

Studi Simulasi dan Analisis Kinerja *Array* Antenna Microstrip Patch Dua Elemen untuk Aplikasi Deteksi Tumor Otak

Hasan Abdul Lathif¹

¹ Program Studi Teknik Biomedik, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

hasan.abdul@ui.ac.id

Abstract — This research presents a simulation study of a two-element microstrip patch antenna array for non-invasive brain tumor detection. Designed on an FR-4 substrate, the antenna operates at 1.005 GHz and is analyzed using CST Studio Suite on a three-layer head phantom. Results show excellent impedance matching and high isolation. Measurable shifts in S-Parameter between healthy and tumorous condition confirms the system's detection capability. The Specific Absorption Rate (SAR) analysis at 0.01 W input power yields a safe value of 0.778 W/kg. This study indicates the proposed antenna has potential as a safe and effective detection tool

Keyword — Antenna Array, Brain Tumor Detection, Microstrip Patch, Microwave Imaging, SAR.

Abstrak — Penelitian ini menyajikan studi simulasi *array* antenna *microstrip* patch dua elemen untuk deteksi tumor otak non-invasif. Dirancang pada substrat FR-4, antenna beroperasi pada 1.005 GHz dan dianalisis menggunakan *CST Studio Suite* pada *phantom* kepala tiga lapis. Hasil menunjukkan *impedance matching* dan isolasi yang sangat baik. Pergeseran terukur pada *S-parameter* antara kondisi sehat dan dengan tumor mengonfirmasi kemampuan deteksi sistem. Analisis *Specific Absorption Rate* (SAR) pada daya 0.01 W menghasilkan nilai aman 0.778 W/kg. Studi ini menunjukkan antenna yang diusulkan berpotensi sebagai alat deteksi yang aman dan efektif

Kata kunci — *Array* Antena, Deteksi Tumor Otak, *Microwave Imaging*, SAR, *Microstrip* Patch

I. PENDAHULUAN

Kanker otak merupakan kondisi medis serius dan menjadi salah satu penyebab kematian yang sering terjadi di seluruh dunia [1] [4] [5]. Pada tahun 2020, kanker menarik sekitar 10 juta nyawa secara global, dengan angka yang diperkirakan akan terus meningkat [3]. Otak adalah organ yang paling penting dan kompleks karena fungsinya dalam mengontrol seluruh organ tubuh, membuat kanker otak salah satu jenis kanker yang sulit untuk ditangani. Oleh karena itu, deteksi dini diperlukan untuk keberhasilan pengobatan dan peningkatan kualitas perawatan pasien. Namun, menentukan lokasi tumor pada tahap awal menjadi tantangan karena ukurannya yang kecil dan beberapa keterbatasan pada metode deteksi yang ada saat ini [4].

Metode diagnostik konvensional seperti *Magnetic Resonance Imaging* (MRI) dan *Computed Tomography* (CT) *scan* telah umum digunakan untuk mendeteksi tumor otak [1]. Dalam hampir semua kasus, metode ini dapat menunjukkan keberadaan tumor di otak [3]. Meskipun demikian, metode ini memiliki beberapa kelemahan, seperti biaya yang mahal, proses yang memakan waktu lama, dan tidak mudah diakses oleh masyarakat luas karena memerlukan fasilitas khusus. Selain itu, CT *scan* melibatkan paparan radiasi pengion yang berbahaya jika digunakan secara berulang [1][2]. Tingginya biaya prosedur ini, yang

dapat mencapai ribuan dolar AS, menjadi penghalang besar dan menunjukkan adanya kebutuhan akan teknologi alternatif yang lebih efisien.

Dalam beberapa tahun terakhir, teknik pencitraan gelombang mikro (*microwave imaging*) telah muncul sebagai pendekatan baru yang menjanjikan, menawarkan sistem yang aman, hemat biaya, bersifat non-invasif, dan memiliki akurasi yang tinggi. Teknik ini menggunakan radiasi non-ionisasi, sehingga menjadi alternatif yang lebih aman dibandingkan dengan metode yang menggunakan radiasi pengion. *Microwave imaging* juga memiliki keunggulan lain seperti konsumsi daya yang lebih rendah dan kemampuan penetrasi yang baik [1] [6].

