

Rekabentuk dan Prestasi Antena MEMS Penuai Tenaga Mikro Frekuensi Radio Bagi Peranti Elektronik Berkuasa Rendah

(Design and performance of radio frequency micro energy harvesting MEMS antenna for low power electronic devices.)

Jahariah Sampe^{a*}, Noor Hidayah Mohd Yunus^b, Jumril Yunas^a & Ahmad G. Ismail^a

^aInstitute of Microengineering and Nanoelectronics-Universiti Kebangsaan Malaysia (IMEN-UKM), 43600 Bangi, Selangor, Malaysia

^bCommunication Technology Section, Universiti Kuala Lumpur-British Malaysian Institute (UniKL-BMI), Batu 8, Jalan Sungai Pusu, 53100 Gombak, Selangor, Malaysia

*Corresponding author: jahariah@ukm.edu.my

Received 22 June 2022, Received in revised form 1 August 2022

Accepted 2 September 2022, Available online 30 March 2023

ABSTRAK

Tenaga ambien Frekuensi Radio (RF) menjadi pilihan sebagai sumber tenaga hijau bagi sistem penuaian tenaga kerana kewujudan isyarat gelombang elektromagnetik yang sentiasa ada di persekitaran tanpa melibatkan kos. Tenaga RF ini adalah sangat rendah kebiasaannya kurang daripada $190 \mu\text{W}$. Namun, antena perlu membekalkan kuasa yang mencukupi kepada sistem penuaian tenaga RF bagi menghidupkan peranti elektronik berkuasa rendah. Oleh itu, antena perlu direkabentuk bagi menangkap dan memindahkan tenaga kepada litar penuai tenaga mikro RF bagi membekalkan kuasa yang optimum kepada peranti elektronik tersebut. Rekabentuk antena mikrojalur menggunakan proses teknologi fabrikasi Mikro Elektro Mekanik (MEMS) adalah pilihan paling sesuai kerana bersaiz kecil, ringan dan berprestasi tinggi. Rekabentuk antena MEMS ini menggunakan perisian Computer Simulation Technology-Microwave-Studio (CST-MWS). Perbandingan telah dilakukan bagi empat jenis antena iaitu mikro-mesin permukaan silikon, mikro-mesin pukal silikon dengan rongga udara, mikro-mesin permukaan kaca dan RT/Duroid 5880 sebagai rujukan. Hasil simulasi menunjukkan antena mikro-mesin permukaan kaca bersaiz paling kecil berbanding tiga antena yang lain. Kehilangan balik antena ini juga adalah lebih baik iaitu meningkat sebanyak 55.1% dan 5.6% berbanding masing-masing, antena mikro-mesin permukaan silikon dan antena konvensional RT/Duroid. Antena ini juga mempunyai lebar jalur yang besar iaitu 117 MHz, gandaan melebihi 5 dB dan pengarahannya melebihi 5 dBi. Antena mikro-mesin permukaan kaca telah berjaya difabrikasi menggunakan teknologi MEMS yang menghasilkan antena lutsinar bersaiz (L/W) 19 mm x 19 mm. Antena MEMS yang bersaiz kecil ini sangat sensitif dan sangat berkesan bagi menangkap isyarat ambien RF dan berkebolehan membekalkan kuasa yang mencukupi kepada sistem penuai tenaga RF.

Kata kunci: Antena MEMS; Penuai Tenaga Mikro RF; Rekabentuk; Prestasi

ABSTRACT

Radio Frequency (RF) ambient energy has become the choice as a source of green energy for energy harvesting systems due to the existence of electromagnetic wave signals that are always present in the environment without incurring cost. This RF energy is very low usually less than $190 \mu\text{W}$. However, the antenna needs to supply sufficient power to the RF energy harvesting system to power low-power electronic devices. Therefore, the antenna needs to be designed to capture and transfer energy to the RF micro energy harvesting circuit to supply optimal power to the electronic device. The micro-strip antenna design using Micro Electro Mechanical (MEMS) fabrication technology process is the most suitable choice because of its small size, light weight and high performance. This MEMS antenna design uses Computer Simulation Technology-Microwave-Studio software (CST-MWS). Comparisons were made for four types of antennas namely silicon surface micro-machine, silicon bulk micro-machine with air cavity, glass surface micro-machine and RT/Duroid 5880 as reference. The simulation results show that the glass surface micro-machine antenna is the smallest in size compared to the other three antennas. The return loss of this antenna is also better which is increased by 55.1% and 5.6% compared to silicon surface micro-machine antennas and conventional RT/Duroid antennas respectively. The antenna also has a large bandwidth of

117 MHz, a gain of more than 5 dB and a direction of more than 5 dBi. The glass surface micro-machine antenna has been successfully fabricated using MEMS technology which produces a transparent antenna measuring (L/W) 19 mm x 19 mm. This small sized MEMS antenna is highly sensitive and highly effective for capturing ambient RF signals and is capable of supplying sufficient power to the RF energy harvester system.

