

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah antenna selesai difabrikasi, langkah berikutnya melibatkan pengujian terhadap antenna tersebut. Tujuannya adalah untuk memastikan bahwa antenna yang telah dibuat sesuai dengan perancangan dan spesifikasi yang diinginkan. Bagian ini akan menguraikan hasil dari pengukuran antenna mikrostrip, termasuk parameter yang diuji seperti frekuensi kerja, *return loss*, *bandwidth*, VSWR, impedansi, pola radiasi, dan *gain*.

4.1 Hasil Perancangan Antena

Dalam perancangan antenna mikrostrip *rectangular patch array* 4×4, diperoleh dimensi antenna dengan panjang 630,74 mm dan lebar 358,5 mm. Antena mikrostrip ini terdiri dari empat elemen (*patch*) berbentuk *rectangular* yang disusun dalam 4 baris dan 4 kolom (*array* 4×4), dilengkapi dengan *step impedance transformer* dan *partial ground plane technique*. Rincian hasil fabrikasi dari perancangan antenna mikrostrip *rectangular patch array* 4×4 dapat dilihat pada Gambar 4.1.

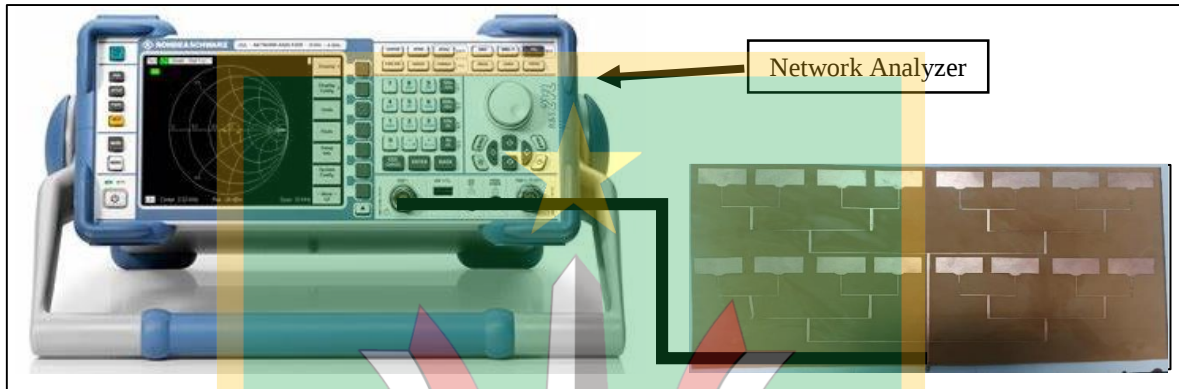


Gambar 4.1 Hasil fabrikasi antenna mikrostrip *rectangular patch array* 4×4

Pengujian antenna mikrostrip dilakukan pada pengujian medan dekat dan pengujian medan jauh yang dilakukan di PT RTI, Bandung.

4.2 Prosedur Pengujian Medan Dekat

Hasil parameter yang diperoleh dari pengujian medan dekat melibatkan frekuensi kerja, *return loss*, *bandwidth*, VSWR, dan impedansi. Pengujian medan dekat dilakukan di PT RTI, Bandung. Skema rangkaian yang digunakan untuk menguji *port* tunggal pada antenna mikrostrip dapat ditemukan pada Gambar 4.2. Alat-alat yang digunakan pada pengujian medan dekat adalah antenna mikrostrip, *network analyzer*, dan *konektor adapter* BNC to SMA.



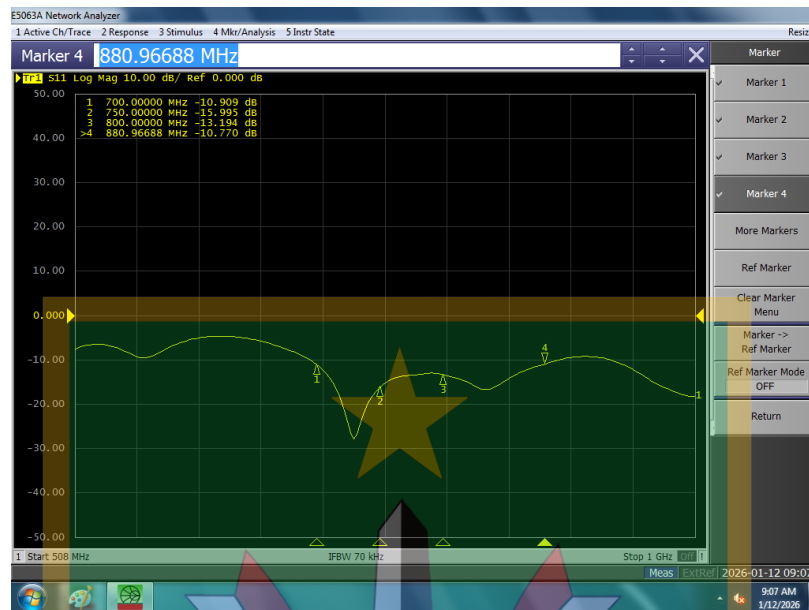
Gambar 4.2 Rangkaian penguji medan dekat

Menyiapkan susunan untuk pengujian medan dekat melibatkan proses menghubungkan antenna mikrostrip menggunakan kabel koaksial dengan konektor BNC to SMA ke perangkat *network analyzer*. Tahap-tahap yang terlibat dalam menjalankan pengujian medan dekat adalah sebagai berikut:

- Menghubungkan antenna mikrostrip ke perangkat *network analyzer* melalui kabel koaksial dengan konektor BNC to SMA.
- Menyesuaikan pengaturan frekuensi awal dan akhir yang akan ditampilkan pada layar perangkat *network analyzer*.
- Menampilkan parameter yang diperlukan dengan memilih format jejak (*trace format*) dan memilih Log Mag untuk menampilkan nilai frekuensi kerja, *bandwidth*, serta *return loss*. Menu VSWR digunakan untuk menampilkan VSWR, sementara menu *Smith* untuk menampilkan impedansi antenna.
- Menandai titik-titik tertentu dengan marker 1, 2, 3, dan 4, di mana marker 1 menunjukkan frekuensi terendah, marker 2 untuk frekuensi tengah (f_C), dan marker 4 untuk frekuensi tertinggi.
- Menyimpan hasil pengujian parameter medan dekat dalam bentuk gambar dan lembar kerja *spreadsheet* untuk keperluan dokumentasi lebih lanjut.