Prinsip dasar dari deteksi menggunakan gelombang mikro adalah adanya perbedaan sifat dielektrik antara jaringan otak yang sehat dan jaringan tumor [3] [6]. Sel kanker dapat dibedakan dari jaringan sehat di sekitarnya karena adanya perbedaan karakteristik kelistrikan, seperti permitivitas dan konduktivitas. Dalam metode ini, antena memancarkan gelombang elektromagnetik ke arah kepala, dan gelombang tersebut berinteraksi dengan berbagai lapisan jaringan. Jaringan tumor akan menghasilkan sinyal pantulan yang lebih kuat dibandingkan jaringan sehat. Sinyal pantulan yang diterima kembali oleh antena kemudian dianalisis untuk mendeteksi abnormalitas. Teknik ini sering kali menggunakan pendekatan berbasis RADAR yang memanfaatkan *backscattering* untuk mengidentifikasi objek di dalam medium dielektrik seperti otak. Analisis parameter seperti koefisien refleksi (dikenal juga sebagai S-parameter) akan berguna untuk mengidentifikasi keberadaan tumor [1] [3] [6].

Penggunaan antenna *microstrip patch* merupakan pendekatan yang digunakan untuk aplikasi biomedis ini. Antena jenis ini memberikan berbagai keuntungan seperti ukuran yang *compact*, berprofil rendah, ringan, dan hemat biaya, sehingga ideal untuk diintegrasikan ke dalam perangkat medis yang sudah ada atau perangkat *wearable*. Antena ini juga mampu menghasilkan sinyal berkualitas tinggi yang diperlukan untuk pencitraan diagnostik. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk merancang dan menganalisis antenna *microstrip patch* yang dapat digunakan untuk deteksi tumor otak pada perangkat lunak *CST Studio Suite*.

II. DESAIN ANTENNA

Desain antena yang dibuat dalam penelitian ini adalah sebuah *array* antena yang terdiri dari dua elemen antena *microstrip patch* identik yang telah disesuaikan. Penggunaan konfigurasi dua antena ini bertujuan untuk memungkinkan analisis parameter transmisi (S21) dan

parameter refleksi (S11), yang berpotensi meningkatkan kemampuan deteksi. Desain setiap elemen mengikuti konsep yang ada pada beberapa literatur, dengan menggabungkan struktur dasar antenna persegi yang dimodifikasi dengan beberapa *slot* untuk meningkatkan kinerjanya.

Perancangan dimensi awal dari antenna *microstrip patch* ini didasarkan pada formula matematis standar yang sudah sesuai. Persamaan-persamaan ini digunakan untuk menghitung parameter penting seperti lebar dan panjang *patch* agar antenna dapat beresonansi pada frekuensi kerja yang ditargetkan [1][2].

Lebar dari *patch* antenna (W_p) dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$W_p = \frac{c}{2f_r \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}} \quad (1)$$

Dimana c adalah kecepatan cahaya di ruang hampa (3×10^8 m/s), f_r adalah frekuensi resonansi, dan ϵ_r adalah permitivitas relatif dari material substrat.

Karena adanya efek *fringing field*, panjang efektif dari *patch* menjadi sedikit lebih panjang dari panjang fisiknya. Untuk itu, konstanta dielektrik efektif (ϵ_{reff}) dan perpanjangan panjang (ΔL) perlu dihitung. Konstanta dielektrik efektif dihitung dengan:

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W_p} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (2)$$

Panjang efektif (L_{eff}) kemudian dihitung sebagai:

$$L_{eff} = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{reff}}} \quad (3)$$

Perpanjangan panjang akibat *fringing field* (ΔL) dihitung menggunakan:

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{reff} + 0.3) \left(\frac{W_p}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{reff} - 0.258) \left(\frac{W_p}{h} + 0.8 \right)} \quad (4)$$

