR	$\leq 2$
Frekuensi Kerja	<i>S-Band</i>

### 3.4 Desain *Waveguide Rectangular*

Pada bagian ini akan membahas mengenai desain dari *waveguide rectangular* dan plastik *waveguide rectangular* konvensional untuk pembandingan dari metode *3D printing*. Untuk menyelesaikan tugas akhir ini penulis harus menyelesaikan dalam pembuatan *waveguides rectangular*. Maka dari itu harus ada terlebih dahulu suatu desain awal untuk pengerjaan tugas akhir ini. Disini perancangan awal desain dilakukan didalam aplikasi simulasi.

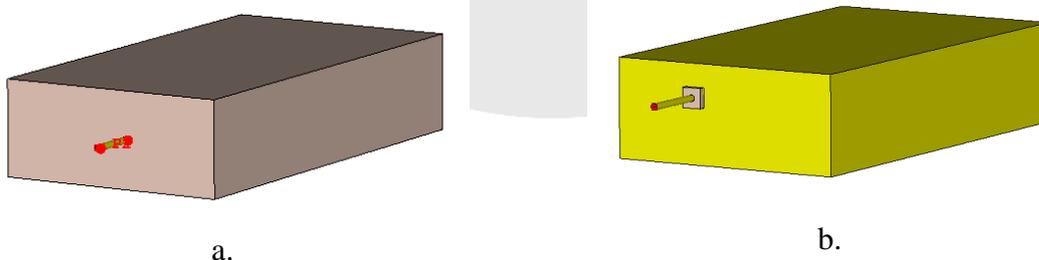


**Gambar 3.3** Perancangan *waveguide rectangular* menggunakan aplikasi simulasi

**Tabel 3.2** Nilai diameter desain *waveguide rectangular*

Nilai Parameter <i>Waveguide Rectangular</i>		
Nama	Parameter	Nilai
Lebar	a	60 mm
Tinggi	b	20 mm
Panjang	x	124 mm
Jumlah Variasi Orde	m	1
Jumlah Variasi Orde	n	0

Dari tabel ini dapat kita ketahui lebar, tinggi, dan panjang dari *waveguide rectangular*. Panjang diameter ini yang akan digunakan pada semua desain dari simulasi pada aplikasi simulasi perancangan *waveguide rectangular*.



**Gambar 3.4** Desain simulasi *waveguide rectangular* (a.) Dengan pelapisan *3D printing* (b.) Tanpa pelapisan *3d printing*

### 3.5 Realisasi Dan Pelapisan Bahan Konduktor Pada *Waveguide* (Metalisasi)

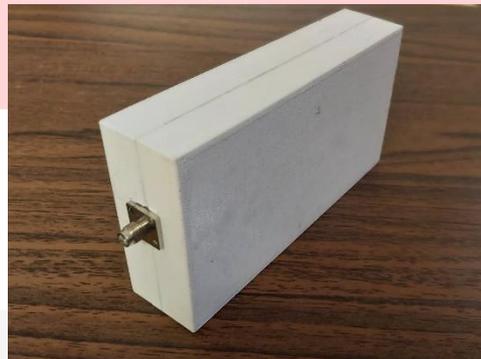
Maka bagian-bagian dalam dari *waveguide* akan dilapisi dengan selotip (*tape*) logam yang sangat tipis berukuran 0,006 mm, ia memiliki konstanta dielektrik ( $\epsilon_r$ )  $\sim 2,8$  dan tangen kerugian ( $\tan\delta$ )  $\sim 0,04$  yang diukur

selama rentang frekuensi 2 - 4 GHz. Resin berwarna bening dan putih digunakan di sini dalam fabrikasi *waveguides* [13].

Setelah *rectangular waveguide* dicetak dengan mesin *3D printing* maka dilakukan proses pelapisan pada bagian dalam *rectangular waveguide* menggunakan selotip berbahan tembaga. Pada bagian dalam dari *rectangular waveguide* harus semuanya terlapisi oleh selotip tembaga. Proses ini dapat kita lihat pada gambar di bawah ini.



**Gambar 3.5** Bagian dalam dari *rectangular waveguide* setelah dilapisi oleh selotip  
Proses Terakhir merupakan proses penggabungan dari *rectangular waveguide* menjadi satu kesatuan, seperti pada gambar di bawah.



**Gambar 3.6** Realisasi dari *rectangular waveguide* dengan metode *3D printing*

#### 4. Hasil dan Analisis

##### 4.1 VSWR

Tabel dibawah merupakan hasil simulasi dan pengukuran realisasi dari perancangan *waveguide rectangular*. Rentang frekuensi yang dianalisis dari 2.6 - 3.7 GHz. Dari hasil ini kita dapat mengetahui nilai VSWR ketika pada frekuensi tertentu dengan metode *3D printing* dan konvensional.