4.2.1 Data Hasil Pengujian *Return Loss* dan *Bandwidth*

Data dari hasil pengujian return loss pada frekuensi 700-800 MHz dapat ditemukan dalam Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Hasil pengujian *return loss* pada frekuensi 700-800 MHz

Dalam Gambar 4.3, terdapat visualisasi grafik dari hasil pengujian *return loss* pada frekuensi bawah, frekuensi tengah, dan frekuensi atas dengan nilai 700-800 MHz. Informasi rinci mengenai data hasil pengujian tersebut dapat ditemukan dalam Tabel 4.1 berikut:

Tabel 4.1 Data hasil pengujian *return loss* pada frekuensi 700-800 MHz

Frekuensi (MHz)	Return Loss (dB)
700	-10,91
750	-15,99
800	-13,19
880	-10,77

Pengujian *return loss* menunjukkan hasil pada frekuensi operasional 750 MHz dengan nilai -15,99 dB. Bukti hasil pengujian tersebut didasarkan pada penerapan Persamaan 2.14 berikut:

$$\text{return loss} = 20 \log_{10} |\Gamma|$$

$$\text{return loss} = 20 \log_{10} \left| \frac{1+\Gamma}{1-\Gamma} \right|$$

$$\text{return loss} = 20 \log_{10} \left| \frac{1+VSWR}{1-VSWR} \right|$$

$$\text{return loss} = 20 \log_{10} \left| \frac{1+1,3810}{1-1,3810} \right|$$

$$\text{return loss} = -15,92 \text{ dB}$$

Hasil pengujian return loss pada frekuensi operasional 750 MHz menunjukkan nilai ≤ -10 dB, menunjukkan kesesuaian hasil pengujian dengan spesifikasi yang diharapkan. Oleh karena itu, dapat dilakukan perhitungan lebar pita menggunakan Persamaan 2.15 berikut:

$$BW = f_t - f_h$$

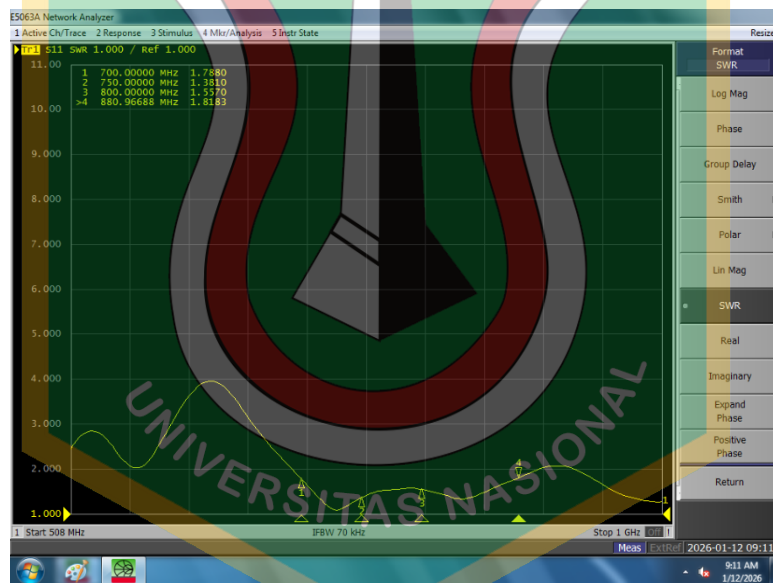
$$BW = 890 - 700$$

$$BW = 190 \text{ MHz}$$

Dengan memperhitungkan, *bandwidth* pada frekuensi operasional 700-800 MHz terukur sebesar 190 MHz, dengan frekuensi bawah mencapai 700 MHz dan frekuensi atas mencapai 890 MHz.

4.2.2 Data Hasil Pengujian VSWR

Data dari hasil pengujian VSWR pada frekuensi operasional 700-800 MHz dapat dilihat dalam Gambar 4.4.



Gambar 4.4 Hasil pengujian VSWR pada frekuensi 700-800 MHz

Pada Gambar 4.4, disajikan grafik hasil pengujian VSWR pada frekuensi bawah, tengah, dan atas dengan frekuensi operasional 700-800 MHz. Rincian data pengujian ini tercantum dalam Tabel 4.2 di bawah ini.

Tabel 4.2 Data hasil pengujian VSWR pada frekuensi 700-800 MHz

Frekuensi (MHz)	VSWR
700	1,788
750	1,381
800	1,557
880	1,818

Hasil pengujian VSWR pada frekuensi operasional 700-800 MHz mencapai 1,381. Hasil pengujian ini dapat diverifikasi dengan menerapkan Persamaan 2.13 berikut:

$$VSWR = \frac{1+|\tau|}{1-|\tau|}$$

$$VSWR = \frac{1+10^{\frac{-RL}{20}}}{1-10^{\frac{-RL}{20}}}$$

$$VSWR = \frac{1+10^{\frac{-15,99}{20}}}{1-10^{\frac{-15,99}{20}}}$$

$$VSWR = 1,38$$

VSWR yang dihasilkan dari pengujian pada frekuensi operasional 700-800 MHz menunjukkan nilai ≤ 2 , menandakan kesesuaian dengan spesifikasi yang ditetapkan.

4.2.3 Data Hasil Pengujian Impedansi

Data dari hasil pengujian impedansi pada frekuensi operasional 700-800 MHz ditampilkan dalam Gambar 4.5.



Gambar 4.5 Hasil pengujian impedansi pada frekuensi 700-800 MHz

Dalam Gambar 4.5, terlihat smith chart yang mencerminkan hasil pengujian impedansi pada frekuensi operasional 700-800 MHz. Nilai impedansi hasil pengujian pada frekuensi kerja 700-800 MHz adalah $68,552 \Omega (R) + 4,767 j\Omega (X)$. Dari data tersebut, dilakukan perhitungan untuk mendapatkan nilai impedansi dalam satuan ohm (Ω) dengan menerapkan Persamaan 2.21 seperti berikut:

$$\text{Impedansi} = \sqrt{R^2 + X^2} \angle \tan^{-1}$$

$$\text{Impedansi} = \sqrt{68,552^2 + 4,767^2} \angle \tan^{-1} \frac{4,767}{68,552}$$

$$\text{Impedansi} = 68,72 \angle 3,98^\circ \text{ ohm}$$

Data hasil pengujian impedansi pada frekuensi bawah, frekuensi tengah, dan frekuensi atas pada nilai 700-800 MHz tercatat dalam Tabel 4.3 di bawah ini:

Tabel 4.3 Data hasil pengujian impedansi pada frekuensi 700-800 MHz

Frekuensi (MHz)	Impedansi (ohm)
700	50,76
750	68,72
800	36,42
880	55,47

4.3 Prosedur Pengujian Medan Jauh

Pengujian medan jauh untuk mengukur pola radiasi dilaksanakan untuk mengidentifikasi karakteristik pola radiasi yang dihasilkan oleh antenna yang telah difabrikasi. Proses pengujian dilakukan di Laboratorium PT RTI, Bandung, dalam lingkungan ruang bebas pantul (*Chamber*). Antena diputar sejauh 10° pada setiap langkah hingga mencapai 360° , dan tingkat sinyal yang diterima oleh antenna dicatat untuk menganalisis pola radiasi yang dihasilkan kemudian diolah untuk mendapatkan nilai *beamwidth*.

Alat yang digunakan pada pengukuran pola radiasi yaitu antenna mikrostrip, *spectrum analyzer*, *signal generator*, kabel koaksial, *tripod*, dan antenna *horn* sebagai antenna referensi. Metode pengujian pola radiasi melibatkan penggunaan dua antenna, yakni antenna horn sebagai acuan dan antenna mikrostrip yang akan diujikan. Pengaturan persiapan rangkaian yang diperlukan untuk uji pola radiasi seperti yang diperlihatkan dalam Gambar 4.6.