Akhirnya, panjang fisik aktual dari *patch* (L_p) dapat ditentukan dengan mengurangi dua kali perpanjangan panjang dari panjang efektifnya:

$$L_p = L_{eff} + 2\Delta L \quad (5)$$

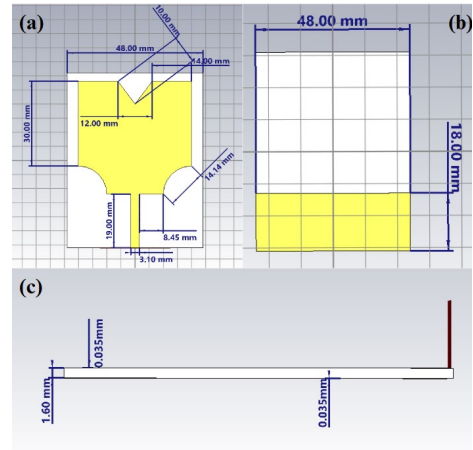
Dimensi keseluruhan dari substrat (W_s dan L_s) juga ditentukan berdasarkan dimensi *patch* untuk memastikan kinerja radiasi yang memadai:

$$W_s = W_p + 6h \quad (6)$$

$$L_s = L_p + 6h \quad (7)$$

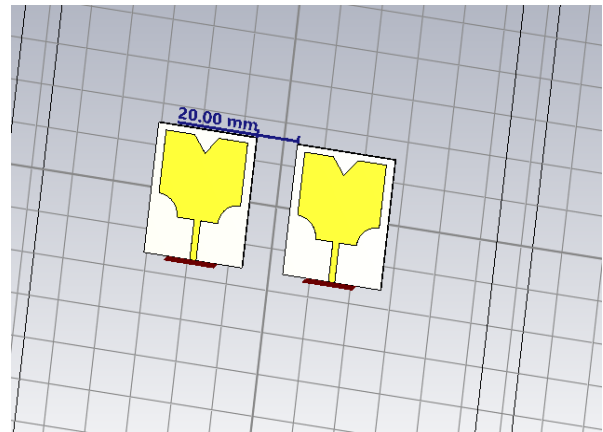
Gambar 1. Memberi gambaran pada antenna yang dibangun di atas substrat FR-4 (*lossy*) dengan ketebalan 1.6 mm dan permitivitas relatif sekitar 4.3 hingga 4.4. Material FR-4 dipilih karena ketersediaannya yang luas dan karakteristik dielektriknya yang memadai untuk aplikasi pada frekuensi target. Modifikasi utama pada *patch* antenna mencakup penambahan dua potongan semi-silinder atau busur (*arc*) pada sisi-sisinya dan sebuah *slot* berbentuk V di

bagian atas *patch*. Tujuan dari penambahan *slot* ini adalah untuk mengubah distribusi arus pada permukaan *patch*, yang dapat membantu dalam penyesuaian frekuensi resonansi dan meningkatkan karakteristik impedansi antenna. Selain itu, antenna ini menggunakan struktur *partial ground plane* atau *defected ground structure* (DGS), di mana bidang ground tidak menutupi seluruh bagian bawah substrat, yang bertujuan untuk meningkatkan lebar pita (*bandwidth*) operasional antenna [1][2][3][4].



Gambar 1. Tampilan Antenna yang Diusulkan (a) depan (b) belakang (c) samping

Gambar 2. menunjukkan dedua elemen antenna identik ini ditempatkan secara bersampingan. Sebuah parameter dalam desain *array* ini adalah jarak antar-elemen, yaitu jarak antara pusat antenna pertama dan kedua. Jarak ini sangat memengaruhi *mutual coupling* (kopling bersama) dan tingkat isolasi (S21) antar antenna. Jarak yang terlalu dekat dapat menyebabkan interferensi yang tinggi, sementara jarak yang terlalu jauh membuat ukuran total perangkat menjadi tidak praktis. Sebagai aturan umum, jarak minimal antar antenna sering kali dihubungkan dengan panjang gelombang (λ) pada frekuensi kerja. Sebagai titik awal untuk optimasi dalam simulasi ini, diusulkan jarak antar-elemen sebesar 20 mm, yang memberikan keseimbangan antara isolasi yang memadai dan ukuran perangkat yang tetap ringkas [1][2][3][4].



Gambar 2. Geometri *Array* Antenna Dua Elemen yang Diusulkan.

