

Reka Bentuk Unit Bahan Meta Boleh Laras dengan Ketelusan dan Kebolehtelapan Negatif untuk Aplikasi 5G

(Design of a Tunable Metamaterial Unit with Negative Permeability and Permittivity for 5G Applications)

Nurul Arbaatun Adawiah Zamanuri^a, Norsuzlin Mohd Sahar^{a*}, Azahari Salleh^b, & M. Tariqul Islam^b

^aSpace Science Centre, Institute of Climate Change, Universiti Kebangsaan Malaysia, Malaysia

^bCentre for Advance Electronic and Communication Engineering, Department of Electrical and System Engineering and Built Environment, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 Bangi, Malaysia

*Corresponding author: norsuzlin@ukm.edu.my

Received 30 November 2025, Received in revised form 25 June 2026
 Accepted 25 July 2026, Available online 30 September 2026

ABSTRAK

Kajian ini membentangkan reka bentuk unit bahan meta yang boleh laras berasaskan struktur resonans gelang belah (SRR) heksagon yang mempamerkan ciri-ciri ketelusan dan kebolehtelapan negatif untuk aplikasi Generasi kelima (5G). Unit yang dicadangkan ini mempunyai struktur yang ringkas dan menggunakan SRR heksagon berbilang lapis dengan jurang bergandingan, dikelilingi oleh rangka pengganding bagi tujuan penalaan yang lebih fleksibel. Pendekatan ini membolehkan pengawalan sifat elektromagnet secara efisien tanpa meningkatkan kerumitan reka bentuk secara signifikan. Struktur kuprum ini diintegrasikan pada substrat dielektrik Rogers 5870 bersaiz $6 \times 6 \text{ cm}^2$ dengan ketebalan 1.575 mm, yang dipilih kerana kehilangan rendah dan kestabilan prestasi pada frekuensi tinggi. Hasil simulasi menunjukkan bahawa reka bentuk ini mencapai lebar jalur -10 dB dalam lingkungan frekuensi 12–14 GHz dan 20–30 GHz, yang merangkumi sebahagian jalur frekuensi gelombang milimeter yang relevan untuk aplikasi komunikasi moden. Selain itu, unit ini mempamerkan ketelusan negatif pada frekuensi 12.496 GHz, 21 GHz dan 24 GHz, serta kebolehtelapan negatif dalam julat 5–11 GHz dan 13–24 GHz, yang menunjukkan ciri bahan dwi-negatif yang penting dalam aplikasi meta bahan. Keupayaan penalaan yang ditawarkan oleh struktur ini memberikan kelebihan tambahan dalam menyesuaikan respons frekuensi mengikut keperluan sistem. Oleh itu, unit bahan meta ini berpotensi tinggi untuk diintegrasikan bersama antena bagi meningkatkan prestasi seperti penguatan, kecekapan radiasi dan pengawalan arah pancaran. Secara keseluruhannya, kajian ini membuktikan bahawa reka bentuk bahan meta boleh laras mampu menyumbang kepada pembangunan sistem elektromagnet berprestasi tinggi, khususnya dalam aplikasi komunikasi tanpa wayar lanjutan seperti 5G dan sistem radar.

Kata kunci: Bahan meta boleh laras; ketelusan negatif; aplikasi 5G

ABSTRACT

This study presents the design of a tunable metamaterial unit based on a hexagonal split-ring resonator structure exhibiting negative permittivity and negative permeability for 5G communications. The proposed unit features a simple structure utilizing a multi-layered hexagonal resonator with coupling gaps, surrounded by a coupling frame for flexible tuning purposes. This approach allows efficient control of electromagnetic properties without significantly increasing design complexity. The copper structure is integrated onto a Rogers 5870 dielectric substrate measuring $6 \times 6 \text{ cm}^2$ with a thickness of 1.575 millimeters, chosen for low loss and stable performance at high frequencies. Simulation results indicate that this design achieves a -10 dB bandwidth in the 12 to 14 GHz and 20 to 30 GHz frequency ranges, covering a portion of the millimeter-wave frequency band relevant to modern applications. Furthermore, the unit exhibits negative permittivity at 12.496 GHz, 21 GHz, and 24 GHz, alongside negative permeability between 5 to 11 GHz and 13 to 24 GHz. This demonstrates the double-negative material characteristics essential for metamaterial applications. The tuning capability offered by this structure provides an added advantage in customizing the frequency response according to specific system requirements. Therefore, this tunable metamaterial unit holds high

potential to be integrated with antennas to actively enhance fundamental performance metrics such as overall gain, radiation efficiency, and beam steering. Overall, this study demonstrates that the design of tunable metamaterials can directly contribute to the development of high-performance electromagnetic systems, particularly in advanced wireless communication applications like 5G networks and modern radar systems.