Keywords: MEMS Antenna; RF Micro Energy Harvester; Design; Performance

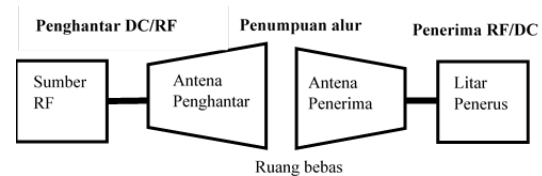
PENGENALAN

Penggunaan tenaga ambien yang dikitar semula bagi menghidupkan peranti elektronik secara berterusan telah menjadi satu bidang penyelidikan yang penting di seluruh dunia. Tenaga ambien Frekuensi Radio (RF) menjadi pilihan kerana kewujudan isyarat gelombang elektromagnetik yang sentiasa hadir di persekitaran tanpa melibatkan kos (Amjad et al. 2018). Tenaga ini kebiasaannya kurang daripada 190 μW atau -7.21 dBm pada jarak kurang daripada lima meter dari sumber pemancar penghantaran isyarat RF (Ren et al. 2018). Walau bagaimanapun, melalui sistem penuaian tenaga mikro RF yang dibangunkan, tenaga tuai keluaran ini mencukupi bagi menghidupkan peranti elektronik berkuasa rendah seperti peranti pengenalanpastian radio frekuensi (RFID), peranti bioperubatan boleh-pakai, peranti pemantauan pertanian, pelbagai-perkara-internet (IoT) dan sebagainya (Govind et al. 2022; Ishak et al. 2022). Kajian pembangunan penggunaan teknologi hijau seperti pembangunan penuai tenaga RF adalah salah satu alternatif yang terbaik kepada penghapusan pergantungan kepada penggunaan bateri elektrokimia (Mohamad et al. 2017).

Antena adalah elemen penting untuk pemindahan kuasa tanpa wayar yang diterima daripada sumber stesen pemancar kepada sistem penuaian tenaga RF. Ia memberi kesan kepada jumlah tenaga yang ditangkap daripada persekitaran (Sampe et al. 2017) dan boleh memberi kesan kepada jumlah hasil tenaga yang dituai (Bakkali et al. 2016). Berikutan kepada kepentingan elemen antena, kajian ini memberi tumpuan kepada reka bentuk antena bagi menangkap dan memindahkan tenaga kepada litar penuai tenaga RF bagi membekalkan kuasa yang optimum kepada peranti elektronik. Antena tampalan mikrojalur menjadi pilihan popular kerana berprofil (fleksibel), kos pengeluaran yang rendah, ringan dan mudah untuk dihasilkan menggunakan teknologi litar bercetak moden (Lee & Luk, 2011). Antena mikrojalur sering kali dirujuk kepada antena tampalan kerana tampilannya yang terdiri daripada bahan pengalir seperti Aluminium, Tembaga, Kromium, Emas dan komposit logam yang menjalankan fungsi tindak balas pemancaran dan penangkapan isyarat gelombang mikro. Antena tampalan ini boleh terdiri daripada pelbagai bentuk corak seperti segi empat, elips, bulat, segi tiga dan jalur nipis (dipol). Bentuk seperti dipol, segi empat dan bulat adalah yang paling biasa digunakan kerana mudah untuk difabrikasi dan dianalisa serta sifat pemancaran berpolarisasi-silang yang rendah (Shrestha et al. 2013). Faktor utama yang menyumbangkan kepada kemajuan antena mikrojalur adalah revolusi pengecilan litar elektronik yang dipengaruhi

oleh perkembangan dalam Integrasi Berskala Besar (VLSI) (Yunus et al. 2020). Antena mikrojalur berdasarkan proses teknologi fabrikasi Mikro Elektro Mekanik (MEMS) dilihat sebagai suatu kejayaan di dalam kejuruteraan (Thorat & Pande, 2015; Yunus et al. 2019). Merujuk kepada kejayaan kejuruteraan teknologi MEMS, maka, kajian ini mencadangkan implementasi reka bentuk antena MEMS di dalam sistem penuai tenaga frekuensi radio (RF) mikro.

