

Peningkatan Persentase Lebar Pita Antena 5G *Substrate Integrated Waveguide* dengan Slot *Dumbbell*

DIAN WIDI ASTUTI¹, SRI ARTHA TOGATOROP¹, MUSLIM MUSLIM¹, YUS
NATALI²

¹Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Mercu Buana
Jakarta, Indonesia

²Teknik Telekomunikasi, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom
Jakarta, Indonesia

Email dian.widiastuti@mercubuana.ac.id

Received 27 Februari 2024 | *Revised* 7 Mei 2024 | *Accepted* 14 Mei 2024

ABSTRAK

Antena Substrate Integrated Waveguide (SIW) konvensional memiliki lebar pita impedansi yang sempit. Penelitian ini mengusulkan perbaikan lebar pita impedansi antena SIW dengan mempergunakan slot dumbbell elips. Penempatan slot dumbbell elips menyebabkan bergabungnya dua mode TE SIW yang berdekatan. Gabungan dua mode TE SIW tersebut menyebabkan impedansi lebar pita menjadi lebih lebar dari sebelumnya. Hasil pengukuran lebar pita impedansi dari antena yang diusulkan memperlihatkan hasil yang sama persis dengan hasil simulasi yaitu sebesar 110 MHz pada rentang frekuensi 3,42 – 3,53 GHz. Desain frekuensi dari antena ini sesuai dengan frekuensi 5G yang diterapkan di Indonesia.

Kata kunci: peningkatan persentase lebar pita, antena substrate integrate waveguide, slot dumbbell elips, dua frekuensi resonansi

ABSTRACT

The conventional Substrate Integrated Waveguide (SIW) antennas often exhibit a narrow impedance bandwidth. This research proposes an improvement in the impedance bandwidth of SIW antennas by utilizing dumbbell ellipsoidal slots. The placement of dumbbell ellipsoidal slots results in the coupling of two adjacent TE modes in the SIW. The combination of these two TE modes leads to a broader impedance bandwidth compared to the conventional design. The measured impedance bandwidth of the proposed antenna shows results consistent with simulation, specifically at 110 MHz within the frequency range of 3.42 to 3.53 GHz. This design frequency aligns with the 5G frequency range implemented in Indonesia.

Keywords: bandwidth enhancement, substrate integrated waveguide antenna, dumbbell ellipsoidal slots, dual frequencies resonance

1. PENDAHULUAN

Salah satu jenis antena dari bahan mikrostrip adalah antena *Substrate Integrated Waveguide* (SIW). Konsep dasar dari antena SIW berasal dari saluran transmisi *waveguide* yang diimplementasikan ke antena berbahan mikrostrip **(Bozzi, dkk, 2009) (Cassivi, dkk, 2002) (Deslandes & Wu, 2006) (Djerafi, dkk, 2015)**. Antena SIW konvensional memiliki karakteristik *insertion loss* yang sangat kecil sehingga memiliki lebar pita impedansi yang sempit **(Djerafi, dkk 2015)**. Selain dari pada itu, implementasi *waveguide* pada bahan mikrostrip dengan ketebalan yang tipis semakin membuat antena SIW memiliki lebar pita impedansi yang sempit dibandingkan dengan antena *waveguide* berbahan logam **(Luo, dkk 2008)**. Oleh karena itu penelitian peningkatan persentase lebar pita impedansi pada antena SIW perlu dilakukan.

Antena SIW dapat dibagi menjadi antena *horn* SIW, antena *multibeam* **(Hao, dkk 2024) (Nayak & Patnaik, 2017) (Padilla, 2022)** dan antena SIW slot tunggal **(Paliwal, dkk, 2023) (Sepryanto, dkk, 2020)**. Antena Horn SIW biasanya memiliki bentuk seperti tanduk (*horn*) dan menggunakan struktur SIW untuk membimbing gelombang elektromagnetik. Struktur ini membantu dalam mengurangi rugi-rugi sinyal dan memberikan kekompakan dalam desain antena. Adapun bentuk fisik yang menyerupai tanduk atau corong (*horn*) pada antena *Horn* SIW tersebut membantu dalam mendireksikan pola radiasi sinyal. Sehingga desain *Horn* dapat meningkatkan efisiensi radiasi antena dengan gain yang tinggi. Antena Horn SIW dapat dirancang untuk berbagai frekuensi tergantung pada aplikasinya dan spesifikasi komunikasi atau sistem radar yang diinginkan.

Antena *multibeam* SIW adalah jenis antena yang memanfaatkan teknologi SIW untuk mendukung pengiriman dan penerimaan sinyal dalam beberapa arah atau sudut secara simultan. Antena *multibeam* dirancang untuk menghasilkan pola radiasi yang mencakup beberapa balok atau sudut, meningkatkan kapasitas sistem dan cakupan area. Adapun *beamforming* yang dilakukan dapat secara elektronik (dengan mengatur fase sinyal di setiap elemen antena) atau secara mekanik dengan menggerakkan seluruh *array* antena. Dengan kemampuan penyediaan cakupan area yang lebih luas dan melayani beberapa arah secara bersamaan, antena *multibeam* SIW dapat meningkatkan kapasitas jaringan dan efisiensi penggunaan spektrum frekuensi. Antena *multibeam* SIW umumnya digunakan dalam sistem komunikasi nirkabel dan radar di mana memerlukan cakupan yang luas, kemampuan pelacakan objek dari berbagai arah, atau peningkatan kapasitas jaringan. Keuntungan dari antena *multibeam* SIW melibatkan kemampuannya untuk menyediakan solusi komunikasi dan radar yang lebih canggih, terutama dalam lingkungan dengan kebutuhan cakupan yang dinamis dan tinggi **(Hao, dkk, 2024) (Nayak & Patnaik, 2017) (Padilla, 2022)**.

Antena slot SIW (*Substrate Integrated Waveguide*) adalah jenis antena yang memanfaatkan teknologi SIW untuk mencapai pola radiasi tertentu dengan menggunakan slot (celah) yang terintegrasi dalam struktur gelombang mikro di dalam substrat dielektrik, seperti *Printed Circuit Board* (PCB). Slot merupakan celah atau pembukaan dalam struktur SIW yang digunakan untuk memanipulasi pola radiasi antena. Lokasi, bentuk, dan ukuran slot dapat disesuaikan untuk memenuhi kebutuhan aplikasi tertentu. Antena slot SIW sering kali digunakan untuk merancang antena yang memiliki karakteristik khusus dalam hal pola radiasi, impedansi, dan kinerja lainnya. Sehingga desain antena slot SIW tertentu memungkinkan pencapaian pola radiasi tertentu, seperti pola radiasi *directional*, *omnidirectional*, atau bahkan pola radiasi yang dioptimalkan untuk aplikasi tertentu. Antena slot SIW dapat dirancang untuk berbagai rentang frekuensi tergantung pada kebutuhan aplikasi. Desain ini dapat diterapkan dalam berbagai frekuensi, termasuk frekuensi gelombang mikro dan lainnya, termasuk sistem komunikasi

nirkabel, radar, sensor, dan aplikasi lainnya di mana perluasan pola radiasi atau karakteristik khusus diperlukan (**Paliwal, dkk, 2023**) (**Sepryanto, dkk, 2020**).