Keywords: Tunable Metamaterials; negative permittivity; 5G applications

PENGENALAN

Teknologi tanpa wayar generasi kelima (5G) menjanjikan revolusi dalam medium komunikasi. Berbanding generasi terdahulu, 5G menawarkan kelajuan data yang lebih pantas, kependaman rendah dan keterhubungan yang lebih baik (Kumar et al. 2024). Keupayaan ini menjadikan teknologi 5G sebagai pemacu utama kepada pembangunan bandar pintar, industri, sistem pengangkutan pintar serta pelbagai aplikasi Internet Pelbagai Benda (IoT). Seiring dengan perkembangan revolusi industri 4.0, permintaan terhadap sistem komunikasi yang pantas, stabil dan mempunyai kecekapan spektrum yang tinggi semakin meningkat. Oleh itu, pembangunan komponen komunikasi berprestasi tinggi seperti antenna, penapis dan struktur elektromagnet baharu menjadi aspek penting dalam memastikan keupayaan rangkaian 5G dapat dimanfaatkan sepenuhnya. Kebanyakan penyelidik mengutamakan pembaharuan dalam teknologi 5G dengan meningkatkan kelajuan data, lebar jalur yang luas dan gandaan yang lebih tinggi. Selain itu, teknologi 5G menyediakan rangkaian yang sangat pantas dan selamat untuk pelbagai peranti dalam jumlah yang besar contohnya Kenderaan Internet (IoV), reality maya, e-kesihatan dan lain-lain (Hassan et al. 2022; Hasan et al. 2022). Menurut Persatuan Suruhanjaya Komunikasi(FCC), spektrum 5G meliputi pelbagai jalur frekuensi. Jalur sub-6 GHz diberi perhatian kerana keseimbangan antara liputan dan kapasiti (Tran et al. 2023). Namun, frekuensi sekitar 3.5 GHz merupakan salah satu jalur yang banyak digunakan dalam pelaksanaan rangkaian 5G kerana mampu memberikan prestasi komunikasi yang baik di samping mengekalkan liputan kawasan yang luas. Walaupun kebanyakan penyelidik memberi tumpuan utama untuk menginovasi teknologi 5G dengan meningkatkan kadar data, lebar jalur, dan gandaan, penekanan terhadap menangani isu pengecilan dan penyerapan gelombang pada frekuensi tinggi masih kurang diberi perhatian. Salah satu kaedah untuk mengatasi masalah ini adalah membangunkan bahan meta (MTM).

Pengenalan MTM telah merevolusi bidang bahan elektromagnet dengan menawarkan sifat unik yang tidak ditemui pada bahan semula jadi. Salah satu aplikasi utama bahan meta ini adalah dalam bidang peranti antenna. Sifat tersebut diperoleh melalui susunan geometrik unit sel secara berkala dan tidak bergantung kepada komposisi kimia bahan. Oleh sebab itu, prestasi elektromagnet bahan

meta boleh direka bentuk mengikut keperluan aplikasi tertentu. Ia juga telah dibangunkan bagi mengatasi had tradisional dengan menawarkan prestasi yang tinggi, reka bentuk yang kompak, serta kepelbagaian fungsi. Sebagai contoh, antenna bahan meta berinspirasi fraktal telah direka bentuk untuk mencapai pelbagai frekuensi (Bawri et al. 2020). Seterusnya, MTM turut digunakan dalam penapis gelombang mikro dan penyerap, yang menawarkan kawalan luar biasa terhadap gelombang elektromagnet. Penapis berasaskan MTM mempamerkan jalur lebar yang luas serta saiz yang lebih kompak (Musaed et al. 2023). Seterusnya, MTM memainkan peranan yang penting dalam sistem radar dengan membolehkan aplikasi seperti halimunan, pengimejan dan bahan meta juga menawarkan resolusi dan kepekaan yang lebih baik untuk aplikasi pengawasan (Islam et al. 2021). Namun begitu, aspek kepadatan dalam reka bentuk antenna sering kurang diberi penekanan. Pengenalan kepada unit bahan telah membawa revolusi dalam bidang elektromagnet. Salah satu aplikasi utama unit bahan ialah pengintegrasian ke dalam peranti antenna bagi menawarkan prestasi yang lebih baik (Hannan et al. 2022).

Unit bahan resonans gelang belah komplementari (CSRR) telah diperkenalkan di (Naqvi et al. 2022) untuk mengurangkan dimensi keseluruhan antenna, sekali gus menghasilkan reka bentuk yang lebih kompak berbanding saiz antenna tanpa pengubahsuaian. Selain itu, penggunaan meta bahan sebagai pemantul telah terbukti dapat meningkatkan prestasi antenna dengan peningkatan gandaan radiasi (Alusami et al. 2022). Penggunaan unit bahan telah diaplikasikan dalam pelbagai bidang seperti penyerap gelombang, aplikasi perubatan, nanosatelit dan lain-lain. Meta bahan merupakan bahan yang direka untuk mempamerkan sifat elektromagnetik yang tidak wujud secara semulajadi seperti ketelusan dan kebolehtelapan negatif (Lee et al. 2022). Unit bahan ini digelar sebagai “dwi-negatif”. Meskipun bahan meta (MTM) menawarkan sifat elektromagnet yang unik, kebanyakan aplikasi menggunakan kadar frekuensi resonans yang berbeza. Schubungan itu, penggunaan meta bahan boleh laras semakin mendapat perhatian dalam reka bentuk antenna kerana sifatnya yang boleh disesuaikan mengikut keperluan aplikasi (Adawiah et al. 2024). Meta bahan berbentuk bintang telah diperkenalkan dalam (Musaed 2022) dengan kebolehlaras yang dicapai melalui pengubahsuaian frekuensi pada bahagian tengah bentuk

bintang tersebut. Namun demikian, struktur kuprum tersebut difabrikasikan pada substrate poliamida yang berkos tinggi dan kurang sesuai untuk penghasilan antena kos rendah. Selain itu, dalam artikel (Liu et al. 2023) para pengkaji telah memperkenalkan suatu penyerap bahan meta dengan reka bentuk yang ringkas serta mempunyai kelebihan frekuensi yang boleh dilaraskan melalui rangsangan diod varactor yang menghubungkan elemen dalaman dan elemen luaran. Kajian lain turut menunjukkan bahawa struktur CSRR dengan dua segi empat selari kuprum mempunyai segmen garisan di bahagian tengah reka bentuk telah digunakan untuk melaraskan frekuensi resonans (Hasan et al. 2024). Seterusnya, kajian lain telah mengaplikasikan unit bahan untuk diintegrasikan pada antena bagi menghasilkan reka bentuk yang lebih padat serta meningkatkan keseluruhan prestasi antena (Rahman et al. 2024). Namun begitu, lebar jalur antena tersebut masih lagi terhad. Bahan meta yang digunakan sebagai reflektor dalam artikel (Ibrahim et al. 2024) telah berjaya meningkatkan lebar jalur dan nilai gandaan yang lebih tinggi berbanding reka bentuk antena biasa. Namun demikian, reka bentuknya yang kompleks menyukarkan proses fabrikasi. Selain aplikasi antena, bahan meta turut digunakan secara meluas dalam penapis gelombang mikro, sistem pengimejan serta sistem radar. Dalam aplikasi penyerap gelombang, bahan meta berkeupayaan untuk mengurangkan pantulan isyarat dan meningkatkan penyerapan tenaga elektromagnet secara berkursus, sekali gus sesuai digunakan dalam kawalan gangguan elektromagnet (EMI) (Islam et al. 2021). Seterusnya, dalam sistem radar dan pengimejan, bahan meta digunakan untuk meningkatkan ketepatan pengesanan serta menghasilkan resolusi imej yang lebih tinggi. Seterusnya, konsep penyembunyian elektromagnet (*electromagnetic cloaking*) juga telah diperkenalkan dengan menggunakan struktur bahan meta bagi mengurangkan kebolehesanan objek terhadap gelombang elektromagnet. Secara keseluruhan, aplikasi bahan meta ini menunjukkan kepentingannya dalam meningkatkan prestasi sistem elektromagnet moden dari segi kecekapan, sensitiviti dan kawalan gelombang. Berdasarkan kajian-kajian terdahulu, masih terdapat jurang penyelidikan yang melibatkan pembangunan unit bahan meta yang bukan sahaja mempunyai sifat elektromagnet dwi-negatif, malah mudah difabrikasi, mempunyai kos yang rendah serta mampu dilaraskan mengikut keperluan aplikasi moden.