**Tabel 4.1** Perbandingan VSWR Setiap Desain *Waveguide Rectangular*

Perbandingan VSWR Setiap Desain <i>Waveguide Rectangular</i>				
no	Frekuensi (GHz)	Simulasi Konvensional	Simulasi 3D <i>Printing</i>	Realisasi 3D <i>Printing</i>
1	2,6	2,5	3,5	5,52
2	2,7	1,89	2,61	1,34
3	2,8	1,46	2	4,92
4	2,9	1,17	1,6	6,19
5	3	1,1	1,39	2,47
6	3,1	1,27	1,38	1,78
7	3,2	1,5	1,5	7,52
8	3,3	1,77	1,63	5,28
9	3,4	2,06	1,74	1,91
10	3,5	2,34	1,86	3,18
11	3,6	2,59	2,04	3,92
12	3,7	2,81	2,28	2,39

##### 4.2 Impedansi

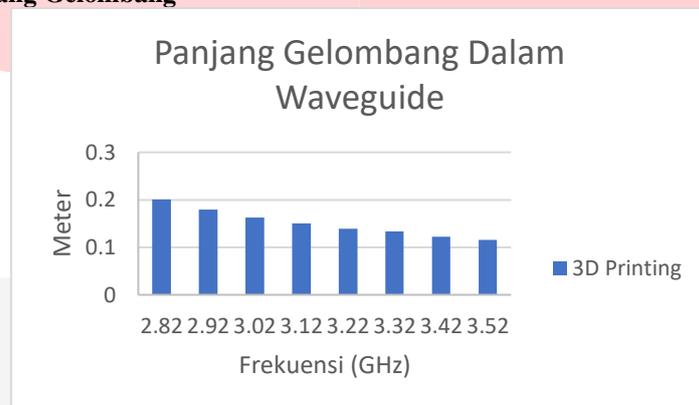
Hasil-hasil impedansi simulasi *waveguide rectangular* konvensional, *3D printing*, dan realisasi *3D printing* dapat kita lihat perbandingannya dari tabel dibawah ini.

**Tabel 4.3** Perbandingan Impedansi Setiap Desain *Waveguide Rectangular*

Perbandingan Impedansi Setiap Desain <i>Waveguide Rectangular</i>
---

no	Frekuensi (GHz)	Simulasi Konvensional ( $\Omega$ )	Simulasi 3D Printing ( $\Omega$ )	Realisasi 3D Printing ( $\Omega$ )
1	2,7	37,24	32,65	10,92
2	2,8	35,68	34,23	20,04
3	2,9	34,16	35,58	66,65
4	3	32,63	36,09	51,62
5	3,1	31,41	34,1	22,97
6	3,2	30,88	31,94	74,35
7	3,3	31,13	30,57	118,95
8	3,4	31,98	29,58	25,19
9	3,5	33,21	28,54	65,5
10	3,6	34,59	27,32	78,22
11	3,7	36,01	26	2,09

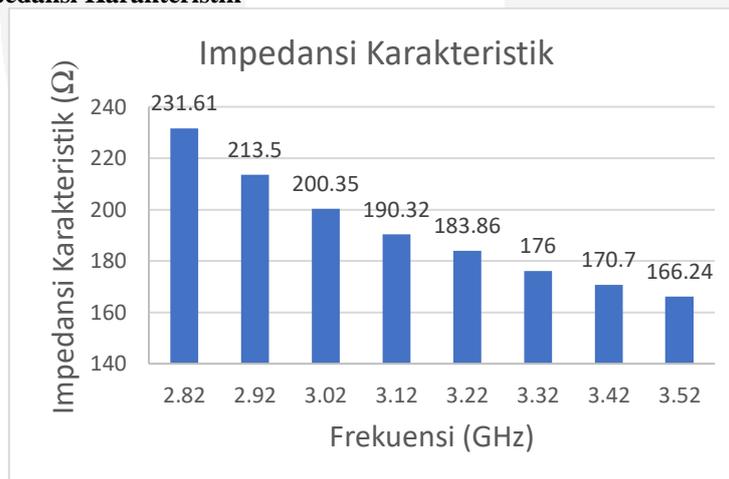
#### 4.3 Pengukuran Panjang Gelombang



**Gambar 4.1** Panjang Gelombang Dalam *Waveguide Rectangular*

Dapat kita simpulkan semakin tinggi nilai frekuensi operasi maka panjang gelombang pada saluran transmisi semakin pendek. Panjang gelombang terpanjang terjadi pada frekuensi 2.82 GHz dengan panjang 0.203 m. Sedangkan panjang gelombang terpendek pada frekuensi 3.52 dengan nilai 0.116 m.

#### 4.4 Pengukuran Impedansi Karakteristik



**Gambar 4.2** Impedansi Karakteristik Dalam *Waveguide Rectangular*

Menurut gambar grafik diatas semakin besar frekuensi maka semakin kecil suatu nilai impedansi karakteristiknya. Dapat dilihat impedansi yang paling besar pada frekuensi 2.82 GHz dengan nilai 231.61  $\Omega$ . Sedangkan impedansi karakteristik terkecil menurut gambar diatas pada 3.52 GHz dengan nilai 166.24  $\Omega$ . Semakin besar nilai frekuensi maka selisih dari nilai impedansi semakin kecil.