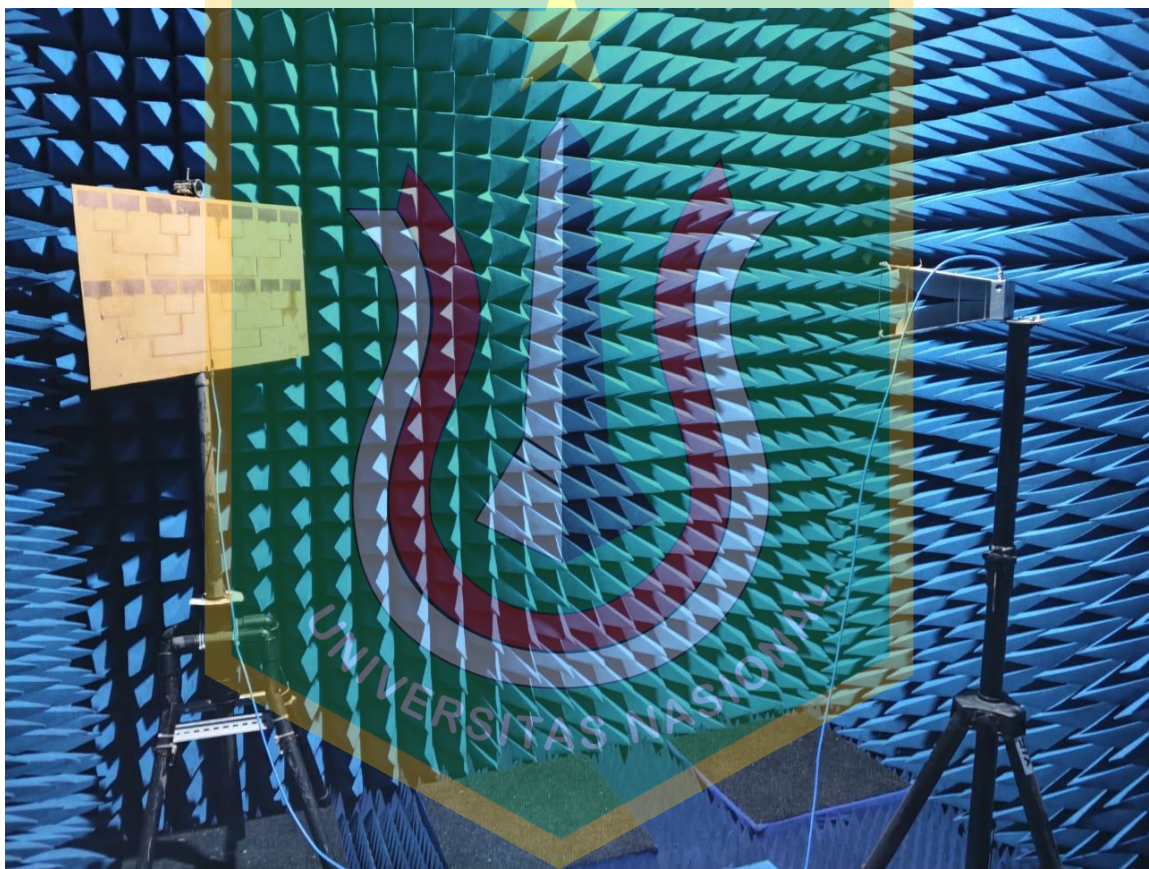


Gambar 4.6 Rangkaian pengujian pola radiasi

Berikut adalah tahapan-tahapan untuk pengujian pola radiasi antenna mikrostrip:

- Pasang antenna horn dan antenna mikrostrip pada tripod antenna.

- b. Sambungkan antenna horn ke generator sinyal dan hubungkan antenna mikrostrip ke *Spectrum Analyzer* menggunakan kabel koaksial dengan rendahnya hilang (*low loss* 50 ohm).
- c. Tempatkan kedua antenna menghadap satu sama lain dengan jarak 1 meter, mengikuti tata letak seperti yang terlihat pada Gambar 4.6.
- d. Atur frekuensi di setiap perangkat sesuai dengan frekuensi kerja, yaitu 700-800 MHz.
- e. Putar antenna mikrostrip setiap 10° sepanjang putaran 350° dan catat hasil level sinyal yang diterima oleh antenna mikrostrip.
- f. Lakukan perhitungan berdasarkan data level sinyal yang tercatat untuk mendapatkan bentuk pola radiasi dan nilai gain antenna.



Gambar 4.7 Pengujian antenna mikrostrip di Ruang Chamber PT RTI, Bandung

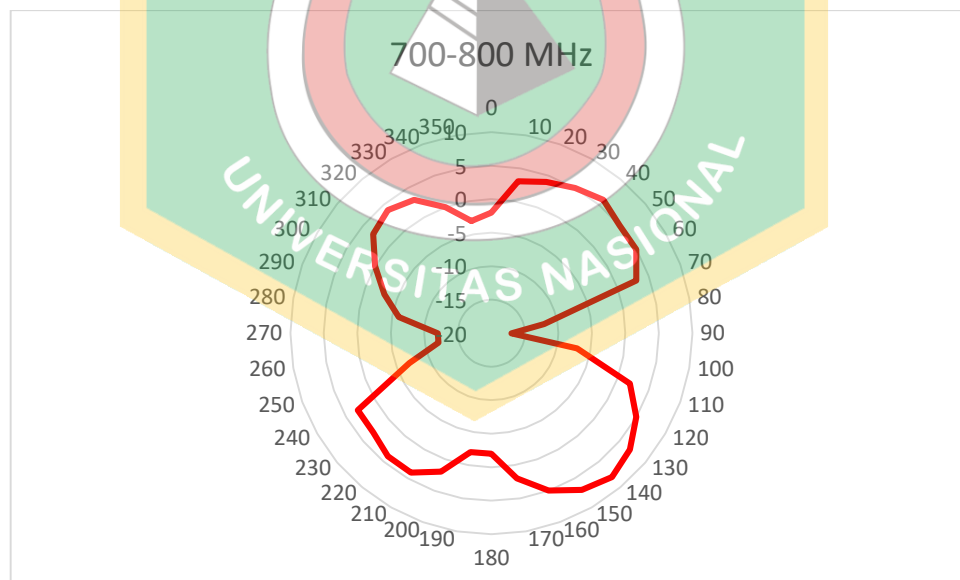
Data hasil pengujian pola radiasi azimuth (horizontal) terhadap antenna mikrostrip, yang mencakup pengukuran level daya sinyal terima (P_{rx}) pada berbagai sudut pengamatan dari 0° hingga 350° , dapat dilihat pada Tabel 4.4. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui karakteristik penyebaran radiasi sinyal antenna pada bidang horizontal serta untuk menganalisis arah radiasi maksimum dan minimum yang dihasilkan oleh antenna. Dengan melakukan pengukuran pada setiap interval sudut tertentu, dapat diperoleh gambaran pola

radiasi antenna secara menyeluruh yang menunjukkan bagaimana distribusi daya pancar antenna pada berbagai arah di sekelilingnya. Hasil pengukuran tersebut kemudian digunakan sebagai dasar dalam mengevaluasi performa antenna mikrostrip yang telah dirancang.