Kajian ini memberi tumpuan kepada pembangunan satu unit bahan meta boleh laras yang menggunakan struktur gelang resonator berbentuk heksagon berbilang lapis dengan jurang bergandingan dan bingkai penghubung. Reka bentuk ini membolehkan penalaan terhadap ketelusan dan kebolehtelapan melalui variasi geometri atau integrasi elemen aktif. Unit bahan yang dicadangkan ini menunjukkan

kesesuaian tinggi untuk diintegrasikan ke dalam reka bentuk antena, khususnya bagi memenuhi keperluan aplikasi 5G.

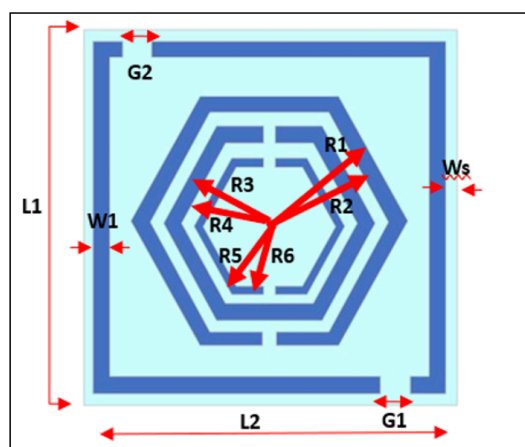
REKA BENTUK UNIT BAHAN

Unit bahan ini telah direka dan disimulasikan menggunakan perisian “*CST Microwave Studio*”, iaitu sebuah perisian berasaskan kaedah penyelesaian elektromagnet yang digunakan secara meluas dalam analisis struktur gelombang mikro 3-dimensi (3D). Perisian ini membolehkan analisis parameter S, taburan medan elektromagnet, serta resonans bagi setiap struktur yang direka bentuk sebelum proses fabrikasi dilakukan. Pendekatan simulasi ini amat penting bagi memastikan prestasi reka bentuk dapat dioptimumkan terlebih dahulu tanpa memerlukan kos eksperimen fizikal yang tinggi.

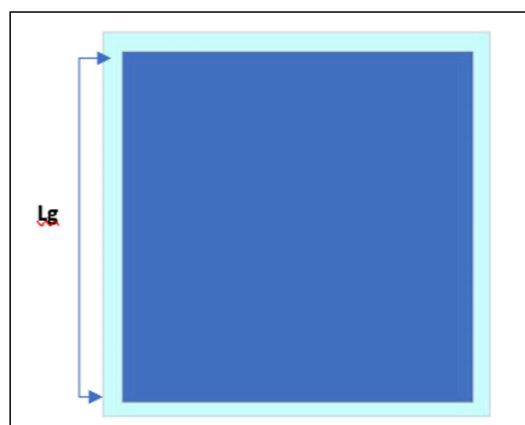
Bahan substrat yang digunakan dalam reka bentuk ini ialah Rogers RT Duroid 5870, yang mempunyai pemalar dielektrik 2.2 dengan ketebalan sebanyak 1.57 mm. Pemilihan bahan ini adalah berdasarkan ciri kestabilan elektrik yang stabil pada frekuensi gelombang mikro, menjadikan sesuai untuk aplikasi 5G. Selain itu, bahan ini juga sering digunakan dalam reka bentuk antena dan bahan meta berprestasi tinggi kerana mampu mengurangkan kehilangan tenaga semasa perambatan gelombang elektromagnet. Reka bentuk unit bahan meta yang dicadangkan terdiri daripada struktur yang ringkas dan menggunakan struktur SRR heksagon berbilang lapis dengan jurang bergandingan, dikelilingi oleh rangka penggandingan bagi tujuan penalaan resonans. Pemilihan bentuk heksagon adalah bertujuan untuk meningkatkan pengagihan arus permukaan yang lebih seragam serta menambahkan kesan kapasitif dalam struktur. Kesan gabungan induktif dan kapasitif ini adalah elemen utama yang membolehkan resonans berlaku pada frekuensi yang dikehendaki, sekali gus mempengaruhi ketelusan dan kebolehtelapan bahan meta tersebut. Selain itu, struktur berbilang lapis SRR ini direka bagi meningkatkan interaksi antara gelombang elektromagnet dengan unit sel, yang seterusnya membantu menghasilkan tindak balas resonans yang lebih stabil. Rangka penggandingan yang disepadukan dalam reka bentuk ini berfungsi sebagai elemen penalaan tambahan yang membolehkan perubahan resonans frekuensi melalui variasi geometri. Secara keseluruhan, reka bentuk ini bertujuan untuk menghasilkan struktur yang boleh dilaraskan mengikut keperluan aplikasi.