TABEL I

PARAMETER DAN DIMENSI *ARRAY* ANTENNA YANG DIUSULKAN

Parameter	Deskripsi	Nilai (mm)
L_s	Panjang Substrat	62
W_s	Lebar Substrat	48
h	Tebal Substrat (FR-4)	1.6
L_p	Panjang <i>Patch</i>	40
W_p	Lebar <i>Patch</i>	40
t	Tebal Tembaga (<i>Copper</i>)	0.035
L_f	Panjang Saluran Pencatu	19
W_f	Lebar Saluran Pencatu	3.1
L_g	Panjang Ground Plane	18
S_1	Panjang Sisi <i>V-Slot</i>	14
S_2	Panjang Potongan Busur	14.14

Antena ini dirancang untuk beroperasi pada rentang frekuensi rendah, dengan target awal sekitar 1.8 GHz hingga 1.9 GHz. Pemilihan frekuensi yang lebih rendah ini diutamakan karena kemampuannya yang lebih baik untuk melakukan penetrasi ke dalam jaringan biologis otak manusia.

III. METODOLOGI PENELITIAN

A. Perancangan dan Simulasi Antena

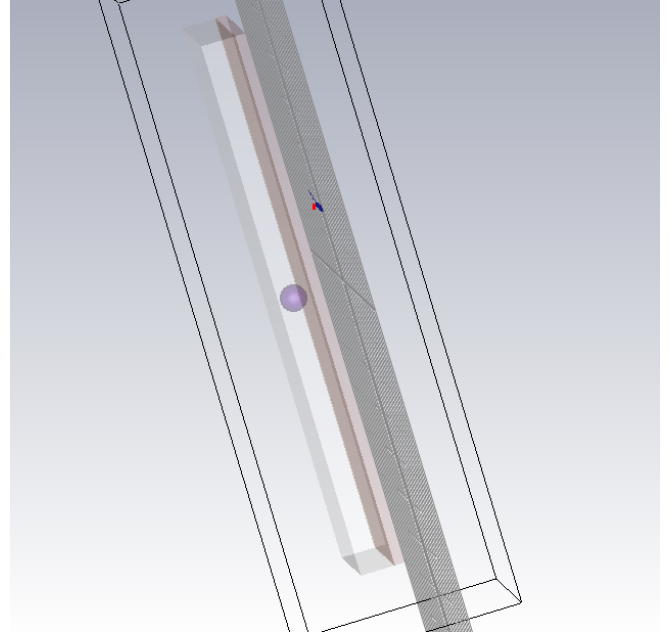
Langkah pertama dalam penelitian ini adalah merancang geometri antena *microstrip patch* yang telah dimodifikasi berdasarkan parameter yang dibahas pada bab sebelumnya. Proses ini melibatkan pembuatan model tiga dimensi dari substrat, *patch* tembaga, *feedline*, dan *ground plane* di dalam perangkat lunak CST. Setelah desain awal dibuat, dilakukan proses simulasi untuk mengevaluasi kinerjanya pada kondisi ruang bebas (*free space*). Proses ini bersifat iteratif, di mana dimensi antena dapat dimodifikasi untuk mencapai karakteristik yang diinginkan, terutama pada parameter *return loss* (S_{11}), sebelum diuji dengan model *phantom* kepala. Untuk memastikan gelombang elektromagnetik dapat beradiasi dengan bebas tanpa pantulan dari batas area simulasi, kondisi batas (*boundary conditions*) diatur sebagai *open* (*add space*), yang mensimulasikan lingkungan *anechoic chamber* [1][2].

B. Pemodelan Phantom Kepala

Untuk mensimulasikan interaksi antena dengan kepala manusia secara realistis, dibuat sebuah model *phantom* kepala. *Phantom* adalah objek yang dirancang untuk meniru sifat-sifat kelistrikan dari jaringan biologis hidup. Model yang digunakan dalam penelitian ini adalah *phantom* kepala

berlapis yang merepresentasikan berbagai jenis jaringan utama di kepala manusia.

Struktur *phantom* ini terdiri dari tiga lapisan utama yang disusun secara sesuai berbentuk persegi, yaitu kulit (*skin*), lemak (*fat*), dan tulang tengkorak (*skull*), yang dapat dilihat pada Gambar 3. Setiap lapisan memiliki nilai permitivitas, konduktivitas, dan densitas yang berbeda sesuai dengan karakteristik jaringan aslinya, seperti yang dirangkum dalam Tabel II. Penggunaan model berlapis ini sangat penting karena kemampuan deteksi bergantung pada perbedaan sifat dielektrik antarjaringan [1][2].