Antena SIW slot tunggal pertama kali dikembangkan oleh (**Luo, dkk, 2008**) pada tahun 2008. Kemudian setelah itu berkembang penelitian miniaturisasi (**Astuti & Rahardjo, 2018a**) (**Lajevardi & Kamyab, 2017**) (**Saghati, dkk, 2017**), peningkatan persentase lebar pita (**Cai, dkk, 2020**) (**Xiang, dkk, 2020**), meningkatkan gain (**Aqlan, dkk, 2016**) (**Mukherjee & Biswas, 2018**), polarisasi melingkar (**Ji, dkk, 2022**) (**Li, dkk, 2021**) (**Li, dkk, 2022**) (**Zerfaine & Djerafi, 2021**), *diplexing* (**Chaturvedi & Kumar, 2024**) (**Iqbal, dkk, 2021**), *triplexing* (**Dash, dkk, 2020**) (**Mukherjee, dkk, 2021**), *quadruplexing* (**Iqbal, dkk, 2021**) dan lain sebagainya.

Antena slot SIW yang terbuat dari bahan mikrostrip ini memiliki beberapa keuntungan yaitu ringan, mudah fabrikasi dan tipis (**Luo, dkk, 2013**). Sedangkan sifat harfiah dari bahan mikrostrip yang tipis tersebut, menyebabkan antena slot SIW memiliki lebar pita impedansi yang sempit. Ada beberapa metode yang dapat dipergunakan untuk menyelesaikan masalah ini yaitu dengan membuang lapisan substrat (**Yun, dkk, 2012**), *dual cavity* (**Astuti, dkk, 2023**) (**Wu, dkk, 2016**), *Defected Ground Structure* (DGS) (**Astuti, dkk, 2023**), radiasi pada mode tertinggi (**Paliwal, dkk, 2023**), atau mengubah bentuk rongga SIW tradisional yang biasanya persegi (**Astuti, dkk, 2019**) (**Cheng, dkk, 2019**) (**Mukherjee, dkk, 2014**) (**Shi, dkk, 2017**) (**Wu, dkk, 2019**) atau lingkaran (**Cai, dkk, 2020**) (**Kim, dkk, 2011**), menjadi rongga yang berbentuk oval (**Xiang, dkk, 2020**), dan heksagonal (**Zhang & Xu, 2014**).

Penelitian ini mengusulkan penyelesaian masalah lebar pita impedansi yang sempit pada antena slot SIW dengan menghasilkan gabungan beberapa frekuensi resonansi yang berdekatan menjadi satu. Penelitian ini menghasilkan dua buah resonansi yang berdekatan dengan menggunakan slot berbentuk *dumbbell* elips. Slot *dumbbell* elips mengganggu mode *Transversal Electric* (TE) TE_{101} dan mode TE_{102} sehingga menimbulkan gabungan kedua mode TE untuk memperlebar pita impedansi dari antena. Peningkatan persentase lebar pita impedansi dengan mempergunakan slot *dumbbell* juga telah dilakukan sebelumnya oleh (**Cheng, dkk, 2019**) dan (**Sepryanto, dkk, 2020**) yang diimplementasikan pada frekuensi di atas 20 GHz. Namun slot *dumbbell* yang digunakan oleh penelitian tersebut memiliki desain yang cukup rumit serta penambahan radiasi lain yang dibangkitkan oleh slot *insert feed* yang miring. Sedangkan penelitian ini mengusulkan slot *dumbbell elips* yang lebih sederhana dibandingkan dengan penelitian sebelumnya.

Antena ini didesain pada frekuensi 3,42 – 3,53 GHz yang sesuai dengan penerapan frekuensi 5G di Indonesia (**"Menkominfo Tegaskan Frekuensi 5G di Indonesia Tak Ganggu Penerbangan," 2022**). Antena ini dapat dijadikan alternatif selain antena mikrostrip konvensional lainnya seperti (**Astuti, dkk, 2022**) (**Natali & Larasati, 2019**) yang sama-sama diimplementasikan pada frekuensi 5G.

2. METODE

2.1 Antena Slot *Substrate Integrated Waveguide* (SIW)

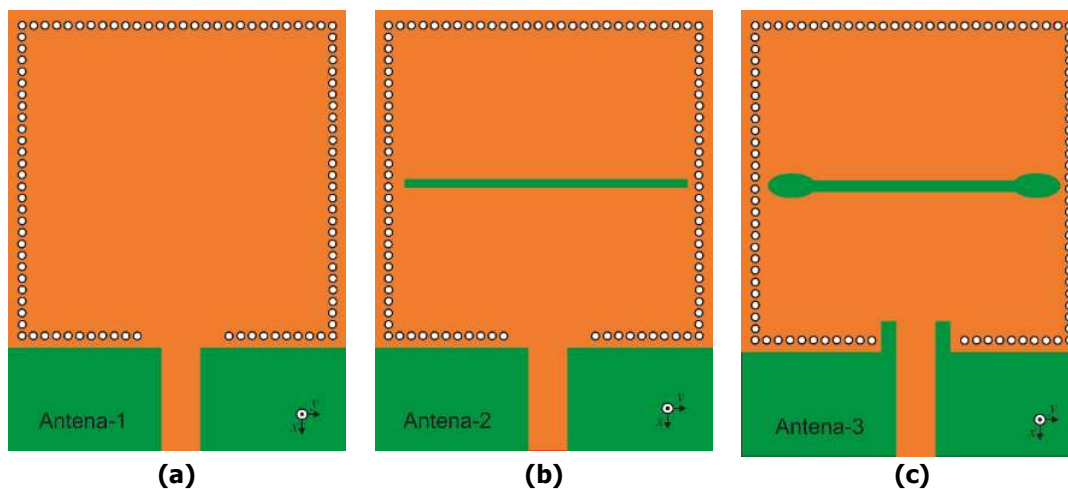
Desain antena SIW dimulai dengan Antena-1 seperti yang perlihatkan pada Gambar. 1. Adapun ukuran rongga persegi SIW dihitung berdasarkan frekuensi resonansi yang ingin digunakan. Dikarenakan antena SIW dirancang pada frekuensi 5G yang bekerja pada frekuensi tengah 3,5 GHz, maka dimensi rongga antena SIW dapat diperoleh dengan mempergunakan Persamaan (1) berikut ini (**Pozar, 2012**):

$$f_{mnp} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\epsilon\mu}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{L_{eff}}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{h}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{W_{eff}}\right)^2}. \quad (1)$$