Proses pengoptimum unit bahan ini dilakukan secara sistematik melalui simulasi berulang dalam CST. Parameter seperti dimensi geometrik, jarak jurang, dan lebar jalur

konduktor diubah secara berkala bagi mendapatkan tindak balas resonans yang optimum. Analisis utama yang digunakan dalam kajian ini adalah berdasarkan parameter pekali penghantaran (S_{21}) bagi menilai tingkah laku gelombang yang melalui struktur unit bahan tersebut. Rajah 1(a) menunjukkan pandangan hadapan struktur sel unit bahan meta, manakala Rajah 1(b) menunjukkan pandangan belakang struktur tersebut. Kedua-dua lapisan ini memainkan peranan penting dalam menentukan interaksi keseluruhan medan elektromagnet terhadap unit sel. Dimensi setiap elemen struktur dibentangkan dalam Jadual 1 bagi memastikan replikasi reka bentuk dapat dilakukan dengan tepat oleh penyelidik lain. Unit sel ini diletakkan di antara dua port gelombang pada arah paksi-z positif dan negatif bagi membolehkan pengukuran yang lebih tepat terhadap tindak balas pekali. Paksi-x ditetapkan sebagai sempadan konduktor elektrik sempurna (PEC), manakala paksi-y ditetapkan sebagai sempadan magnet sempurna (PMC), seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 2.

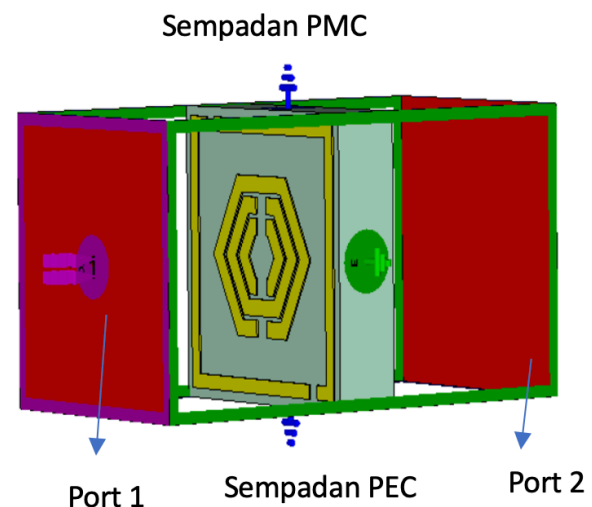


(a)



(b)

RAJAH 1. Reka bentuk unit bahan (a) pandangan hadapan (b) pandangan belakang



RAJAH 2. Tatapan sempadan bagi unit bahan MTM

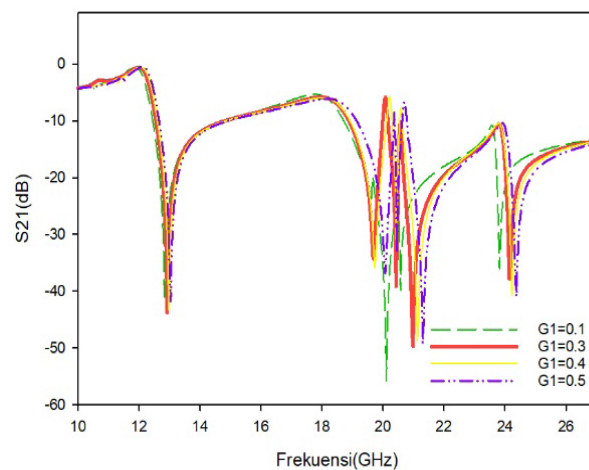
KEPUTUSAN DAN ANALISIS

PENALAAAN FREKUENSI UNIT BAHAN

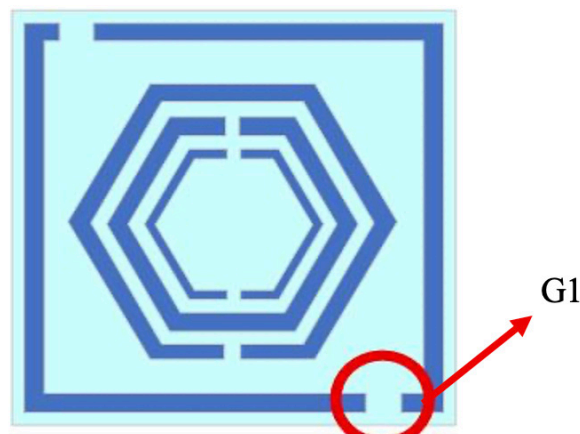
Frekuensi bagi unit bahan meta yang direka bentuk dilakukan dengan memvariasikan parameter geometri pada lapisan luar struktur berbentuk segi empat sama seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 3. Parameter utama yang dikaji dalam analisis ini ialah jarak jurang ($G1$), yang diubah dalam julat 0.1 mm hingga 0.5 mm bagi menilai kesannya terhadap perubahan frekuensi resonans serta tingkah laku penghantaran gelombang electromagnet (S_{21}). Kajian ini memberi tumpuan kepada variasi jarak $G1$ mempengaruhi ciri-ciri resonans pada struktur SRR heksagon berbilang lapis. Perubahan nilai $G1$ secara langsung mengubah nilai kapasitif efektif pada struktur unit sel, yang seterusnya memberi kesan kepada frekuensi resonans keseluruhan. Secara teori, apabila jarak jurang meningkat, nilai kapasitans antara jalur konduktor berkurang, menyebabkan frekuensi resonans beralih ke nilai yang lebih tinggi. Rajah 4 menunjukkan ciri-ciri resonans berdasarkan pekali penghantaran (S_{21}) bagi variasi nilai $G1$ yang berbeza. Berdasarkan keputusan simulasi yang diperolehi daripada simulasi CST, didapati bahawa setiap perubahan nilai $G1$ ditingkatkan, frekuensi resonans beralih ke frekuensi yang lebih tinggi.