Gambar 3. Model phantom Kepala 3 Lapis dengan Tumor

TABEL II
KARAKTERISTIK PHANTOM

Jaringan	Permitivitas Relatif	Konduktivitas	Densitas
Kulit (Skin)	42.85	1.59	1090
Lemak (Fat)	10.82	0.26	910
Tengkorak (Skull)	14.96	0.59	1850
Tumor	55.8	4.2	1070

Untuk skenario deteksi, sebuah model tumor berbentuk bola dengan radius tertentu ditanamkan di dalam lapisan otak pada *phantom*. Tumor ini memiliki sifat dielektrik yang berbeda secara signifikan dari jaringan otak yang sehat, yang menjadi dasar fisis dari metode deteksi ini.

B. Metrik Evaluasi Kinerja

Dengan menggunakan sistem dua antena, pendekatan evaluasi kinerja menjadi lebih komprehensif. Analisis tidak hanya terbatas pada parameter refleksi satu antena, tetapi mencakup seluruh matriks *S-parameter* untuk sistem dua port, serta metrik keamanan SAR.

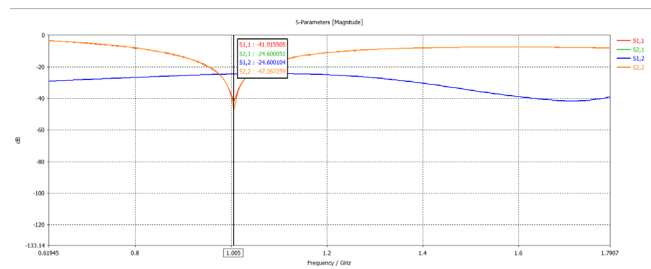
Seluruh metrik dievaluasi dengan membandingkan hasil simulasi antara dua skenario utama: *phantom* kepala tanpa tumor (kondisi sehat) dan *phantom* kepala dengan adanya model tumor. Perbedaan hasil antara kedua skenario inilah yang menjadi dasar untuk deteksi. Parameter yang dievaluasi meliputi S11 dan S22, yang merupakan *return loss* untuk Antena 1 dan Antena 2. Parameter ini penting untuk memastikan kedua antena memiliki *impedance matching* yang baik dan beroperasi secara efisien [10].

Adanya parameter S21 dan S12, yang dikenal sebagai koefisien transmisi atau isolasi. Parameter S21 mengukur seberapa besar sinyal yang dipancarkan oleh Antena 1 diterima oleh Antena 2 setelah melewati medium *phantom*. Nilai isolasi yang baik (sangat rendah, -20 dB) menandakan minimnya interferensi. Lebih dari itu, perubahan pada magnitudo S21 saat ada tumor dapat menjadi indikator deteksi yang sangat kuat, karena tumor akan mengubah lintasan dan karakteristik sinyal yang merambat antar antena. Sebagai tambahan, *Voltage Standing Wave Ratio* (VSWR) juga dianalisis untuk mengonfirmasi tingkat *impedance matching* [7][10].

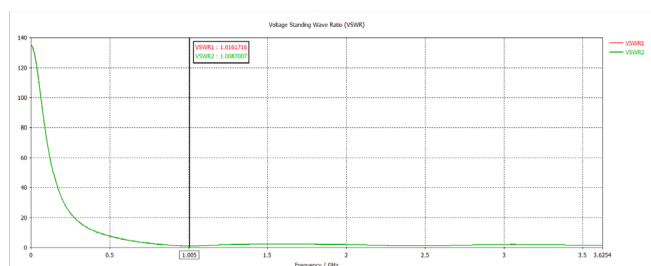
Terakhir, analisis keamanan dilakukan dengan menghitung *Specific Absorption Rate* (SAR). SAR adalah ukuran laju penyerapan energi RF oleh jaringan tubuh dan penting untuk dievaluasi agar tidak melebihi batas aman yang ditetapkan, yaitu 1.6 W/kg untuk rata-rata 1 gram jaringan. Analisis SAR dilakukan untuk memastikan desain akhir aman untuk digunakan pada aplikasi medis yang bersentuhan langsung dengan tubuh manusia [8][9].

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini, akan dibahas dan dianalisis secara mendalam hasil simulasi dari *array* antena dua elemen yang telah dirancang. Analisis berfokus pada evaluasi kinerja antena saat ditempatkan pada model *phantom* kepala, baik dalam kondisi tanpa tumor (sehat) maupun dengan adanya model tumor. Kinerja antena dievaluasi melalui parameter kunci seperti *S-parameter* dan *Voltage Standing Wave Ratio* (VSWR) untuk menentukan efisiensi dan potensi deteksinya.