Substrat yang dipergunakan pada desain antenna ini adalah substrat Rogers 5880 dengan spesifikasi diperlihatkan pada Tabel. 1. Adapun diameter lubang SIW (d) adalah 1 mm dengan jarak antara pusat lubang SIW yang berdekatan (p) adalah 1,5 mm. Pemilihan ini dilakukan dengan mempertimbangkan rugi-rugi pancaran gelombang elektromagnetik yang keluar dari celah antar lubang SIW (**Astuti & Rahardjo, 2018b**). Lubang SIW tersebut menghubungkan tembaga pada bagian atas dan bagian bawah substrat di mana bagian dalam dari setiap lubang SIW tersebut diisi oleh lapisan tembaga.

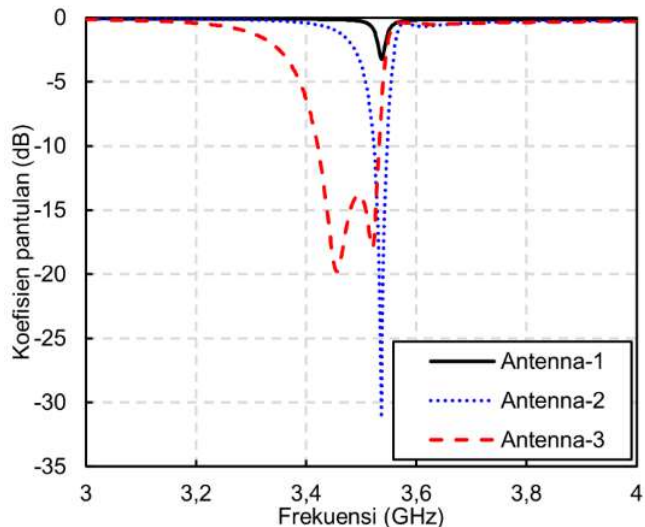
Tabel 1. Spesifikasi Substrat RO 5880

| Deskripsi | Dimensi |
|---|----------|
| Ketebalan substrat (h) | 1,575 mm |
| Permittivitas substrat (ϵ_r) | 2,2 |
| Loss tangent (δ) | 0,0009 |



Gambar 1. Evolusi Antena yang Diusulkan: (a) Antena SIW Tanpa Slot (Antena-1), (b) Antena SIW Konvensional (Antena-2), dan (c) Antena SIW dengan Slot *Dumbbell* Elips (Antena-3)

Pada Gambar 2 memperlihatkan simulasi parameter dari koefisien pantulan dari setiap evolusi antenna. Pada Gambar 2 tersebut memperlihatkan bahwa Antena-1 telah beresonansi pada frekuensi 3,54 GHz walaupun koefisien pantulannya masih besar atau mengalami kondisi belum *matching*. Kemudian Antena-1 tersebut diberi slot yang panjangnya melebihi setengah panjang gelombang dari frekuensi resonansi atau disebut juga antenna SIW konvensional. Pemberian celah slot tersebut menyebabkan gelombang elektromagnetik pada rongga SIW menjadi terpancar ke udara. Kondisi tersebut menyebabkan koefisien pantulan Antena-2 menjadi lebih kecil (-31,23 dB). Namun, Antena-2 tersebut memiliki lebar pita impedansi yang sempit yaitu hanya 30 MHz (3,52 – 3,55 GHz). Artinya Antena-2 ini memiliki persentase lebar pita impedansi sebesar 0,85%.

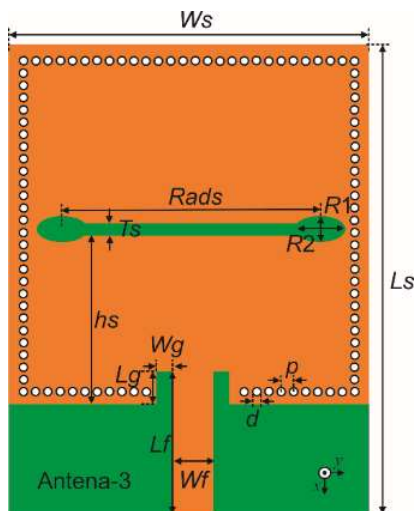


Gambar 2. Koefisien pantulan dari evolusi Antena-1, 2 dan 3.

2.2 Antena SIW Slot *Dumbbell* Elips

Kondisi sempitnya lebar pita impedansi pada Antena-2 diperbaiki dengan membuat slot persegi menjadi bentuk *dumbbell* berbentuk elips di setiap ujungnya dan perbaikan pencatuan dengan membuat celah gap (*insert feed*) menjadi Antena-3 seperti yang diperlihatkan pada Gambar 1. Antena-3 ini memiliki koefisien pantulan yang lebih besar dibandingkan dengan Antena-2 namun memiliki lebar pita impedansi yang jauh lebih lebar yaitu 110 MHz (3,42 – 3,53 GHz) seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2. Antena-3 memiliki persentase lebar pita sebesar 3,17%, yang artinya terjadi kenaikan persentase lebar pita sebesar 3,73 kali dari desain Antena-2.

Gambar 3 memperlihatkan dimensi Antena-3 yang diusulkan, sedangkan ukuran dari dimensi Antena-3 tersebut dituliskan pada Tabel. 2.



Gambar 3. Dimensi Antena-3 yang Diusulkan.