JADUAL 1. Dimensi Unit Bahan

Parameter	Dimensi(mm)	Parameter	Dimensi(mm)
L1	6	R1	1.90
L2	5.6	R2	1.50
W1	0.3	R3	1.40
Ws	0.2	R4	0.90
G1	0.3	R5	0.70
G2	0.3	R6	0.40



RAJAH 3. Penalaan frekuensi unit bahan



RAJAH 4. S21 bagi pelbagai kelebaran talaan

Analisis ini membuktikan bahawa reka bentuk unit bahan meta yang dicadangkan bukan sahaja mampu menghasilkan sifat resonans pada frekuensi tertentu, malah turut membolehkan penalaan frekuensi yang dilakukan melalui pengubahan geometri struktur secara fizikal. Keupayaan ini amat penting dalam aplikasi system komunikasi tanpa wayar moden seperti 5G, di mana fleksibiliti dalam pelarasan frekuensi diperlukan bagi menyokong pelbagai jalur operasi. Secara keseluruhan,

keputusan simulasi menunjukkan bahawa struktur SRR heksagon berbilang lapis yang dicadangkan mempunyai ciri penalaan frekuensi yang stabil dan boleh dikawal melalui parameter $G1$. Ini menjadikannya sesuai untuk diintegrasikan dalam aplikasi antenna dan peranti gelombang mikro yang memerlukan prestasi tinggi serta kebolehlarasan frekuensi.

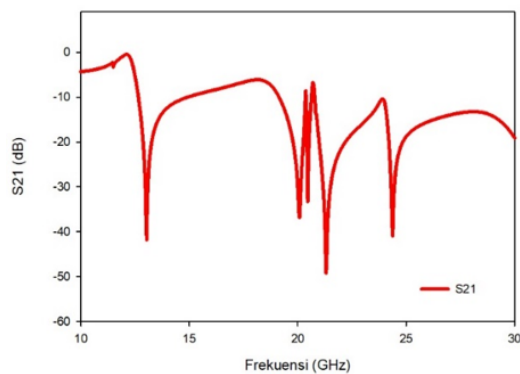
KAJIAN PARAMETRIK UNIT BAHAN MTM

Dalam seksyen ini, metodologi untuk mengekstrak parameter menggunakan *CST Microwave Studio*, seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 5 (a-c). Unit bahan yang dicadangkan telah dianalisis dari aspek parameter hantaran (S_{12}) serta ciri-ciri elektromagnetiknya. Hasil simulasi menunjukkan bahawa reka bentuk ini mempamerkan tindak balas resonans yang ketara dalam dua julat frekuensi, iaitu pada 12–14 GHz dan 20–30 GHz, masing-masing dengan nilai S_{21} lebih rendah daripada -10 dB. Keputusan ini membuktikan bahawa unit bahan tersebut berupaya menyerap tenaga gelombang elektromagnet dengan

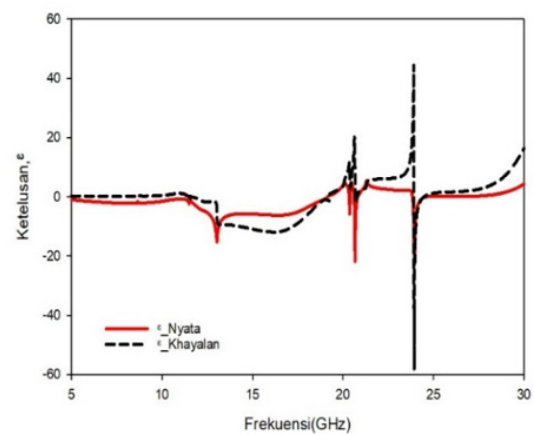
berkesan dalam julat frekuensi yang dinyatakan, seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 5(a). Selain itu, Rajah 5(b) menunjukkan bahawa kebolehtelapan negatif bagi unit bahan yang dicadangkan dapat diperhatikan dalam julat frekuensi 3.83 GHz hingga 19.23 GHz dan 23.87 hingga 24.2 GHz. Seterusnya, parameter ketelusan yang diekstrak turut memperlihatkan sifat negatif dalam julat frekuensi 1.714 hingga 11.808 GHz, 18.1512 hingga 30 GHz seperti yang dipaparkan dalam Rajah 5(c). Jadual 2 membentangkan keseluruhan parameter efektif bagi pelbagai julat frekuensi tersebut, dan hasil ini mengesahkan bahawa sel unit yang dicadangkan mempamerkan ciri meta bahan dwi-negatif (DNG).

JADUAL 2. Ciri-ciri parameter efektif bagi unit bahan MTM

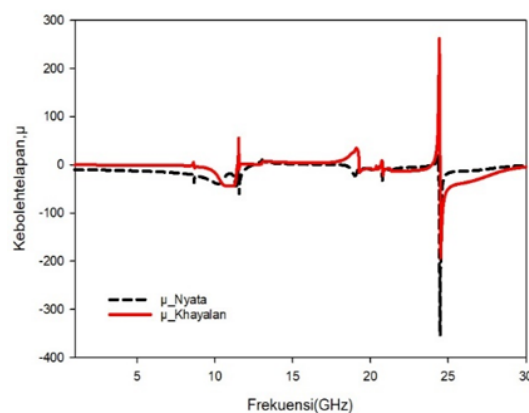
Parameter	$\epsilon < 0$	$\mu < 0$	$\epsilon < 0$ $\mu < 0$
Julat frekuensi (GHz)	3.83-19.23 23.87-24.2	1.71-11.81 18.15-30	3.83-19.23 23.87-30



(a)



(b)