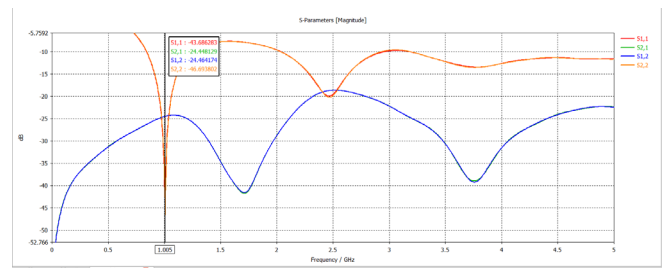


Gambar 4. Grafik S-Parameter pada *Phantom* Tanpa Tumor.

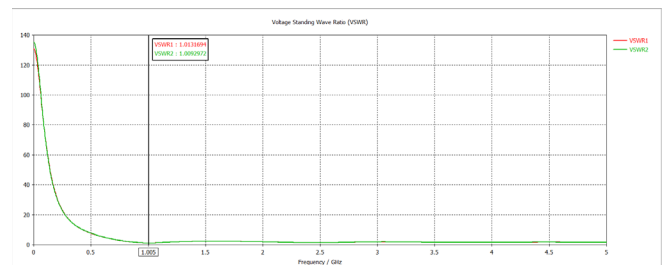


Gambar 5. Grafik VSWR pada *Phantom* Tanpa Tumor.

Evaluasi awal dilakukan pada kondisi tanpa tumor untuk menetapkan kinerja dasar (*baseline*) dari sistem antena. Gambar 4 dan Gambar 5 menunjukkan hasil simulasi untuk kasus ini. Dari hasil tersebut, dapat diidentifikasi bahwa antena bekerja secara optimal pada frekuensi resonansi 1.005 GHz. Pada frekuensi ini, antena menunjukkan kinerja *impedance matching* yang sangat baik. Nilai *return loss* untuk Antena 1 (S11) dan Antena 2 (S22) masing-masing mencapai -41.91 dB dan -47.25 dB. Nilai-nilai ini jauh lebih rendah dari standar umum -10 dB, yang mengindikasikan bahwa hampir semua daya berhasil diradiasikan oleh antena dengan pantulan yang sangat minimal. Kinerja ini juga dikonfirmasi oleh nilai VSWR yang sangat mendekati ideal, yaitu 1.016 untuk Antena 1 dan 1.008 untuk Antena 2. Selain itu, tingkat isolasi antar antena (S21) pada frekuensi ini juga sangat baik, yaitu sebesar -24.60 dB, yang berada di bawah ambang batas -20 dB dan menandakan minimnya interferensi atau *mutual coupling* antara kedua elemen antena. Hasil ini menunjukkan bahwa *array* antena yang dirancang berfungsi dengan sangat efisien pada model *phantom* kepala dalam kondisi sehat.



Gambar 6. Grafik S-Parameter pada *Phantom* Dengan Tumor.

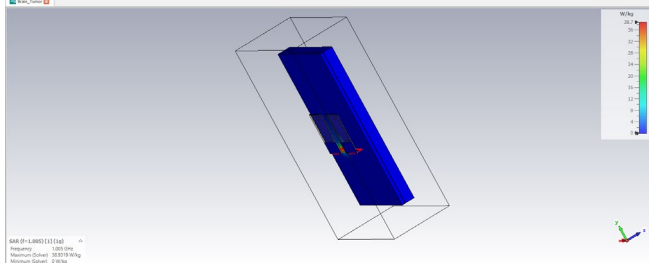


Gambar 7. Grafik VSWR pada *Phantom* Dengan Tumor.