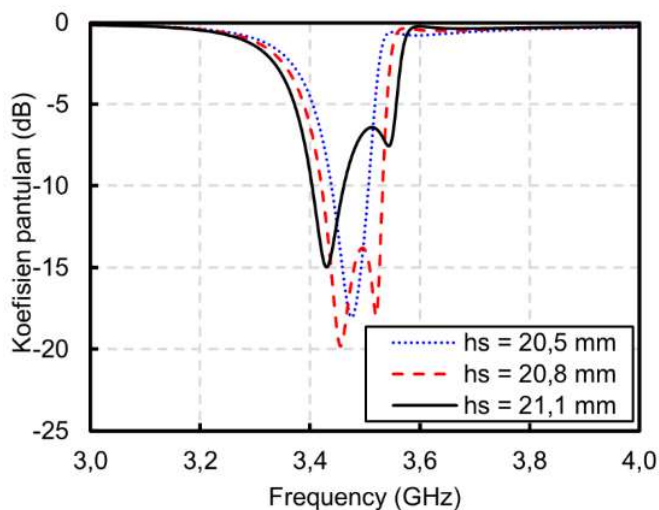
Tabel 2. Parameter Dimensi untuk Antena-3

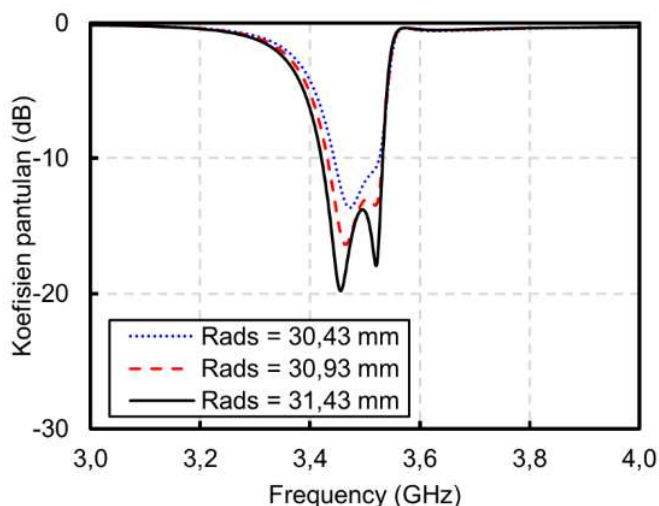
| Parameter | Dimensi (mm) | Deskripsi |
|-----------|--------------|--------------------------------|
| Ws | 44 | Lebar substrat |
| Ls | 57,5 | Panjang substrat |
| $Rads$ | 31,43 | Jarak antara pusat kedua elips |
| $R1$ | 3 | Sumbu minor elips |
| $R2$ | 6 | Sumbu mayor elips |
| hs | 20,8 | Tinggi slot |
| Ts | 1,2 | Tebal slot |
| Wg | 2 | Lebar <i>insert fed</i> |
| Lg | 4 | Panjang <i>insert fed</i> |
| Wf | 5 | Lebar pencatuan |
| Lf | 17,5 | Panjang pencatuan |

2.3 Studi Parameter Antena SIW Slot *Dumbbell* Elips

Peningkatan lebar pita impedansi pada desain Antena-3 dipengaruhi oleh beberapa parameter yaitu: posisi, panjang dan tebal slot *dumbbell* sehingga dapat menghasilkan dua frekuensi resonansi seperti yang diperlihatkan pada Gambar 4, 5 dan 6. Hasil gabungan dari dua frekuensi resonansi merupakan kombinasi kedua buah mode TE. Adapun pembahasan ini akan dibahas lebih dalam lagi pada sub distribusi medan listrik.

Gambar 4 memperlihatkan simulasi koefisien pantulan terhadap perubahan parameter dari ketinggian slot *dumbbell* dari posisi 20,5 sampai 21,1 mm. Pada ketinggian 20,5 mm diperoleh lebar pita impedansi sebesar 70 MHz yang beresonansi pada frekuensi 3,44 – 3,51 GHz atau persentase lebar pita impedansi sebesar 2,01%. Sedangkan pada ketinggian 20,8 mm, Antena-3 beresonansi pada rentang frekuensi 3,42 – 3,53 GHz. Apabila ketinggian slot digeser menjadi 21,1 mm, persentase lebar pita menjadi lebih kecil yaitu 1,75% (3,4 – 3,46 GHz). Oleh karena itu ketinggian slot *dumbbell* terbaik berada pada ketinggian 20,8 mm dengan nilai persentase lebar pita sebesar 3,17%.

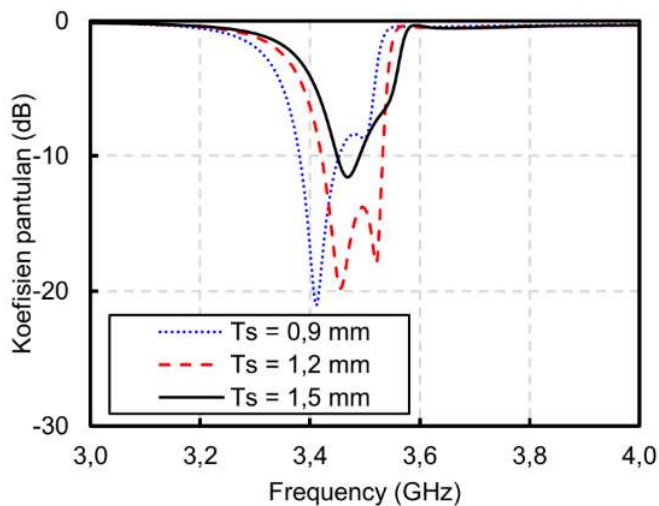
**Gambar 4. Studi Parameter Ketinggian Slot (hs) pada Antena-3**



Gambar 5. Studi Parameter Jarak Antar Pusat Elips (*Rads*) pada Antena-3

Gambar 5 memperlihatkan simulasi koefisien pantulan dari perubahan parameter panjang slot *dumbbell* dari 30,43 mm sampai 31,43 mm. Panjang slot *dumbbell* tersebut diukur dari jarak antar pusat elips. Saat panjang slot *dumbbell* 30,43, diperoleh lebar pita impedansi sebesar 90 MHz (3,44 – 3,53 GHz). Lebar pita impedansi semakin lebar saat panjang slot *dumbbell* menjadi 30,93 mm dan 31,43 mm. Adapun persentase lebar pita impedansi menjadi 2,87% (3,43 – 3,53 GHz) dan 3,17% (3,42 – 3,53 GHz). Dengan demikian pemilihan panjang slot pada 31,43 mm merupakan pilihan dengan nilai persentase lebar pita impedansi terbaik.