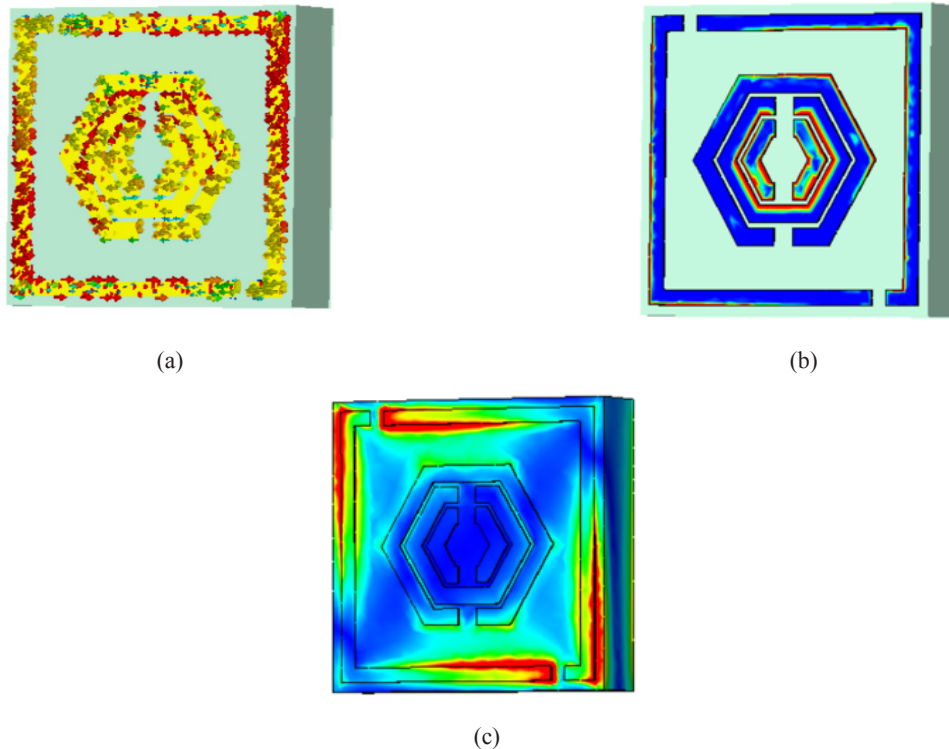
(c)

RAJAH 5. (a) Parameter hantaran (b) Plot Ketelusan, (b) Plot Kebolehtelapan

ANALISIS TABURAN ARUS PADA PERMUKAAN DAN MEDAN ELEKTROMAGNET

Rajah 6 menggambarkan taburan elektromagnet bagi sel unit bahan yang dicadangkan frekuensi resonans 21 GHz. Taburan arus yang ditunjukkan pada rajah 6(a) menunjukkan arus tertumpu dengan ketara pada gelang resonator di bahagian luar terutamanya di kawasan sudut dan jurang bergandingan. Ini membuktikan bahawa gelang luar bertindak sebagai laluan konduktif utama yang menyumbang pada resonans. Rajah 6(b) menunjukkan taburan medan magnet, di mana keamatan medan magnet tertinggi tertumpu di sekitar gelang resonator bahagian tengah. Seterusnya, taburan medan elektrik dapat diperhatikan pada rajah 6(c). Keamatan medan elektrik tertumpu pada bahagian luar gelang dikawasan jurang

resonator, yang mewujudkan fenomena kapasitif. Ruang di antara elemen resonator bertindak sebagai kapasitor, sekali gus mengesahkan mekanisme kapasitif yang berlaku pada struktur tersebut. Peningkatan nilai pemalar dielektrik substrat menyebabkan taburan arus elektrik menjadi lebih tertumpu pada struktur resonator, khususnya di bahagian jurang, kawasan luar gegelang resonan dan sudut, sekali gus memengaruhi corak taburan arus serta peralihan frekuensi ke nilai yang lebih rendah. Selain itu, apabila keamatan medan elektrik meningkat perbezaan keupayaan antara jurang turut meningkat, sekali gus meningkatkan jumlah tenaga yang disimpan, selaras dengan konsep kapasitor. Struktur resonan menghasilkan kapasitif yang signifikan sekali gus menyumbang kepada prestasi resonans unit meta bahan.



RAJAH 6: Analisis Taburan (a) arus permukaan (b) medan magnet (c) medan elektrik

HASIL DAN PERBINCANGAN

Analisis perbandingan pada Jadual 3 menunjukkan bahawa reka bentuk unit sel yang dicadangkan menawarkan prestasi yang baik berbanding kajian-kajian terdahulu dari aspek sifat elektromagnet, bahan yang digunakan dan pengoptimuman saiz. Kajian lepas kebanyakannya mempamerkan sifat negatif tunggal (SNG) serta menggunakan unit sel bersaiz lebih besar sebagai contoh (Naqvi et al. (2024); Ibrahim et al. (2024); Hasan et al.

(2024). Selain itu, bahan substrat yang digunakan oleh Alusami et al. (2022) iaitu polyethylene terephlate (PET), mempunyai kos yang lebih tinggi berbanding substrat lain. Seterusnya, reka bentuk yang dicadangkan mencapai sifat dwi-negatif (DNG), tetapi turut menampilkan unit bahan meta yang lebih kompak serta penggunaan substrat RT5870 yang lebih sesuai untuk operasi yang lebih tinggi. Secara keseluruhan, reka bentuk ini menunjukkan keunggulan dari segi ukuran unit bahan meta, prestasi frekuensi dan kestabilan electromagnet berbanding kajian lepas, menjadikan calon yang kukuh untuk diintegrasikan pada

antena. Integrasi unit bahan dengan antenna tampalan dijangka mampu:

1. Meningkatkan gandaan antenna melalui pengawalan corak penyebaran gelombang.
2. Memperluas lebar jalur, sesuai dengan keperluan pelbagai saluran frekuensi dalam aplikasi 5G.
3. Mengurangkan saiz keseluruhan sistem, dengan mengekalkan prestasi radiasi yang optimum.