Gambaran keseluruhan sistem penghantaran kuasa tanpa wayar (WPT) seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 1 (Sengar & Koei, 2014). Blok pertama adalah untuk menukar tenaga elektrik kepada gelombang mikro (DC/RF). Blok kedua adalah penumpuan alur di ruang bebas selepas penghantaran melalui antena penghantar. Blok ketiga adalah untuk menukar tenaga yang diterima kembali ke tenaga elektrik (RF/DC).



RAJAH 1. Gambaran keseluruhan sistem WPT

Penuaian tenaga mikro RF menukarkan gelombang elektromagnetik kepada voltan DC iaitu RF/DC menggunakan rektena. Jumlah kuasa yang boleh dituai bergantung kepada ketumpatan sumber kuasa masukan di lokasi, kecekapan penukaran kuasa dan elemen penangkap tenaga iaitu antena. Ketumpatan RF dikira dari segi kekuatan medan elektrik, di dalam V/m. Di kawasan medan-jauh, kekuatan medan elektrik boleh ditukarkan menjadi kepadatan daya kuasa masukan (E) melalui Persamaan (1) (Balanis, 2015).

$$S = \frac{E^2}{z_0} \quad (1)$$

di mana, S adalah ketumpatan kuasa masukan dalam W/m^2 , dan Z_0 adalah galangan ruang bebas bersamaan 377Ω . Kuasa yang mungkin dituai di kawasan medan-jauh dapat dianggarkan menggunakan Persamaan Penghantaran Friis, yang diberikan oleh Persamaan (2) (Saravanan et al. 2019).

$$P_r = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (2)$$

di mana, P_r dan P_t adalah kuasa yang diterima dan kuasa yang dihantar dalam Watt, G_t dan G_r adalah gandaan antena penghantar dan penerima, λ adalah panjang gelombang

frekuensi operasi dalam meter, dan d ialah jarak antara sumber masukan dan penuai dalam meter.

Bagi menghasilkan kecekapan maksimum, nilai Beban rintangan (R_L) ditetapkan pada minimum. Keluasan berkesan ($A_{berkesan}$) bagi antenna penerima boleh dikira dengan perkaitan antara G_r dan λ seperti dalam Persamaan (3) melalui penganggaran menggunakan Persamaan Pengantaraan Friis (Saravanan et al. 2019).

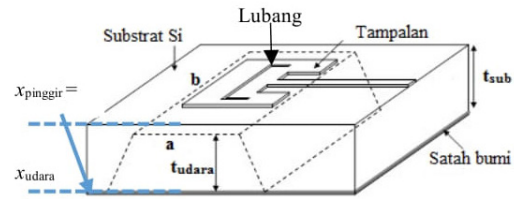
$$A_{berkesan} = \left(\frac{\lambda^2}{4\pi}\right) G_r \quad (3)$$

KAEDAH UJI KAJI

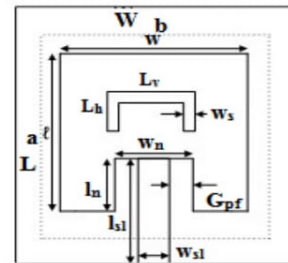
Dalam kajian ini, aplikasi adalah peranti elektronik berkuasa rendah dimana reka bentuk antenna berdimensi kecil diperlukan. Antena tampalan jenis mikrojalur segi empat tepat menjadi pilihan yang sesuai kerana ia menyokong operasi bagi sistem dalam kajian iaitu berjalan sempit dan mudah untuk difabrikasi. Melalui penentuan set spesifikasi, struktur antenna, bahan substrat dan bahan pengalir yang sesuai dapat dipilih. Bagi menghasilkan antenna berprestasi tinggi, ketebalan substrat dielektrik (t_{sub}) yang lebih tebal dengan pemalar Kebertelusan Dielektrik (ϵ_r) yang lebih rendah dipertimbangkan. Lazimnya, ketinggian substrat dielektrik adalah dalam julat $0.003 \lambda_o < t_{sub} < 0.05 \lambda_o$ dan julat pemalar Kebertelusan Dielektrik iaitu $2.2 < \epsilon_r < 12$ dijadikan rujukan bagi pemilihan bahan substrat. Pemilihan frekuensi operasi juga penting bagi penentuan bahan yang dipilih, melalui perkaitan panjang gelombang ruang bebas iaitu $\lambda_o = c / f$, di mana, c adalah pecutan cahaya iaitu $3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$ dan f adalah frekuensi operasi. Reka bentuk antenna dalam kajian ini dioptimumkan pada operasi frekuensi 5 GHz. Frekuensi ini dipilih kerana pelemahan yang rendah melalui atmosfera, teknologi kos rendah dan berada pada jalur frekuensi ISM tanpa lesen.