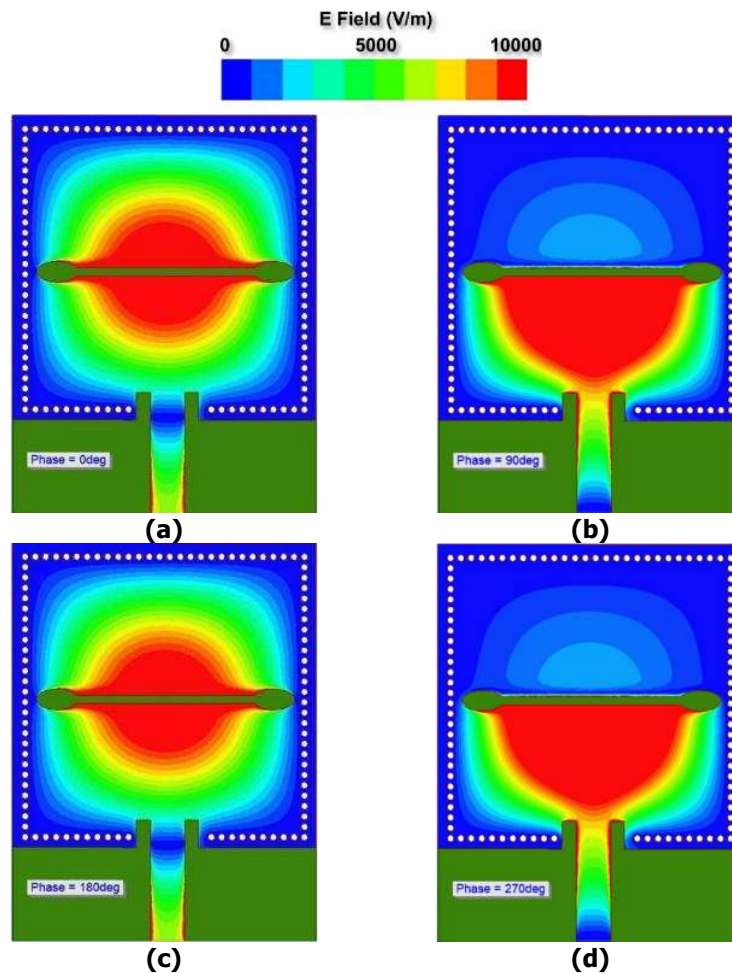
Lebar pita impedansi juga dipengaruhi oleh tebal slot *dumbbell* seperti yang diperlihatkan pada Gambar 6. Hal ini dikarenakan semakin tebal slot yang terbuka dari celah rongga SIW, maka semakin besar pancaran gelombang elektromagnetik yang keluar. Namun nilai perubahan parameter ketebalan slot perlu memperhatikan kondisi *matching* dari saluran input ke antena. Pada Gambar 6 memperlihatkan Antena-3 mendapatkan nilai persentase lebar pita terbaik saat ketebalan slot 1,2 mm dibandingkan dengan 0,9 mm dan 1,5 mm. Hal ini dikarenakan pada ketebalan 0,9 mm dan 1,5 mm, persentase lebar pita adalah 2,05% (3,38 – 3,45 GHz) dan 1,15% (3,45 – 3,49 GHz).



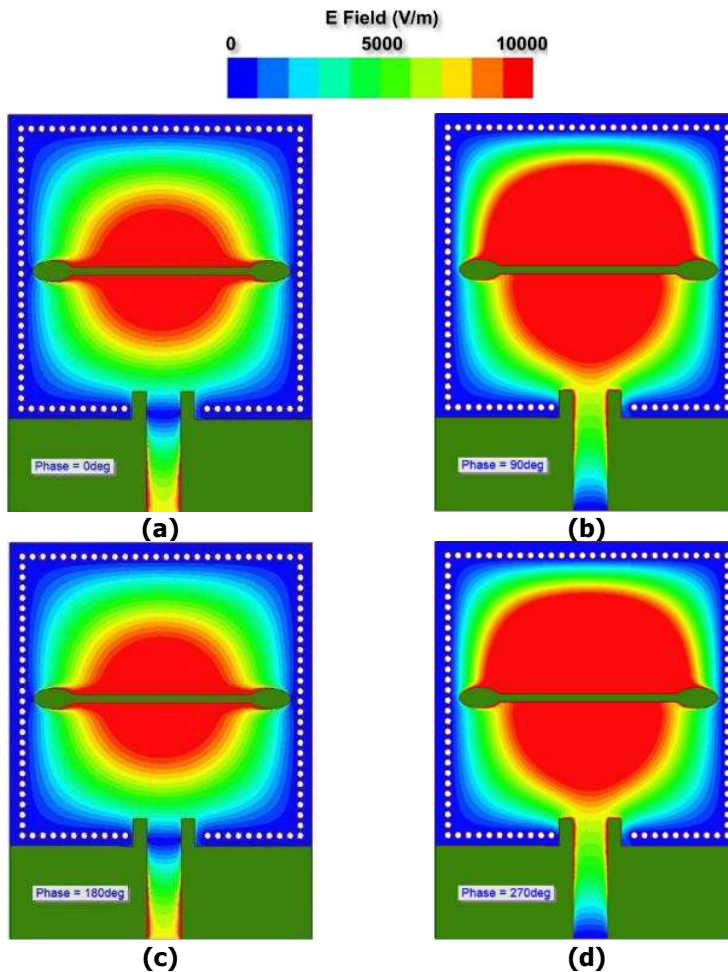
Gambar 6. Studi Parameter Ketebalan Slot (*Ts*) pada Antena-3

2.4 Distribusi Medan Listrik pada Antena SIW Slot *Dumbbell*/Elips

Gambar 7 memperlihatkan simulasi distribusi medan listrik pada Antena-3 di frekuensi 3,46 GHz. Distribusi medan listrik tersebut menggambarkan kekuatan dan arah medan listrik terdistribusi di sekitar suatu objek bermuatan. Distribusi medan listrik juga dapat dipengaruhi oleh bentuk dan konfigurasi geometris dari muatan yang keluar dari celah slot *dumbbell* elips. Kekuatan distribusi medan listrik pada permukaan antena dikelompokkan pada rentang tertentu yang diperlihatkan pada gradasi perubahan warna. Sedangkan analisa percampuran antara kuat dan lemahnya mode TE_{101} dan mode TE_{102} dapat dilihat pada perubahan *phase* dengan tahapan 90° seperti yang diperlihatkan pada Gambar 7a-d. Pada Gambar 7b dan 7d terlihat kekuatan distribusi medan listrik yang berbeda pada rongga yang dipisahkan oleh slot *dumbbell* elips. Sehingga dapat disimpulkan bahwa pada frekuensi 3,46 GHz merupakan percampuran antara kuatnya mode TE_{102} dengan lemahnya mode TE_{101} (Luo et al., 2012).



Gambar 7. Distribusi Medan Listrik Antena-3 pada Frekuensi 3,46 pada *Phase*: (a) 0° , (b) 90° , (c) 180° dan (d) 270° .