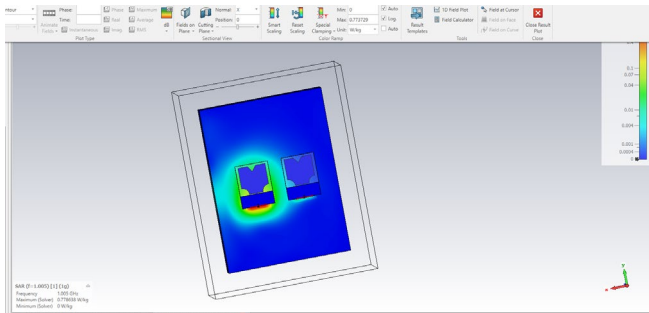
Selanjutnya, analisis dilakukan dengan membandingkan hasil antara skenario tanpa tumor dan dengan adanya model tumor di dalam *phantom*. Gambar 6 dan Gambar 7 menyajikan hasil untuk kondisi ini. Ketika tumor dimasukkan, teramati adanya pergeseran pada nilai *S-parameter* di frekuensi kerja 1.005 GHz. Nilai *return loss* (S11) berubah dari -41.91 dB menjadi -43.68 dB, dan nilai isolasi (S21) bergeser dari -24.60 dB menjadi -24.44 dB. Perubahan ini terjadi karena tumor memiliki sifat dielektrik yang berbeda dari jaringan otak sehat, yang mengubah lingkungan elektromagnetik dan memengaruhi sinyal yang dipantulkan (S11) maupun yang ditransmisikan (S21). Analisis pada hasil VSWR juga menunjukkan perubahan, di

mana nilainya menjadi 1.013 untuk Antena 1 dan 1.009 untuk Antena 2. Jika dibandingkan dengan kondisi tanpa tumor ($VSWR \approx 1.016$ dan 1.008), perubahan yang terjadi pada $VSWR$ sangatlah kecil. Hal ini semakin memperkuat kesimpulan bahwa meskipun $VSWR$ mengonfirmasi kinerja *matching* antena yang sangat baik di kedua skenario, parameter S -parameter (S_{11} , S_{22} , dan S_{21}) adalah metrik yang jauh lebih sensitif dan sesuai untuk mengidentifikasi keberadaan tumor. Pergeseran yang terukur pada matriks S -parameter ini membuktikan bahwa sistem antena yang diusulkan memiliki potensi kuat untuk deteksi non-invasif.

Setelah mengevaluasi kinerja antena melalui S -parameter dan $VSWR$, tahap krusial berikutnya adalah analisis keamanan menggunakan metrik *Specific Absorption Rate* (SAR) pada phantom kepala tanpa tumor. Evaluasi ini bertujuan untuk memastikan bahwa energi frekuensi radio (RF) yang diserap oleh jaringan kepala manusia berada dalam batas aman yang ditetapkan oleh standar internasional. Menurut regulasi dari *Federal Communications Commission* (FCC), batas SAR yang diizinkan untuk paparan pada area kepala adalah 1.6 W/kg , yang dirata-ratakan pada 1 gram jaringan.



Gambar 8. Hasil Simulasi SAR dengan Daya Input 0.5 W.



Gambar 9. Hasil Simulasi SAR dengan Daya Input 0.01 W.

Pada simulasi awal, seperti yang terlihat pada Gambar 8, dengan menggunakan daya input (*input power*) sebesar 0.5 W, diperoleh nilai SAR maksimum sebesar 38.93 W/kg . Nilai ini sangat tinggi dan jauh melampaui batas keamanan yang diizinkan, yang mengonfirmasi bahwa penggunaan daya input *default* atau tinggi pada simulasi menghasilkan nilai SAR yang tidak realistis untuk aplikasi biomedis.

Dilakukan langkah yang menyesuaikan daya input ke tingkat yang lebih realistis dan rendah. Gambar 9 menunjukkan hasil SAR setelah daya input dikurangi menjadi 0.01 W. Dengan penyesuaian ini, hasil simulasi SAR maksimum yang baru adalah 0.778 W/kg . Nilai ini sekarang berada di bawah batas aman 1.6 W/kg , yang merupakan sebuah hasil yang positif. Hal ini menunjukkan bahwa jika dioperasikan pada daya rendah, desain antena aman untuk digunakan pada manusia.