Dalam konteks aplikasi sebenar, unit bahan ini boleh dijadikan lapisan belakang antenna MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) bagi sistem komunikasi mudah alih, stesen pangkalan, atau aplikasi radar beresolusi tinggi. Selain itu, analisis parameter elektromagnet yang lebih terperinci juga menunjukkan bahawa kehadiran struktur resonans berbilang lapis dalam sel unit bahan yang dicadangkan membolehkan kawalan nilai ketelusan dan

kebolehtelapan efektif secara lebih fleksibel mengikut julat frekuensi operasi. Ini secara tidak langsung memberikan kelebihan dari segi penalaan yang lebih stabil tanpa memerlukan perubahan fizikal yang besar pada struktur asas. Tambahan pula, penggunaan konfigurasi SRR heksagon berbilang lapis dengan bingkai pengganding membantu meningkatkan kesan resonans berganda yang menyumbang kepada pembentukan jalur operasi yang lebih luas serta peningkatan kestabilan parameter S-parameter khususnya pada S₁₁ dan S₂₁. Dari sudut aplikasi sistem komunikasi moden, ciri-ciri ini sangat penting bagi memastikan prestasi antenna kekal konsisten walaupun beroperasi dalam persekitaran yang mengalami gangguan elektromagnet. Oleh itu, reka bentuk ini bukan sahaja sesuai untuk aplikasi 5G, malah berpotensi diperluaskan kepada sistem komunikasi generasi akan datang seperti 6G yang memerlukan kecekapan spektrum yang lebih tinggi serta kebolehppercayaan sistem yang lebih baik

JADUAL 3. Perbandingan sel unit bahan MTM yang dicadangkan dengan kajian-kajian lepas

Rujukan	Saiz unit sel	Frekuensi (GHz)	subrat	Sifat	Kompleksiti
Naqvi et al. 2024	8 x 8 mm ²	24 dan 28	FR4	SNG	ya
Alusami et al. 2022	3 x 3 mm ²	24 and 35	polyethylene terephthalate (PET)	SNG	ya
Lee et al. 2022	4 x 4 mm ²	28 and 32	RT5870	SNG	ya
Ibrahim et al. 2024	9 x 9 mm ²	220 MHz dan 3.5	RT5880	SNG	ya
Hasan et al. 2024	15 x 29 mm ²	5 and 6.2	FR4	SNG	ya
Reka bentuk yang dicadangkan	6 x 6 mm ²	23,21 and 24	RT5870	DNG	tidak

Di samping itu, aspek fabrikasi juga memainkan peranan penting dalam menentukan kebolehlaksanaan reka bentuk ini. Penggunaan substrat RT5870 dilihat sesuai kerana sifat dielektriknya yang stabil pada frekuensi tinggi serta kehilangan dielektrik yang rendah, menjadikannya pilihan yang praktikal untuk aplikasi gelombang mikro. Walaupun terdapat faktor kos dalam proses fabrikasi, keseimbangan antara prestasi dan kebolehasilan reka bentuk ini masih dianggap berbaloi untuk pembangunan prototaip. Secara keseluruhannya, dapatan kajian ini mengukuhkan lagi potensi unit bahan meta yang dicadangkan sebagai satu komponen penting dalam pembangunan sistem antenna berprestasi tinggi. Justeru, kajian lanjutan boleh memberi fokus kepada proses optimasi parameter geometri secara lebih mendalam serta ujian eksperimen bagi mengesahkan keputusan simulasi yang diperoleh dalam kajian ini.

KESIMPULAN

Kajian ini telah berjaya mereka bentuk satu unit bahan meta boleh laras berasaskan struktur SRR heksagon berbilang lapis dengan bingkai pengganding. Struktur yang dicadangkan ini menunjukkan keupayaan yang baik dalam memanipulasikan gelombang elektromagnet melalui pengawalan parameter geometri, sekali gus membolehkan perubahan ciri resonans dilakukan secara sistematik. Hasil simulasi menggunakan perisian CST menunjukkan bahawa unit bahan meta ini mempamerkan ciri-ciri elektromagnet yang luar biasa, termasuk kewujudan sifat ketelusan dan kebolehtelapan berkesan yang negatif pada julat frekuensi tertentu. Ciri ini adalah sangat penting dalam aplikasi komunikasi moden kerana ia membolehkan kawalan terhadap perambatan gelombang elektromagnet, khususnya bagi sistem yang beroperasi dalam jalur sub-6 GHz 5G. Selain itu, keupayaan struktur ini untuk menunjukkan sifat dwi-negatif membuktikan bahawa reka bentuk yang dicadangkan berpotensi tinggi untuk digunakan dalam aplikasi antenna berprestasi tinggi.

Tambahan pula, reka bentuk unit bahan meta ini adalah ringkas, kos efektif serta mudah difabrikasi berbanding struktur metamaterial kompleks yang lain dalam kajian terdahulu. Penggunaan substrat standard serta geometri yang tidak terlalu kompleks membolehkan proses pembuatan dilakukan dengan lebih mudah tanpa mengorbankan prestasi elektromagnet. Ciri ini amat penting dalam konteks industri kerana ia menyokong pembangunan peranti komunikasi yang bukan sahaja berprestasi tinggi, tetapi juga ekonomik untuk pengeluaran berskala besar. Selain itu, keupayaan penalaan yang ditunjukkan melalui variasi parameter geometri seperti jarak jurang membuktikan bahawa struktur ini mempunyai fleksibiliti yang tinggi untuk disesuaikan dengan keperluan aplikasi berbeza. Dalam sistem komunikasi 5G yang memerlukan sokongan pelbagai jalur frekuensi dan persekitaran operasi yang dinamik, ciri kebolehsuaian ini memberikan kelebihan yang signifikan berbanding reka bentuk konvensional yang bersifat tetap. Kajian ini juga memberi implikasi bahawa integrasi unit bahan meta ke dalam sistem antena berpotensi meningkatkan prestasi keseluruhan dari segi keuntungan, lebar jalur serta kawalan radiasi. Oleh itu, struktur yang dicadangkan boleh dijadikan asas kepada pembangunan antena generasi baharu yang lebih kompak dan efisien. Kajian seterusnya boleh difokuskan kepada integrasi elemen aktif seperti diod varaktor atau bahan semikonduktor bagi membolehkan penalaan frekuensi secara dinamik dan masa nyata. Selain itu, kajian eksperimen melalui proses fabrikasi fizikal juga dicadangkan bagi mengesahkan keputusan simulasi serta menilai prestasi sebenar dalam persekitaran praktikal. Tambahan lagi, pengujian terhadap integrasi struktur ini dalam reka bentuk antena MIMO atau antena tatasusunan juga boleh dijalankan bagi melihat potensi peningkatan prestasi dalam aplikasi komunikasi 5G yang lebih kompleks.