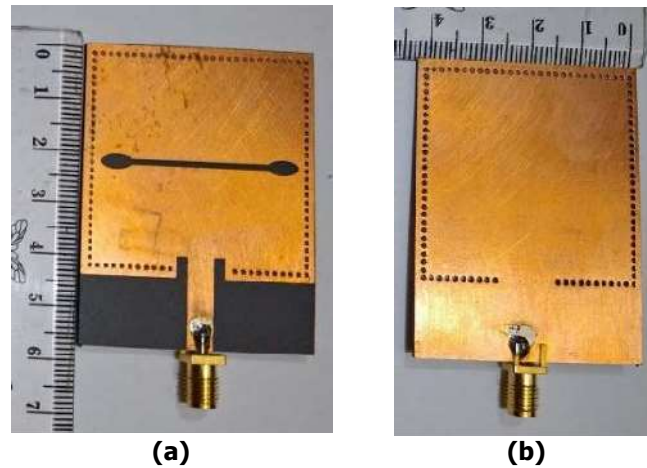


Gambar 8. Distribusi Medan Listrik Antena-3 pada Frekuensi 3,52 pada *Phase*: (a) 0°, (b) 90°, (c) 180° dan (d) 270°.

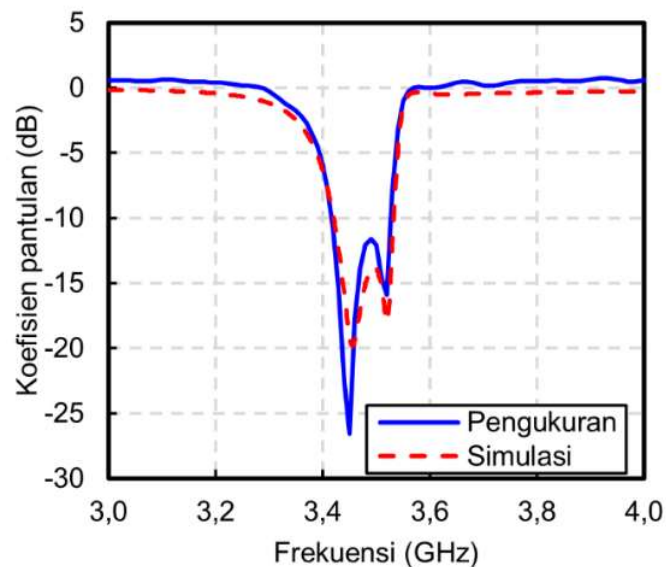
Gambar 8a-d memperlihatkan distribusi medan listrik pada frekuensi 3,52 GHz dengan perubahan *phase* setiap 90°. Gambar 8b dan 8d memperlihatkan kekuatan distribusi medan listrik yang sama pada rongga atas dan rongga bawah yang dipisahkan oleh slot *dumbbell* elips. Sehingga pada frekuensi 3,52 GHz merupakan kombinasi antara kuatnya mode TE_{101} dengan lemahnya mode TE_{102} (Luo et al., 2012).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Fabrikasi Antena-3 diperlihatkan pada Gambar 9. Antena difabrikasi dengan mempergunakan metode foto *etching*, yaitu metode yang menggunakan fotolitografi untuk membuat pola pada permukaan material lapisan tembaga dan kemudian mengikis material lapisan tembaga yang tidak diinginkan. Bagian atas Antena-3 memiliki celah slot radiator berbentuk *dumbbell* elips seperti yang diperlihatkan pada Gambar 9a, sedangkan pada bagian bawah Antena-3 merupakan lapisan pentanahan (*grounding*) seperti yang diperlihatkan pada Gambar 9b.



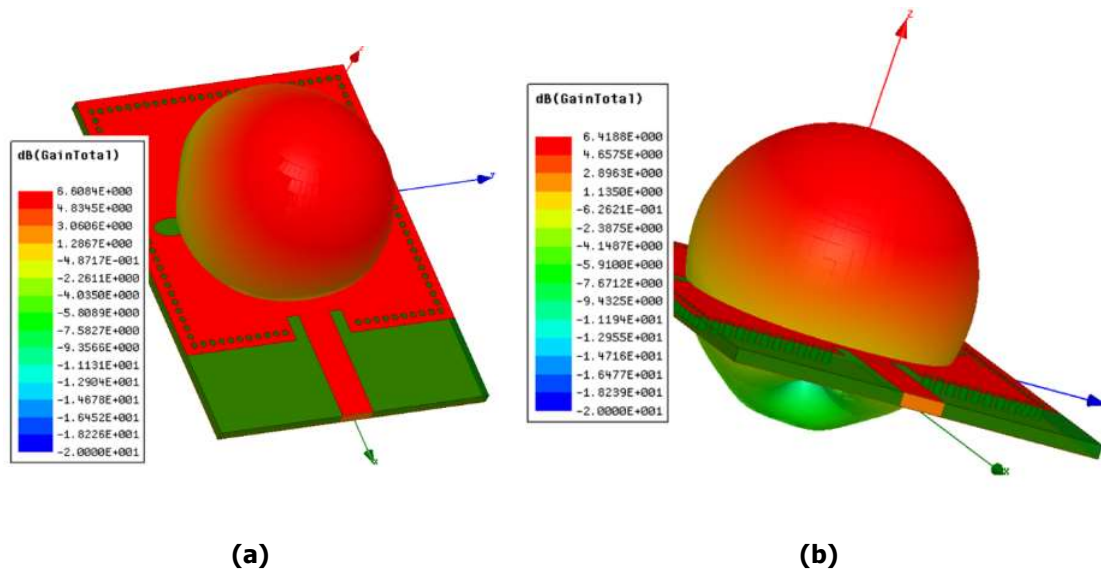
Gambar 9. Fabrikasi Antena-3 (a) Tampak Atas (b) Tampak Bawah



Gambar 10. Perbandingan Koefisien Pantulan Simulasi dan Pengukuran dari Antena-3

Antena-3 diukur dengan mempergunakan alat ukur *Vector Network Analyzer* (VNA) untuk mendapatkan respon koefisien pantulan (*reflection coefficient*, S_{11}) seperti yang diperlihatkan pada Gambar 10. Pada pengukuran koefisien pantulan terlihat bahwa Antena-3 memiliki hasil pengukuran lebar pita impedansi yang sama dengan hasil simulasi yaitu 110 MHz (3,42 – 3,53 GHz). Adapun rentang frekuensi ini sesuai dengan penerapan frekuensi 5G di Indonesia yang berada pada frekuensi tengah 3,5 GHz (3,4 – 3,6 GHz) (**"Menkominfo Tegaskan Frekuensi 5G di Indonesia Tak Ganggu Penerbangan," 2022**).

Simulasi pola radiasi dari Antena-3 di kedua frekuensi resonansi diperlihatkan pada Gambar 11(a)-(b). Pada Gambar 11a terlihat gain total Antena-3 pada frekuensi 3,46 GHz sebesar 6,61 dB, nilai gain total ini lebih tinggi dibandingkan dengan gain total pada frekuensi 3,52 GHz sebesar 6,42 dB (Gambar 11(b)). Sedangkan polarisasi dari Antena-3 adalah linier.