Tabel 4.4 Hasil pengujian pola radiasi 700-800 MHz

Sudut (°)	Daya diterima (dBm)	Sudut (°)	Daya diterima (dBm)
0	-26,15	180	-24,5
10	-28,8	190	-28,2
20	-32,5	200	-32,9
30	-36,4	210	-38,1
40	-42,2	220	-43,5
50	-48,5	230	-46,1
60	-39,3	240	-40,8
70	-33,8	250	-34,5
80	-30,2	260	-30,8
90	-27,5	270	-27,9
100	-25,1	280	-25,5
110	-20,8	290	-21,2
120	-17,5	300	-18,1
130	-15,6	310	-15,9
140	-14,88	320	-15,05
150	-15,15	330	-16,4
160	-17,2	340	-19,8
170	-20,6	350	-23,2

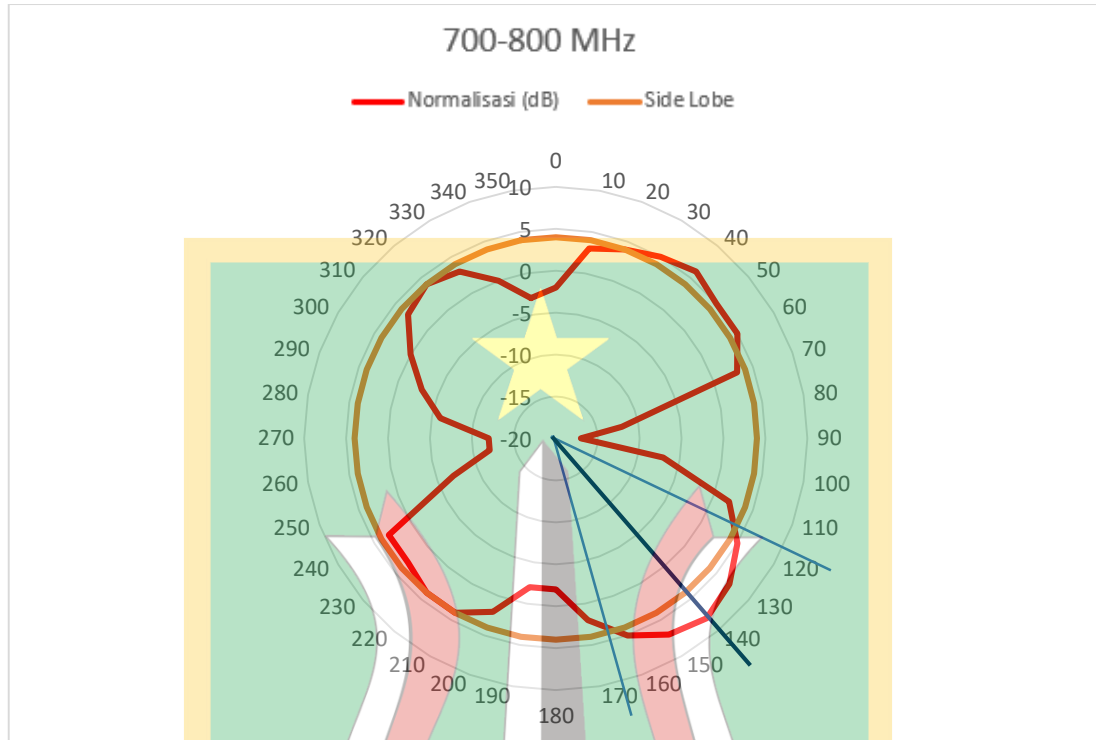
Grafik pola radiasi yang dihasilkan dari pengujian level sinyal, sebagaimana tercatat dalam Tabel 4.4, dipresentasikan dalam Gambar 4.8.



Gambar 4.8 Grafik hasil pengujian pola radiasi 700-800 MHz

Gambar 4.8 memperlihatkan grafik hasil pengujian pola radiasi antenna mikrostrip *rectangular patch array* 4×4 pada bidang horizontal (*azimuth*). Berdasarkan hasil pengujian pada frekuensi kerja 700-800 MHz tersebut, terlihat bahwa antenna memiliki pola radiasi direksional dengan karakteristik direksional (satu arah). Adapun informasi mengenai *Half*

Power Beam Width (HPBW) dari hasil pengujian ini dapat dilihat secara rinci dalam Gambar 4.9. Visualisasi radiasi tersebut juga menunjukkan karakteristik pola pancar pada bidang H-Plane yang direpresentasikan melalui irisan sumbu YZ, di mana distribusi energi tersebar secara simetris dan menunjukkan fokus direktivitas yang stabil.



Gambar 4.9 Sudut HPBW frekuensi kerja 700-800 MHz

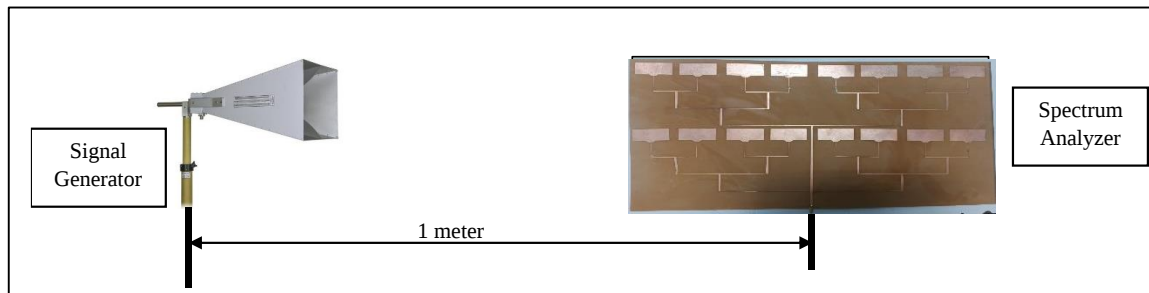
Dalam Gambar 4.9, terlihat *Half Power Beam Width* (HPBW) dari antenna mikrostrip, di mana titik penurunan -3 dB dari daya pancar puncak pada frekuensi kerja 700-800 MHz terletak pada sudut 120° sampai 160°, menghasilkan lebar sudut HPBW sebesar 40°. Visualisasi radiasi tersebut juga menunjukkan karakteristik pola pancar pada bidang H-Plane yang direpresentasikan melalui irisan sumbu YZ, di mana distribusi energi tersebar secara simetris dan menunjukkan fokus direktivitas yang stabil.

4.4 Prosedur Pengujian Gain

Pengujian gain pada antenna mikrostrip dilakukan dengan metode perbandingan, di mana level sinyal saat antenna horn berperan sebagai antenna pemancar (TX) dibandingkan dengan level sinyal saat antenna mikrostrip berperan sebagai antenna penerima (RX). Antenna horn, sebagai referensi, memiliki gain sebesar 7 dBi pada frekuensi kerja 700-800 MHz.

Alat-alat yang digunakan untuk pengukuran gain adalah antenna mikrostrip, antenna horn sebagai referensi, *spectrum analyzer*, *signal generator*, kabel koaksial, dan *tripod*, Tata

letak rangkaian yang disiapkan untuk pengujian gain antenna mikrostrip tergambar dalam Gambar 4.10.



Gambar 4.10 Rangkaian pengujian gain

Berikut adalah langkah-langkah dalam melaksanakan pengujian gain pada antenna mikrostrip:

- Pasangkan antenna *horn* dan antenna mikrostrip pada tripod antenna.
- Sambungkan antenna *horn* ke generator sinyal dan antenna mikrostrip ke perangkat *network analyzer* menggunakan kabel koaksial dengan hilang daya yang rendah (*low loss* 50 ohm).
- Persiapkan rangkaian sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 4.10.
- Catat hasil tingkat daya yang ditampilkan pada layar perangkat *network analyzer*, lalu bandingkan kedua tingkat daya untuk menghitung nilai gain dari antenna mikrostrip.