PENGHARGAAN

Kajian ini disokong oleh geran penyelidikan *Fundamental Research Grant Scheme* (FRGS) di bawah Kementerian Pengajian Tinggi Malaysia (KPT) dengan kod FRGS/1/2021/TK0/UKM/02/1

PENGISYTIHARAN KEPENTINGAN BERSAING

Tiada.

RUJUKAN

- Al-Bawri, S.S., Islam, M.T., Shabbir, T., Muhammad, G., Islam, M.S. & Wong, H.Y. 2020. Hexagonal shaped near-zero index (NZI) metamaterial based MIMO antenna for millimeter-wave application. *IEEE Access* 8: 181003–181013. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3028377>
- Alsulami, Q.A., Wageh, S., Al-Ghamdi, A.A., Bilal, R.M.H. & Saeed, M.A. 2022. A tunable and wearable dual-band metamaterial absorber based on polyethylene terephthalate (PET) substrate for sensing applications. *Polymers* 14(21): 4503. <https://doi.org/10.3390/polym14214503>
- Arbaatun Adawiah, N., Al-Bawri, S.S., Mohd Sahar, N., Islam, M.T. & Singh, M.S.J. 2024. Tuneable double negative (DNG) tri-hexagonal split ring resonator metamaterial for 5G application. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 598: 172057. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2024.172057>
- Hannan, S., Islam, M.T., Soliman, M.S., Faruque, M.R.I., Misran, N. & Islam, M.S. 2022. A co-polarization-insensitive metamaterial absorber for 5G n78 mobile devices at 3.5 GHz to reduce the specific absorption rate. *Scientific Reports* 12: 11193. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-15221-7>
- Hasan, M.M., Islam, M.T., Moniruzzaman, M., Soliman, M.S., Alshammari, A.S., Abu Sulayman, I.I.M., Samsuzzaman, M. & Islam, M.S. 2022. Symmetric engineered high polarization-insensitive double negative metamaterial reflector for gain and directivity enhancement of sub-6 GHz 5G antenna. *Materials* 15(16): 5676. <https://doi.org/10.3390/ma15165676>
- Hasan, M.M., Islam, M.T., Samsuzzaman, M., Baharuddin, M.H., Soliman, M.S., Alzamil, A., Abu Sulayman, I.I.M. & Islam, M.S. 2022. Gain and isolation enhancement of a wideband MIMO antenna using metasurface for 5G sub-6 GHz communication systems. *Scientific Reports* 12: 9433. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-13522-5>
- Hasan, M.M., Islam, M.T., Alam, T., Kirawanich, P., Alamri, S. & Alshammari, A.S. 2024. Metamaterial-loaded miniaturized extendable MIMO antenna with enhanced bandwidth, gain and isolation for 5G sub-6 GHz wireless communication systems. *Ain Shams Engineering Journal* 15(12): 103058. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2024.103058>
- Ibrahim, S.K., Al-Bawri, S.S., Singh, M.J., Ibrahim, H.H., Islam, M.T., Islam, M.S., Abdulkawi, W.M. & Sheta, A.F.A. 2024. Compact metamaterial-based single/double-negative/near-zero index resonator for 5G sub-6 GHz wireless applications. *Scientific Reports* 14: 12834. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-63610-x>

- Islam, M.R., Islam, M.T., Soliman, M.S., Baharuddin, M.H., Mat, K., Moubark, A.M. & Almalki, S.H.A. 2021. Metamaterial based on an inverse double V-loaded complementary square split ring resonator for radar and Wi-Fi applications. *Scientific Reports* 11: 21782. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-01275-6>
- Kumar, A., Gaur, N. & Nanthaamornphong, A. 2024. Improving the latency for 5G/B5G-based smart healthcare connectivity in rural area. *Scientific Reports* 14: 6976. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-57641-7>
- Lee, K., Hong, H.Y., Lee, W., Jo, S., Park, H.S., Yang, J., Park, C., Lee, H. & Hong, S.K. 2022. Broadband metasurface superstrate for polarization-independent wave focusing and gain enhancement at Ka-band. *Scientific Reports* 12: 12015. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-16037-1>
- Liu, Z., Yang, L., Liu, H. & Luo, Y. 2023. Active metamaterial antenna with tunable zeroth-order resonances for narrowband Internet of Things. *Electronics* 12(18): 3827. <https://doi.org/10.3390/electronics12183827>
- Musaed, A.A., Al-Bawri, S.S., Islam, M.T., Al-Gburi, A.J.A. & Singh, M.J. 2022. Tunable compact metamaterial-based double-negative/near-zero index resonator for 6G terahertz wireless applications. *Materials* 15(16): 5608. <https://doi.org/10.3390/ma15165608>
- Naqvi, S.A., Baqir, M.A., Gourley, G., Iftikhar, A., Khan, M.S. & Anagnostou, D.E. 2022. A novel meander line metamaterial absorber operating at 24 GHz and 28 GHz for 5G applications. *Sensors* 22(10): 3764. <https://doi.org/10.3390/s22103764>
- Rahman, M.A., Al-Bawri, S.S., Abdulkawi, W.M. & Islam, M.T. 2024. Miniaturized tri-band integrated microwave and millimeter-wave MIMO antenna loaded with metamaterial for 5G IoT applications. *Results in Engineering* 24: 103130. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103130>
- Tran, H.H., Nguyen, T.T.L., Ta, H.N. & Pham, D.P. 2023. A metasurface-based MIMO antenna with compact, wideband, and high isolation characteristics for sub-6 GHz 5G applications. *IEEE Access* 11: 67737–67744. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3292303>