Gambar 11. Simulasi Pola Radiasi pada Frekuensi: (a) 3,46 GHz, dan (b) 3,52 GHz

4. KESIMPULAN

Sebuah antena *Substrate Integrated Waveguide* (SIW) dengan slot *dumbbell* elips telah didesain, difabrikasi dan diukur untuk mengatasi sempitnya lebar pita impedansi. Lebar pita impedansi menjadi lebih lebar dikarenakan gabungan antara dua mode yang berdekatan yaitu mode TE_{101} dan mode TE_{102} berdasarkan simulasi distribusi medan listrik. Hasil simulasi dan pengukuran lebar pita impedansi diperoleh nilai yang sama yaitu sebesar 110 MHz pada rentang frekuensi 3,42 – 3,53 GHz. Antena SIW slot *dumbbell* elips ini memiliki persentase lebar pita sebesar 3,17% dengan kenaikan sebesar 3,73 kali dari desain antena SIW konvensional. Adapun frekuensi antena ini bekerja pada frekuensi 5G yang diimplementasikan di Indonesia.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (LPPM) Universitas Mercu Buana, Jakarta yang telah membiayai penelitian ini pada skema dosen muda dengan nomor SPK 02-5/1071/B-SPK/III/2024.

DAFTAR RUJUKAN

- Aqlan, B., Vettikalladi, H., & Alkanhal, M. A. S. (2016). High Gain SIW-Based Antenna with Superstrate for Automotive Radar Applications. In *2016 Loughborough Antennas & Propagation Conference (LAPC)* (pp. 1–5).
- Astuti, D. W., Fadilah, R., Muslim, Rusdiyanto, D., Alam, S., & Wahyu, Y. (2022). Bandwidth Enhancement of Bow-tie Microstrip Patch Antenna Using Defected Ground Structure for 5G. *Journal of Communications*, *17*(12), 995–1002.

- <https://doi.org/10.12720/jcm.17.12.995-1002>
- Astuti, D. W., & Rahardjo, E. T. (2018a). Size Reduction of Cavity Backed Slot Antenna using Half Mode Substrate Integrated Waveguide Structure. *4th International Conference on Nano Electronics Research and Education: Toward Advanced Imaging Science Creation, ICNERE 2018*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICNERE.2018.8642564>
- Astuti, D. W., & Rahardjo, E. T. (2018b). Size Reduction of Substrate Integrated Waveguide Cavity Backed U-Slot Antenna. In *2018 IEEE Indian Conference on Antennas and Propagation (InCAP)* (pp. 1–4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/INCAP.2018.8770702>
- Astuti, D. W., Rivayanto, R., Muslim, M., Simanjuntak, I., Firmansyah, T., Astuti, D. A., & Natali, Y. (2023). Bandwidth Enhancement for Half Mode Substrate Integrated Waveguide Antenna using Defected Ground Structures. *International Journal of Electronics and Telecommunications*, *69*(3), 449–454. <https://doi.org/10.24425/ijet.2023.144382>
- Astuti, D. W., Wahyu, Y., Zulkifli, F. Y., & Rahardjo, E. T. (2023). Hybrid HMSIW Cavity Antenna with a Half Pentagon Ring Slot for Bandwidth Enhancement. *IEEE Access*, *11*(February), 18417–18426. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3247604>
- Astuti, D. W., Zulkifli, F. Y., & Rahardjo, E. T. (2019). Bandwidth Enhancement of Substrate Integrated Waveguide Cavity Antenna using T-Backed Slot. In *IEEE Conference on Antenna Measurements & Applications (CAMA)* (pp. 251–254). <https://doi.org/10.1109/cama47423.2019.8959656>
- Bozzi, M., Perregrini, L., Wu, K., & Arcioni, P. (2009). Current and Future Research Trends in Substrate Integrated Waveguide Technology. *Radioengineering*, *18*(2), 201–209.
- Cai, S., Liu, J., & Long, Y. (2020). Investigation of SIW Cavity-Backed Slot and Patch Antennas with Conical Radiation Patterns. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, *68*(8), 5978–5988. <https://doi.org/10.1109/TAP.2020.2990312>
- Cassivi, Y., Perregrini, L., Arcioni, P., Bressan, M., Wu, K., & Conciauro, G. (2002). Dispersion Characteristics of Substrate Integrated Rectangular Waveguide. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, *12*(9), 333–335. <https://doi.org/10.1109/LMWC.2002.803188>
- Chaturvedi, D., & Kumar, A. (2024). A QMSIW Cavity-Backed Self-Diplexing Antenna With Tunable Resonant Frequency Using. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, *23*(1), 259–263. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2023.3323008>
- Cheng, T., Jiang, W., Gong, S., & Yu, Y. (2019). Broadband SIW Cavity-Backed Modified Dumbbell-Shaped Slot Antenna. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*,

- 18(5), 936–940. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2019.2906119>
- Dash, S. K. K., Cheng, Q. S., Barik, R. K., Pradhan, N. C., & Subramanian, K. S. (2020). A Compact Triple-Fed High-Isolation SIW-Based Self-Triplexing Antenna. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 19(5), 766–770. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2020.2979488>
- Deslandes, D., & Wu, K. (2006). Accurate Modeling, Wave Mechanisms, and Design Considerations of a Substrate Integrated Waveguide. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 54(6), 2516–2526. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2006.875807>
- Djerafi, T., Doghri, A., & Wu, K. (2015). *Handbook of antenna technologies. Handbook of Antenna Technologies* (Vol.). <https://doi.org/10.1007/978-981-4560-44-3>
- Hao, Q., Zheng, S., & Lu, K. (2024). An SIW Horn Antenna With Flat-Top Beam for Millimeter-Wave Applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 23(2), 608–612. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2023.3330931>
- Iqbal, A., Al-Hasan, M., Mabrouk, I. Ben, & Nedil, M. (2021). Compact SIW-Based Self-Quadruplexing Antenna for Wearable Transceivers. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 20(1), 118–122. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2020.3043258>
- Iqbal, A., Tiang, J. J., Lee, C. K., & Mallat, N. K. (2021). SIW Cavity Backed Self-Diplexing Tunable Antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 69(8), 5021–5025. <https://doi.org/10.1109/TAP.2021.3060024>
- Iqbal, A., Tiang, J. J., Wong, S. K., Wong, S. W., & Mallat, N. K. (2021). SIW Cavity-Backed Self-Quadruplexing Antenna for Compact RF Front Ends. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 20(4), 562–566.
- Ji, Z., Sun, G., & Wong, H. (2022). A Wideband Circularly Polarized Complementary Antenna for Millimeter - wave Applications. *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, Februar(early access), 1–10. <https://doi.org/10.1109/TAP.2021.3083782>
- Kim, D. Y., Lee, J. W., Lee, T. K., & Cho, C. S. (2011). Design of SIW cavity-backed circular-polarized antennas using two different feeding transitions. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 59(4), 1398–1403. <https://doi.org/10.1109/TAP.2011.2109675>
- Lajevardi, M. E., & Kamyab, M. (2017). Ultraminiaturized Metamaterial-Inspired SIW Textile Antenna for Off-Body Applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 16, 3155–3158. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2017.2766201>
- Li, L., Zhang, C., Shao, Y., & Luo, J. (2021). A SIW-fed Cross-dipole Antenna with Broadband