Hasil pengujian gain antenna diperoleh melalui perbandingan level sinyal antenna mikrostrip dan antenna referensi (*horn*) pada jarak 1 meter. Gain antenna referensi (*horn*) pada frekuensi kerja 700-800 MHz adalah 7 dBi (G_{tx}). Daya yang dihasilkan oleh generator sinyal adalah 0 dBm (T_x). Nilai gain dihitung menggunakan Persamaan 2.9 dan Persamaan 2.10. Berikut adalah nilai gain pada frekuensi kerja 700-800 MHz:

$$FSL = 32,44 + 20 \log D + 20 \log F$$

$$FSL = 32,44 + 20 \log (0,001) + 20 \log (750)$$

$$FSL = 29,94 \text{ dB}$$

Sehingga nilai gain pada frekuensi 700-800 MHz adalah:

$$P_{TX} - L_{TX} + G_{TX} - FSL + G_{RX} - L_{RX} - P_{RX} = 0$$

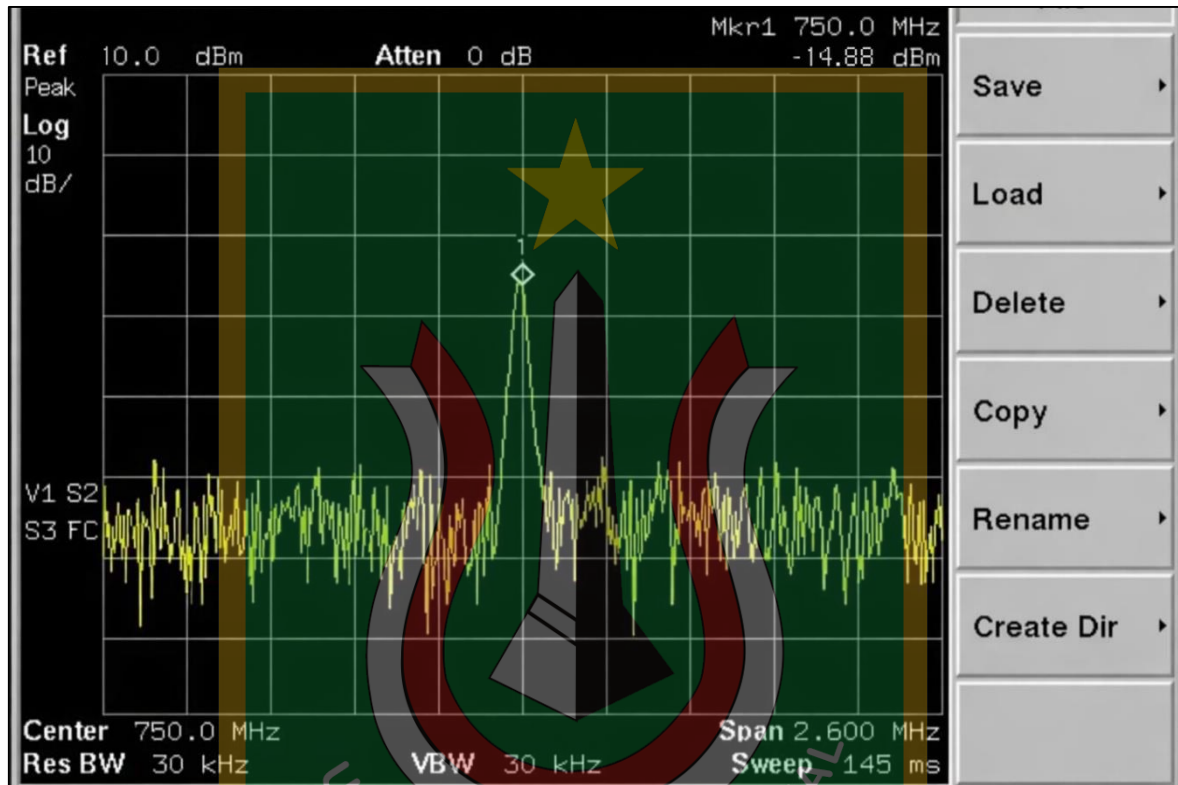
$$0 - 0,5 + 7 - 29,94 + G_{RX} - 0,5 - (-14,88) = 0$$

$$G_{RX} = 0 + 0,5 - 7 + 29,94 + 0,5 - 14,88$$

$$G_{RX} = 23,94 - 14,88$$

$$G_{RX} = 9,06 \text{ dBi}$$

Berdasarkan hasil perhitungan *link budget* pada kondisi polarisasi horizontal, diperoleh bahwa gain antenna penerima pada frekuensi kerja 700–800 MHz sebesar 9,06 dBi. Nilai daya pancar pemancar (P_{TX}) yang relatif kecil digunakan untuk merepresentasikan kondisi komunikasi jarak dekat, sedangkan rugi-rugi pada sisi pemancar dan penerima (L_{TX} dan L_{RX}) memperhitungkan pengaruh kabel dan konektor yang digunakan pada sistem. Gain antenna pemancar (G_{TX}) yang digunakan mencerminkan karakteristik antenna referensi pada sisi pemancar.



Gambar 4.11 Daya yang diterima

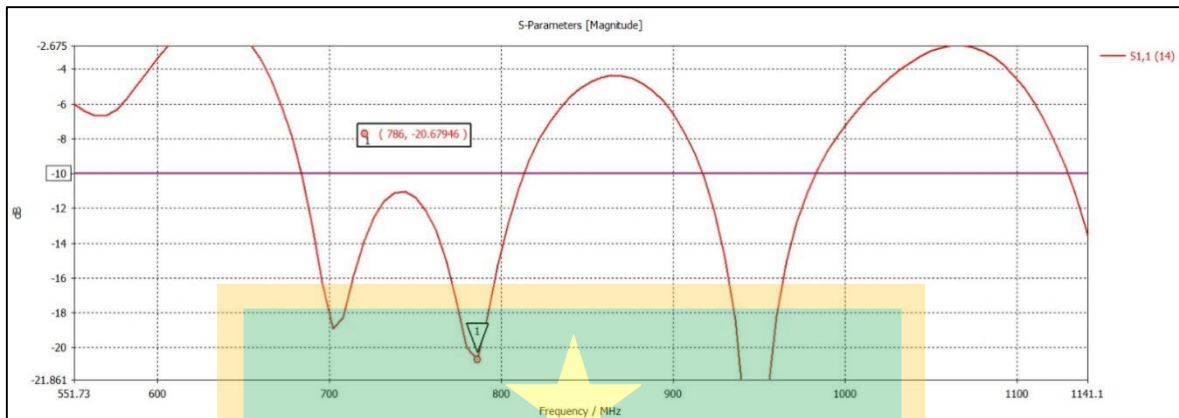
Nilai gain yang diperoleh telah memenuhi persyaratan rancangan antenna, yaitu memiliki gain minimum 6 dBi, sehingga antenna yang dirancang dinyatakan layak digunakan pada sistem komunikasi pada rentang frekuensi 700–800 MHz.

4.5 Analisis Data Hasil Simulasi dan Data Hasil Pengujian

Data dianalisis dengan membandingkan hasil simulasi menggunakan perangkat lunak CST dengan data yang diperoleh dari pengujian aktual. Beberapa parameter yang dibandingkan meliputi *return loss*, *bandwidth*, VSWR, pola radiasi, dan *gain*. Melalui analisis data dari pengujian medan dekat, dapat dievaluasi apakah performa antenna yang diuji sudah memenuhi spesifikasi dan juga sesuai dengan hasil simulasi.

4.5.1 Analisis Return Loss

Perbandingan antara data hasil simulasi dan data hasil pengujian untuk *return loss* pada frekuensi kerja 700-800 MHz dapat dilihat dalam Gambar 4.12.