REKA BENTUK DAN PEMODELAN ANTENA MEMS

Pemodelan antenna MEMS direka secara simulasi bagi memudahkan pemerhatian kesan perubahan parametrik yang dilakukan. Reka bentuk antenna yang dicadangkan dalam kajian ini digambarkan dalam Rajah 2. Struktur fizikal tiga dimensi (3D) dan bentangan geometri corak tampalan bagi antenna ini memberi lebih gambaran pada lapisan pertama dan lapisan kedua atau masing-masing adalah lapisan antenna tampalan dan lapisan substrat dielektrik. Ini kerana, lapisan terakhir iaitu lapisan ketiga atau lapisan satah bumi adalah tanpa corak yang khusus, di mana dimensi ini dilapisi penuh dengan bahan pengalir yang meliputi keluasan yang sama dengan keluasan lapisan substrat. Pemilihan lapisan satah bumi seperti ini dapat memudahkan kerja fabrikasi dan menjamin pembumian yang stabil. Setiap dimensi bagi geometri corak tampalan dan struktur reka bentuk antenna tersebut diringkaskan dalam Jadual 1.



(a) Gambaran 3D struktur



(b) Bentangan geometri corak tampalan antenna

RAJAH 2. Reka bentuk antenna

JADUAL 1. Dimensi bagi geometri corak tampalan dan rekabentuk antenna

Dimensi	Perihal / maksud
L	Panjang substrat
W	Lebar substrat
l	Panjang tampalan
w	Lebar tampalan
l_{sl}	Panjang garis jalur
w_{sl}	Lebar garis jalur
l_n	Panjang takuk
w_n	Lebar takuk
G_{pf}	Jarak suapan tampalan pada takuk
L_v	Panjang lubang alur pada garis tegak
L_h	Panjang lubang alur pada garis mendatar
w_s	Lebar lubang alur
a	Panjang ruang udara
b	Lebar ruang udara
t_{udara}	Ketebalan ruang udara
t_{sub}	Ketebalan substrat
t_{tampal}	Ketebalan tampalan dan satah bumi

Dimensi a , b dan t_{udara} adalah dimensi ruang udara yang hanya ada pada reka bentuk antenna MEMS iaitu antenna mikro-mesin pukal melalui teknik pemesinan mikro. Reka bentuk antenna MEMS ini mengambil kira dimensi keluasan rongga udara yang dipunarkan pada substrat silikon semasa proses fabrikasi. Rongga udara yang direka bentuk melalui simulasi ini ditetapkan pada kecondongan sudut 57^0 pada bahagian bawah lapisan substrat. Pemunaran sebahagian ketebalan substrat silikon dapat merendahkan sifat parameter Kebertelusan Dielektrik (ϵ_r) bahan silikon bagi menambabhaik prestasi antenna iaitu dari segi parameter

Lebar Jalur (BW) dan corak pemancaran. Model *cavity* digunakan dalam pengiraan parameter Kebertelusan Dielektrik berkesan ($\epsilon_{berkesan}$) bagi kawasan udara-silikon yang bercampur. Formula analisa model *cavity* adalah seperti dalam Persamaan (4) hingga (6). (Ansari et al. 2012)

$$\epsilon_{berkesan} = \epsilon_{rongga} \left(\frac{L+2\Delta L \frac{\epsilon_{pinggir}}{\epsilon_{rongga}}}{L+2\Delta L} \right) \quad (4)$$

$$\frac{\epsilon_{pinggir}}{\epsilon_{rongga}} = \frac{\epsilon_{udara} + (\epsilon_{sub} - \epsilon_{udara})x_{udara}}{\epsilon_{udara} + (\epsilon_{sub} - \epsilon_{udara})x_{pinggir}} \quad (5)$$

$$\epsilon_{rongga} = \frac{\epsilon_{udara}\epsilon_{sub}}{\epsilon_{udara} + (\epsilon_{sub} - \epsilon_{udara})x_{udara}} \quad (6)$$