- Circular Polarization for MMW Applications. *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, December(Early Access). <https://doi.org/10.1109/TAP.2021.3137268>
- Li, L., Zhang, C., Shao, Y., Yin, J., & Luo, J. (2022). A SIW-Fed Double-Helix Antenna With Broadband Circular Polarization for MMW Applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, *21*(2), 361–365.
- Luo, G. Q., Hu, Z. F., Dong, L. X., & Sun, L. L. (2008). Planar Slot Antenna Backed by Substrate Integrated Waveguide Cavity. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, *7*, 236–239. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2008.923023>
- Luo, G. Q., Hu, Z. F., Li, W. J., Zhang, X. H., Sun, L. L., & Zheng, J. F. (2012). Bandwidth-Enhanced Low-Profile Cavity-Backed Slot Antenna by Using Hybrid SIW Cavity Modes. *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, *60*(4), 1698–1704.
- Luo, G. Q., Wang, T. Y., & Zhang, X. H. (2013). Review of low profile substrate integrated waveguide cavity backed antennas. *International Journal of Antennas and Propagation*.
- Menkominfo Tegaskan Frekuensi 5G di Indonesia Tak Ganggu Penerbangan. (2022). *Kominfo*. Retrieved from https://www.kominfo.go.id/content/detail/39470/siaran-pers-no-14hmkominfo012022-tentang-menkominfo-tegaskan-frekuensi-5g-di-indonesia-tak-ganggu-penerbangan/0/siaran_pers
- Mukherjee, S, Biswas, A., & Srivastava, K. V. (2014). Broadband Substrate Integrated Waveguide Cavity-Backed Bow-Tie Slot Antenna. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, *13*, 1152–1155.
- Mukherjee, Soumava, & Biswas, A. (2018). Design of Planar High-Gain Antenna Using SIW Cavity Hybrid Mode. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, *66*(2), 972–977. <https://doi.org/10.1109/TAP.2017.2780980>
- Mukherjee, Soumava, Ghosh, S., & Biswas, A. (2021). Design of Compact SIW Cavity Backed Self-triplexing Planar Slot Antenna for Triple Band Application. *15th European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2021*. <https://doi.org/10.23919/EuCAP51087.2021.9411029>
- Natali, Y., & Larasati, M. (2019). Gain Enhancement Using Stub and Stacked Hexagon Microstrip Antenna for 5G Communication. In *Proceedings - 2019 International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications, ICRAMET 2019* (pp. 49–52). <https://doi.org/10.1109/ICRAMET47453.2019.8980392>
- Nayak, A. K., & Patnaik, A. (2017). Design of an SIW Corrugated H-plane Horn Antenna with Improved Performance. *2017 IEEE Appl. Electromagnetics Conf. (AEMC)* (pp. 34–35).
- Padilla, P. (2022). Efficient Design of H-Plane SIW Horn Antenna Array at mmWaves. In *2022*

16th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP).

- Paliwal, G. J., Kumar, A., & Sengupta, J. (2023). SIW Cavity-Backed Slot Antenna Using High-Order Radiation Modes for Broadband Applications in X Band. In *2023 IEEE International Symposium On Antennas And Propagation (ISAP)* (pp. 1–2). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ISAP57493.2023.10388709>
- Pozar, D. M. (2012). *Microwave engineering* (4th ed.). John Wiley & Son, Inc. <https://doi.org/10.1109/45.31588>
- Saghati, A. P., Saghati, A. P., & Entesari, K. (2017). An Ultra-Miniature SIW Cavity-Backed Slot Antenna. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, *16*, 313–316.
- Sepryanto, S., Attamimi, S., & Sirait, F. (2020). Perancangan Antena Mikrostrip SIW Cavity-Backed Modified Dumbbell-Shaped Slot Untuk Pengaplikasian Pada 5G. *Jurnal Teknologi Elektro*, *11*(2), 115–119. <https://doi.org/10.22441/jte.2020.v11i2.008>
- Shi, Y., Liu, J., & Long, Y. (2017). Wideband Triple-and Quad-Resonance Substrate Integrated Waveguide Cavity-Backed Slot Antennas with Shorting Vias. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, *65*(11), 5768–5775. <https://doi.org/10.1109/TAP.2017.2755118>
- Wu, Q., Wang, H., Yu, C., & Hong, W. (2016). Low-Profile Circularly Polarized Cavity-Backed Antennas Using SIW Techniques. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, *64*(7), 2832–2839. <https://doi.org/10.1109/TAP.2016.2560940>
- Wu, Q., Yin, J., Yu, C., Wang, H., & Hong, W. (2019). Broadband Planar SIW Cavity-Backed Slot Antennas Aided by Unbalanced Shorting Vias. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, *18*(2), 363–367. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2019.2891108>
- Xiang, L., Zhang, Y., Yu, Y., & Hong, W. (2020). Characterization and Design of Wideband Penta- And Hepta-Resonance SIW Elliptical Cavity-Backed Slot Antennas. *IEEE Access*, *8*, 111987–111994. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3002433>
- Yun, S., Kim, D. Y., & Nam, S. (2012). Bandwidth and Efficiency Enhancement of Cavity-Backed Slot Antenna Using a Substrate Removal. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, *11*, 1458–1461. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2012.2230392>
- Zerfaine, A., & Djerafi, T. (2021). Ultra-Broadband Circularly Polarized Antenna Array Based on Microstrip to SIW Junction. *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, *October*(Early Access), 14–19. <https://doi.org/10.1109/TAP.2021.3119098>
- Zhang, G., & Xu, Z. (2014). Development of Circularly Polarized Based on Dual-mode Hexagonal SIW Cavity. In *2014 15th International Conference on Electronic Packaging Technology* (pp. 1283–1286). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICEPT.2014.6922878>