Gambar 4.12 Parameter *return loss* hasil simulasi frekuensi 700-800 MHz



Gambar 4.13 Parameter *return loss* hasil pengujian frekuensi 700-800 MHz

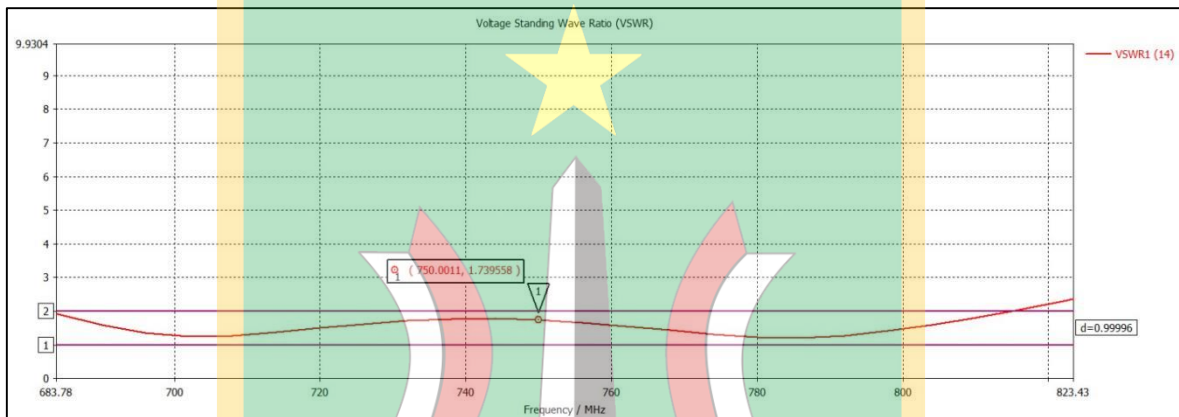
Gambar 4.12 hingga Gambar 4.13 memaparkan perbandingan antara hasil simulasi dan hasil pengujian dari antenna mikrostrip yang telah di fabrikasi. Terlihat bahwa pada frekuensi kerja 700-800 MHz, nilai *return loss* yang diukur dari antenna yang selesai dibuat adalah -15,99 dB. Angka ini kurang dari nilai *return loss* hasil simulasi yang mencapai -20,67 dB.

Perbedaan-perbedaan tersebut disebabkan oleh beberapa faktor, termasuk kerugian-kerugian yang terjadi pada konektor yang digunakan oleh antenna mikrostrip, proses *etching*,

bahan FR4 yang digunakan, dan juga proses fabrikasi antenna yang mungkin tidak sempurna, sehingga mengakibatkan hasil fabrikasi tidak selaras dengan desain yang dihasilkan dari simulasi, dan keakuratan instrumen pengukuran serta pengaruh medan-medan elektromagnetik di sekitar tempat pengukuran. Hal ini berdampak pada perbedaan nilai parameter saat pengujian dilakukan. Besarnya nilai *return loss* yang didapatkan mengindikasikan bahwa daya yang hilang pada saat pentransmisian antenna semakin kecil.

4.5.2 Analisis VSWR

Selanjutnya, perbandingan nilai VSWR hasil simulasi dengan hasil pengujian dapat ditemukan pada Gambar 4.14 hingga Gambar 4.15.



Gambar 4.14 Parameter VSWR hasil simulasi frekuensi 700-800 MHz



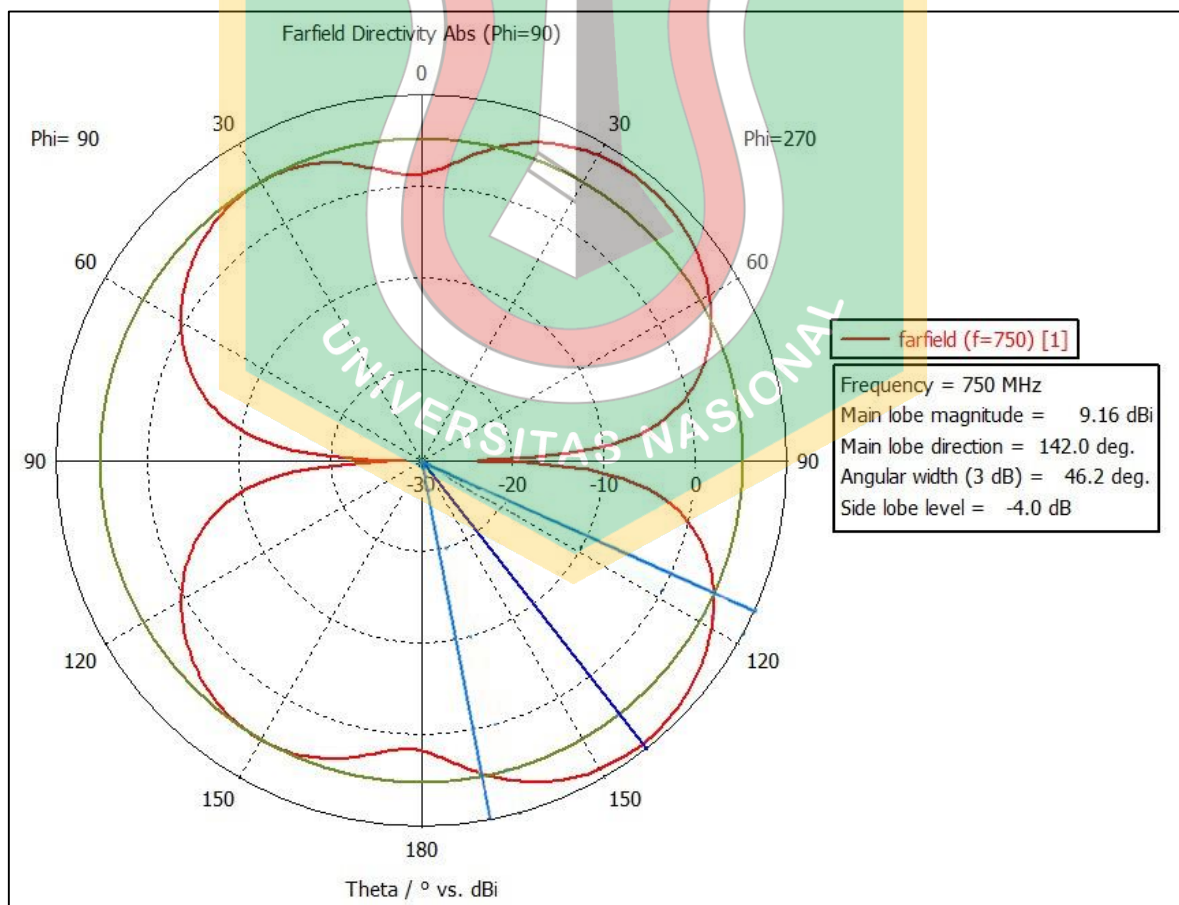
Gambar 4.15 Parameter VSWR hasil pengujian frekuensi 700-800 MHz

Grafik perbandingan nilai VSWR dari hasil simulasi dan pengujian tergambar dalam Gambar 4.14 hingga Gambar 4.15. Pada frekuensi kerja 700-800 MHz, hasil pengujian VSWR menunjukkan nilai 1,381, yang melebihi nilai VSWR hasil simulasi yakni 1,739.