#### 4.5 Perhitungan Rugi-rugi *Rectangular Waveguide*

Mengenai nilai dari rugi-rugi dielektrik dan rugi-rugi permukaan kulit dari hasil yang didapatkan paling rugi-rugi paling besar didapatkan dari rugi-rugi dielektrik. Dapat dilihat dari tabel dibawah ini.

Tabel 4.4 Rugi-rugi Pada *Rectangular Waveguide*

Frekuensi (GHz)	Rugi-rugi Pada <i>Rectangular Waveguide</i>	
	Dielektrik (dB/m)	Rugi-rugi Permukaan Kulit (Ohm/m)
2,7	$2,45 \times 10^{10}$	0,01336
2,8	$2,18 \times 10^{10}$	0,01361
2,9	$2 \times 10^{10}$	0,01385
3	$1,87 \times 10^{10}$	0,01408
3,1	$1,77 \times 10^{10}$	0,01432
3,2	$1,69 \times 10^{10}$	0,01455
3,3	$1,63 \times 10^{10}$	0,01477
3,4	$1,58 \times 10^{10}$	0,01499
3,5	$1,54 \times 10^{10}$	0,01521
3,6	$1,5 \times 10^{10}$	0,01543
3,7	$1,47 \times 10^{10}$	0,01564

## 5. Kesimpulan dan Saran

### 5.1 Kesimpulan

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

1. Perancangan *rectangular waveguide* pada Tugas Akhir ini menggunakan mode TE<sub>10</sub> yang artinya menggunakan orde  $m=1$ ,  $n=0$ .
2. Frekuensi *cutoff* yang diperoleh adalah 2,41 GHz. *rectangular waveguide* adalah  $a = 62$  mm,  $b = 20$  mm, dan panjangnya 124 mm.
3. Nilai VSWR terendah yang diperoleh dari simulasi konvensional adalah 1,1 pada frekuensi 3 GHz. Sedangkan hasil VSWR terendah dari simulasi 3D *printing* adalah 1,38 dan realisasinya 1,34.
4. Nilai impedansi tertinggi diperoleh dari realisasi 3D *printing* yaitu 118,95  $\Omega$ . Sedangkan nilai impedansi terendah diperoleh sebesar 30,57  $\Omega$ .
5. Panjang gelombang rata-rata dalam *rectangular waveguide* adalah 0,15 m.
6. Impedansi karakteristik pada saluran transmisi *rectangular waveguide* ini memiliki nilai rata-rata 176  $\Omega$ .
7. Nilai rata-rata rugi-rugi dielektrik dari penelitian ini adalah  $1,78 \times 10^{10}$  dB/m.
8. Nilai rata-rata *loss* permukaan kulit dari penelitian ini adalah 0,01452  $\Omega$ /m.

### 5.2 Saran

Dikarenakan terdapat hasil yang masih bisa dikembangkan dalam penelitian berikutnya maka ada beberapa poin yang dapat dijadikan saran.

1. Untuk pengujian *rectangular waveguide*, Anda dapat menggunakan adaptor yang sesuai dengan jenis *rectangular waveguide*.
2. Pemilihan dan penempatan konektor dapat dipasang lebih baik dan lebih tepat.
3. Desain pada saat pencetakan harus diatur agar tidak ada kebocoran sinyal dan lapisan kulit bagian dalam *rectangular waveguide*.
4. Coba menggunakan copper spray (cat yang mengandung unsur tembaga).

## Referensi

- [1] M. D. Auria *et al.*, “3-D Printed Metal-Pipe Rectangular Waveguides,” pp. 1–11, 2015.
- [2] G. P. Le Sage, “3D Printed Waveguide Slot Array Antennas,” *IEEE Access*, vol. 4, pp. 1258–1265, 2016, doi: 10.1109/ACCESS.2016.2544278.
- [3] P. Antena, “Design and Realization of Double-Ridged Horn Antenna for Standard Antenna,” vol. 4, no. 3, 2018.
- [4] J. Weiner, F. Nunes, J. Weiner, and F. Nunes, “Transmission Lines and Waveguides,” *Light. Interact.*, pp. 154–210, 2017, doi: 10.1093/acprof:oso/9780198796664.003.0008.
- [5] M. Q. Khairuzzaman, *Pozar. Microwave Engineering*, vol. 4, no. 1. 2016.
- [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, doi: 10.1109/TMTT.2019.2944355.
- [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, doi: 10.1007/978-94-011-4689-0\_11.
- [9] O. A. Saputra, *Pengoperasian Mesin Cetak 3D*, no. December. 2019.
- [10] 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, doi: 10.1109/APS.2005.1552485.
- [11] P. N. Laina, “Design of a rectangular waveguide connected biosensor for frequencies from 220 to 1100 GHz,” 2015.
- [12] S. Results, “Design and Test of a 3D Printed Horn Antenna Design and Test of a 3D Printed Horn Antenna,” pp. 14–17, 2015.
- [13] P. M. Plastic and H. T. Reliability, “RF / Microwave High-Reliability,” vol. 45, no. 2, 2018.