Penurunan nilai SAR ini dapat dipahami secara matematis, karena SAR berbanding lurus dengan daya input yang diberikan. Penyesuaian daya dari 0.5 W menjadi 0.01 W adalah penurunan sebesar 50 kali lipat. Jika kita terapkan faktor penurunan ini pada hasil SAR awal ($38.93 \text{ W/kg} / 50$), kita akan mendapatkan hasil sekitar 0.778 W/kg , yang persis sesuai dengan hasil simulasi baru.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan studi simulasi dan analisis yang telah dilakukan, dapat ditarik beberapa kesimpulan utama. *Array* antena *microstrip patch* dua elemen telah berhasil dirancang dan disimulasikan menggunakan perangkat lunak CST untuk aplikasi deteksi tumor otak. Antena menunjukkan kinerja yang sangat baik pada frekuensi resonansi 1.005 GHz saat diuji pada model *phantom* kepala manusia. Hal ini dibuktikan dengan nilai *return loss* (S_{11}/S_{22}) yang mencapai di bawah -40 dB dan nilai isolasi (S_{21}) sebesar -24.6 dB , yang menandakan *impedance matching* yang optimal serta interferensi antar elemen yang sangat minim.

Kemampuan deteksi sistem ini terbukti valid melalui analisis komparatif. Keberadaan model tumor di dalam *phantom* menyebabkan pergeseran yang terukur pada seluruh matriks S -parameter, termasuk *return loss* dan koefisien transmisi, yang menjadi dasar fisis untuk mendeteksi abnormalitas jaringan. Dari sisi keamanan, setelah dilakukan penyesuaian daya input ke tingkat yang realistis sebesar 0.01 W, nilai SAR maksimum yang dihasilkan adalah 0.778 W/kg . Nilai ini berada jauh di bawah batas aman 1.6 W/kg yang ditetapkan oleh standar internasional FCC. Dengan demikian, *array* antena yang diusulkan menunjukkan potensi yang sangat menjanjikan sebagai alat deteksi tumor otak yang efektif, non-invasif, dan aman untuk dikembangkan lebih lanjut dalam aplikasi biomedis.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Bapak Dr. Basari, S.T., M.Eng., selaku dosen pengampu mata kuliah Elektromagnetika, Perancangan Divais RF Medis, atas bimbingan, arahan, dan dukungan selama pengerjaan proyek dan penyusunan laporan ini.

DAFTAR ACUAN

- [1] A. Amsaveni, P. Pragadesh, S. Anishkumar, and S. M. Harish, "Slotted Microstrip Patch Antenna with DGS for Brain Tumor Detection," in *2023 2nd International Conference on Advancements in Electrical, Electronics, Communication, Computing and Automation (ICAECA)*, 2023, pp. 1-5.
- [2] S. Kalaivani and R. Krishnan, "Design of V-Slot and Arc Shape Patch Antenna for Brain Tumor Detection," in *2025 International Conference on Wireless Communications Signal Processing and Networking (WiSPNET)*, 2025, pp. 1-5.
- [3] E. Ismail, S. El-diasty, M. F. A. Sree, and M. Aboul-Dahab, "Patch antenna design using DGS technique for early detection of brain tumor at stages I to V," in *2024 6th*

International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE), 2024, pp. 1-6.

- [4] K. S. Sharuni, C. Sneka, A. Shuhaina, and B. Vidhya, "Design of microstrip patch antenna for brain tumor detection," in *2022 3rd International Conference on Electronics and Sustainable Communication Systems (ICESC)*, 2022, pp. 379-385.
- [5] I. Abtahi *et al.*, "Detection of Brain Tumor Using Slotted Microstrip Patch Antenna Via Scattering Parameter in the ISM Band," in *2023 5th International Conference on Sustainable Technologies for Industry 5.0 (STI)*, 2023, pp. 1-6.
- [6] K. Lalitha and J. Manjula, "Non-invasive microwave head imaging to detect tumors and to estimate their size and location," *Physics in Medicine*, vol. 13, p. 100047, 2022.
- [7] B. Kamo, S. Cakaj, V. Kolići, and E. Mulla, "Simulation and Measurements of VSWR for Microwave Communication Systems," *Int. J. Communications, Network and System Sciences*, vol. 5, pp. 767-773, Nov. 2012.
- [8] M. M. Milošević *et al.*, "Analysis of specific absorption rate in the human head model exposed to radiofrequency radiation," *Kragujevac J. Sci.*, vol. 45, pp. 7-14, 2023.
- [9] A. M. Hediya, A. M. Attiya, and W. S. El-Deeb, "Reduction of Specific Absorption Rate: A Review Article," *The Egyptian International Journal of Engineering Sciences and Technology*, vol. 39, pp. 80-96, 2022.
- [10] F. Caspers, "RF engineering basic concepts: S-parameters," CERN, Geneva, Switzerland, 2012.