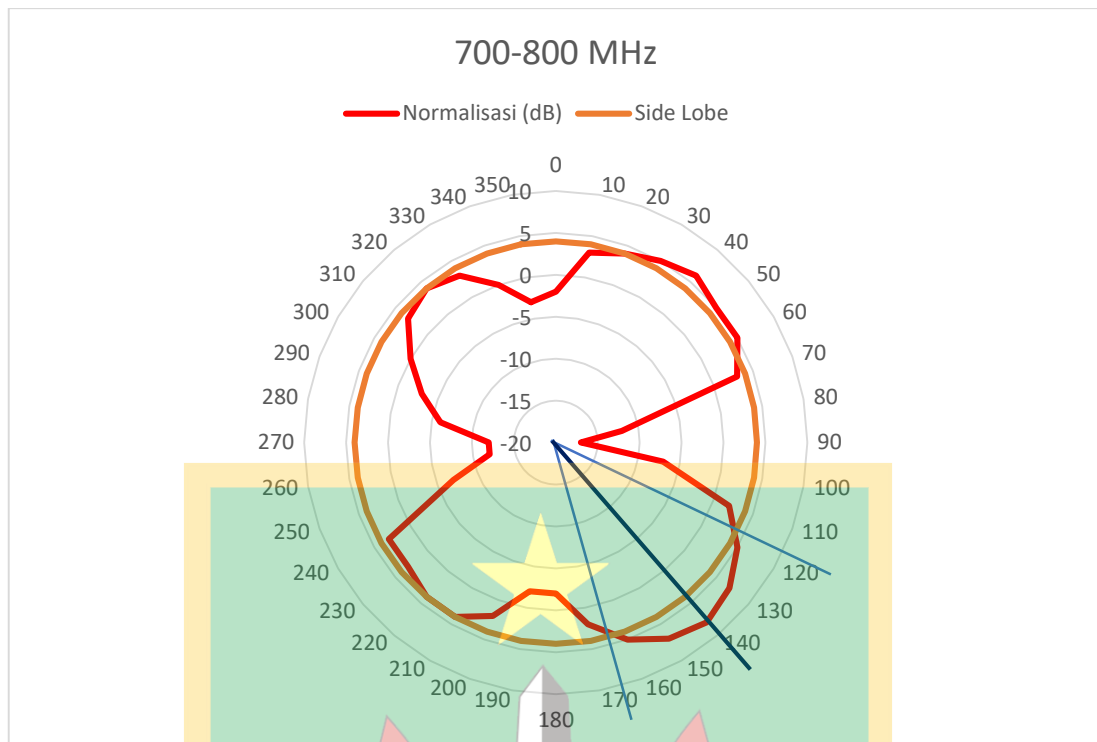
Perbedaan-perbedaan tersebut disebabkan oleh beberapa faktor, termasuk kerugian-kerugian yang terjadi pada konektor yang digunakan oleh antenna mikrostrip, proses *etching*, bahan FR4 yang digunakan, dan juga proses fabrikasi antenna yang mungkin tidak sempurna, sehingga mengakibatkan hasil fabrikasi tidak selaras dengan desain yang dihasilkan dari simulasi, dan keakuratan instrumen pengukuran serta pengaruh medan-medan elektromagnetik di sekitar tempat pengukuran. Hal ini berdampak pada perbedaan nilai parameter saat pengujian dilakukan. Besarnya nilai VSWR yang didapatkan menyebabkan koefisien pantul akan lebih kecil, sehingga performansi antenna semakin baik.

4.5.3 Analisis Pola Radiasi dan Gain

Selanjutnya, perbandingan hasil pengujian dan simulasi pola radiasi dapat ditemukan dalam Gambar 4.16 dan Gambar 4.17.



Gambar 4.16 Parameter pola radiasi hasil simulasi 700-800 MHz



Gambar 4.17 Parameter pola radiasi hasil pengujian pola radiasi 700-800 MHz

Visualisasi radiasi tersebut juga menunjukkan karakteristik pola pancar pada bidang H-Plane yang direpresentasikan melalui irisan sumbu YZ, di mana distribusi energi tersebar secara simetris dan menunjukkan fokus direktivitas yang stabil. Gambar perbandingan hasil pengujian pola radiasi dengan simulasi terlihat pada Gambar 4.16 dan Gambar 4.17. Kedua gambar tersebut menyajikan representasi 2D dari pola radiasi yang diambil pada bidang irisan (*cut plane*) $\phi = 90^\circ$. Berdasarkan hasil simulasi pada irisan ini, pola radiasi yang terbentuk memiliki karakteristik direksional dengan arah pancaran utama (*main lobe direction*) condong pada sudut 142° . Meskipun secara visual pola tersebut menyerupai bentuk bidireksional, namun terdapat perbedaan kekuatan pancaran antara sisi depan dan belakang (*side lobe level*) sebesar $-4,0$ dB, yang menunjukkan bahwa energi lebih dominan terpancar ke arah 142° .

Data dari pola radiasi ini kemudian diolah untuk menghitung nilai *gain*. Pada pengujian kondisi horizontal dengan frekuensi kerja 700-800 MHz, ditemukan nilai *gain* sebesar 9,06 dBi, sementara hasil simulasi menghasilkan nilai *gain* 9,16 dBi. Pada frekuensi kerja dengan kondisi ini, nilai *gain* dari hasil pengujian sedikit lebih kecil daripada hasil simulasi.

Perbedaan-perbedaan tersebut disebabkan oleh beberapa faktor, termasuk kerugian-kerugian (*losses*) yang terjadi pada konektor yang digunakan oleh antenna mikrostrip, proses *etching*, bahan FR4 yang digunakan, dan juga proses fabrikasi antenna yang mungkin tidak

sempurna. Hal ini mengakibatkan hasil fabrikasi tidak selaras sepenuhnya dengan desain yang dihasilkan dari simulasi. Selain itu, keakuratan instrumen pengukuran serta pengaruh medan-medan elektromagnetik di sekitar tempat pengukuran juga berdampak pada perbedaan nilai parameter saat pengujian dilakukan.

4.5.4 Analisis Bandwidth Absolut dan Bandwidth Relatif

Pada bagian ini disajikan analisis lanjutan terhadap parameter antenna berdasarkan data hasil pengukuran fabrikasi yang telah diperoleh pada pengujian sebelumnya. Parameter yang dianalisis meliputi bandwidth absolut, bandwidth relatif, arah lobe utama, half power beamwidth (HPBW), front to back ratio (FBR), serta directivity antenna.

Bandwidth absolut merupakan rentang frekuensi total di mana antenna dapat bekerja secara efektif, yang umumnya dibatasi oleh nilai return loss ≤ -10 dB.

Rumus bandwidth absolut dinyatakan sebagai:

Berdasarkan data pengukuran return loss yang telah dibahas pada Subbab 4.2.1, diperoleh:

$$f_L = 700\text{MHz (pada return loss } -10 \text{ dB)}$$

$$f_H = 890\text{MHz (pada return loss } -10 \text{ dB)}$$

$$BW = 890 \text{ MHz} - 700 \text{ MHz}$$

$$BW = 190 \text{ MHz}$$

Bandwidth absolut antenna yang terukur adalah 190 MHz, yang menunjukkan bahwa antenna telah memenuhi bahkan melampaui spesifikasi minimum bandwidth sebesar 100 MHz.

Bandwidth relatif menyatakan perbandingan lebar pita frekuensi terhadap frekuensi tengahnya. Parameter ini menunjukkan seberapa lebar karakteristik kerja antenna (wideband).

$$f_c = \frac{890 + 700}{2} = 790 \text{ MHz}$$

$$\%BW = \left(\frac{190}{790} \right) \times 100\%$$

$$\%BW = 24,05\%$$

Dengan bandwidth relatif sebesar 24,05%, antenna ini dapat dikategorikan sebagai wideband antenna, mengingat antenna mikrostrip konvensional umumnya hanya memiliki bandwidth sekitar 2–5%. Karakteristik wideband ini konsisten dengan penerapan teknik partial ground plane pada desain antenna.

4.5.5 Analisis Arah Lobe Utama dan HPBW

Arah lob utama menunjukkan sudut di mana antenna memancarkan daya maksimum. Berdasarkan Tabel 4.4 (data pola radiasi), nilai daya diterima tertinggi diperoleh pada:

−14,88 dBm pada sudut 140°

Arah pancaran utama (main lobe) antenna berada pada sudut 140° (azimuth), yang mengindikasikan bahwa antenna memiliki karakteristik satu arah (directional).

Half Power Beamwidth (HPBW) merupakan lebar sudut di mana daya pancar antenna turun sebesar 3 dB dari daya maksimum.

Daya maksimum $P_{max} = -14,88\text{dBm}$ (pada 140°)

Batas −3 dB:

$$P_{HPBW} = -14,88 - 3 = -15,88 \text{ dBm}$$

Berdasarkan data di sekitar sudut 140°:

Sudut 120° → −17,50 dBm

Sudut 160° → −17,20 dBm

$$HPBW = 160^\circ - 120^\circ = 40^\circ$$

Nilai HPBW antenna adalah 40°, yang menunjukkan bahwa antenna memiliki pancaran yang relatif terfokus pada bidang horizontal.

4.5.6 Analisis *Front to Back Ratio* (FBR)

Front to Back Ratio (FBR) menyatakan perbandingan daya pancar ke arah depan (main lobe) terhadap daya pancar ke arah belakang (berlawanan 180°).

Arah depan (140°): $P_{max} = -14,88\text{dBm}$

Arah belakang (140° + 180° = 320°): $P_{back} = -15,05\text{dBm}$

$$FBR = -14,88 - (-15,55) = 0,67 \text{ dB}$$

Nilai FBR yang sangat kecil menunjukkan bahwa daya pancar ke arah depan dan belakang hampir sama besar.

Meskipun antenna dirancang bersifat direksional, hasil pengukuran menunjukkan bahwa antenna memiliki karakteristik bi-directional, yang disebabkan oleh penggunaan partial ground plane sehingga radiasi ke depan dan belakang menjadi relatif seimbang.

Directivity menunjukkan kemampuan antenna dalam memusatkan energi ke arah tertentu dibandingkan antenna isotropis, tanpa memperhitungkan rugi-rugi atau efisiensi.

Karena data efisiensi antenna dan pola radiasi vertikal tidak tersedia, directivity dianalisis menggunakan dua pendekatan estimasi.

Pendekatan A: Berdasarkan Gain Terukur

Dengan asumsi rugi-rugi relatif kecil, directivity dapat didekati oleh nilai gain:

$$D \approx G = 9,06 \text{ dBi}$$

Pendekatan B: Aproksimasi Kraus (berdasarkan HPBW)

Maka directivity dihitung dengan rumus Kraus:

$$D \approx \frac{41.253}{\theta_{HPBW} \times \phi_{HPBW}}$$
$$D \approx \frac{41.253}{40 \times 40} = 25,78$$

Konversi ke dBi:

$$D_{dBi} = 10\log(25,78) \approx 14,1 \text{ dBi}$$

Directivity teoritis antenna berdasarkan rumus Kraus adalah sekitar 14,1 dBi, sedangkan gain terukur hanya 9,06 dBi. Selisih sekitar 5 dB disebabkan oleh rugi-rugi pada material FR4, konektor, mismatch, serta kemungkinan perbedaan pola radiasi vertikal dan horizontal. Oleh karena itu, nilai gain terukur 9,14 dBi digunakan sebagai parameter utama performa antenna dalam laporan ini.

4.5.7 Analisis Kesalahan Relatif (*Relative Error*)

Untuk mengukur selisih antara hasil pengujian dan simulasi, perhitungan kesalahan (error) dapat dilakukan menggunakan Persamaan 2.24. Perhitungan kesalahan relatif pada masing-masing parameter antenna pada frekuensi kerja 700-800 MHz diberikan sebagai berikut:

a. *Return Loss*

$$Error = \left| \frac{(-15,99) - (-20,67)}{(-20,67)} \right| \times 100\%$$

$$Error = 22,64\%$$

b. *Bandwidth*

$$Error = \left| \frac{190 - 129,46}{129,46} \right| \times 100\%$$

$$Error = 31,45\%$$

c. *VSWR*

$$Error = \left| \frac{1,381 - 1,739}{1,739} \right| \times 100\%$$

$$Error = 20,59\%$$

d. *Impedansi*

$$Error = \left| \frac{68,72 - 59,66}{59,66} \right| \times 100\%$$

$$Error = 15,19\%$$

e. Gain

$$Error = \left| \frac{9,06 - 9,16}{9,16} \right| \times 100\%$$

$$Error = 1,09\%$$

Berdasarkan perhitungan dengan menggunakan rumus tersebut, diperoleh *persentase* kesalahan relatif yang kemudian ditampilkan dalam Tabel 4.5.

Tabel 4.5 *Relative error* perbandingan hasil pengujian dan hasil simulasi

Parameter	Hasil Simulasi	Hasil Pengujian	Relative Error
	700-800 MHz	700-800 MHz	700-800 MHz
Return Loss (dB)	-20,67	-15,99	22,64
Bandwidth (MHz)	129,46	190	31,45
VSWR	1,739	1,381	20,59
Impedansi (ohm)	59,66	68,72	15,19
Gain (dBi)	9,16	9,06	1,09

Dari Tabel 4.5, terlihat nilai kesalahan relatif dari setiap parameter terhadap hasil simulasi dan pengujian. Pada frekuensi kerja 700-800 MHz, nilai kesalahan relatif parameter adalah sebagai berikut: *return loss* sebesar 22,64%, *bandwidth* sebesar 31,45%, VSWR sebesar 20,59%, impedansi sebesar 15,19%, dan *gain* sebesar 1,09%.

4.5.8 Perbandingan Spesifikasi dan Hasil Akhir

Perbandingan antara hasil pengujian dan spesifikasi antenna yang telah dirancang diberikan dalam Tabel 4.6.

Tabel 4.6 Perbandingan spesifikasi dengan hasil pengujian antenna mikrostrip

Parameter	Spesifikasi	Hasil Pengujian
	700-800 MHz	700-800 MHz
Return Loss (dB)	≤ -10	-15,99
Bandwidth (MHz)	100	190
VSWR	≤ 2	1,381
Impedansi (ohm)	50	68,72
Gain (dBi)	≥ 6	9,06

Dari informasi dalam Tabel 4.6, dapat disimpulkan bahwa nilai parameter yang dihasilkan dari pengujian antenna mikrostrip telah memenuhi spesifikasi rancangan yang ditetapkan. Oleh karena itu, hasil perancangan antenna mikrostrip dengan *rectangular patch*

array 4×4 dapat diaplikasikan dalam penggunaan aplikasi seluler 5G pada frekuensi kerja 700-800 MHz.