di mana, ϵ_{rongga} adalah Kebertelusan Dielektrik bagi kawasan substrat yang bercampur dan $\epsilon_{pinggir}$ adalah Kebertelusan Dielektrik bagi kawasan medan pinggir. Dalam kajian ini, ϵ_{sub} adalah Kebertelusan Dielektrik bagi substrat silikon iaitu 11.9 dan ϵ_{udara} adalah Kebertelusan Dielektrik bagi udara iaitu 1. Manakala, x_{udara} dan $x_{pinggir}$ masing-masing adalah jarak ketebalan udara dan jarak ketebalan kawasan medan pinggir pada nisbah udara dan ketebalan penuh substrat dalam kawasan medan pinggir yang bercampur. L dan ΔL masing-masing adalah panjang dan panjang lanjutan oleh faktor Frings. Merujuk kepada pengkajian model antenna yang dicadangkan dalam Rajah 2(a), ketebalan kawasan medan pinggir $x_{pinggir}$ adalah sifar. Melalui pengiraan, parameter Kebertelusan Dielektrik rongga (ϵ_{rongga}) adalah bersamaan 11.8516 dan parameter Kebertelusan Dielektrik pinggir adalah 11.9. Maka, nilai akhir pengiraan Kebertelusan Dielektrik berkesan ($\epsilon_{berkesan}$) yang dihasilkan adalah bersamaan 11.8984, di mana nilai ini adalah lebih rendah berbanding parameter Kebertelusan Dielektrik substrat silikon asal ($\epsilon_{berkesan} < \epsilon_{sub}$).

Manakala dimensi L_v , L_h dan w_s adalah dimensi lubang alur segiempat tepat yang disusun bagi membentuk huruf 'U' pada antenna tampalan. Ia memberi kesan aliran arus elektrik pada bahagian antenna tampalan bagi penstabilan operasi pada salunan frekuensi 5 GHz. Perubahan kedudukan lubang

alur dan saiz dimensi ini masing-masing dapat memberi kesan perubahan anjakan pada salunan frekuensi dan nilai parameter kehilangan balik. Formula oleh (Garg, R. et al. 2001) iaitu dan masing-masing digunakan bagi mengira dimensi panjang (l) dan lebar (w) antenna tampalan mengikut geometri corak kajian ini.

SIMULASI MODEL ANTENA MEMS

Reka bentuk antenna MEMS bagi kajian ini adalah menggunakan perisian Computer Simulation Technology-Microwave Studio (CST-MWS). Hasil keputusan yang dihasilkan adalah tepat kerana terdapat pilihan saiz unsur jejaring yang disediakan. Pemilihan saiz unsur jejaring yang paling halus menghasilkan keputusan lebih tepat walaupun mengambil lebih masa untuk menjalankan simulasi. Terdapat juga pilihan kaedah kajian parametrik yang menyokong penghasilan struktur reka bentuk antenna yang optima pada salunan frekuensi 5 GHz yang telah ditetapkan. Melalui kemasukan data yang berbeza bagi dimensi struktur reka bentuk antenna, perisian ini dapat menjalankan penganalisaan yang spesifik merangkumi penghasilan parameter yang diperlukan iaitu parameter -S, gandaan antenna, pengarah, Nisbah Gelombang Pegun Voltan (VSWR) dan corak pemancaran.

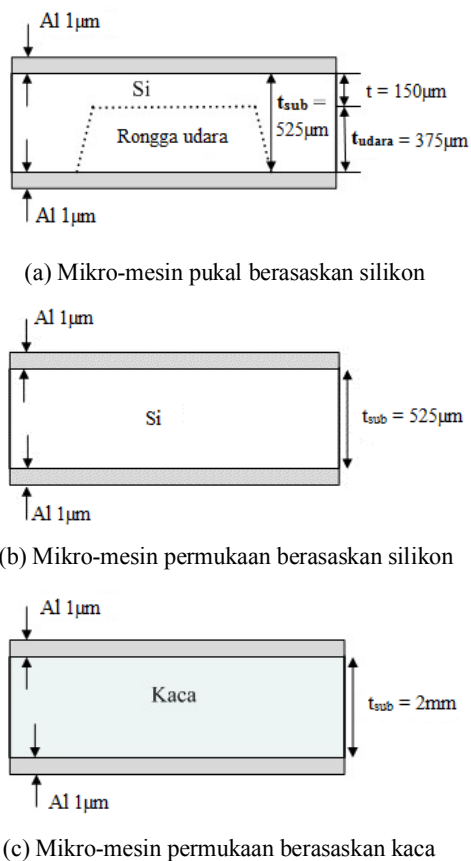
Bahan-bahan substrat serta cirinya yang turut dikaji secara simulasi di dalam kajian ini ditunjukkan dalam Jadual 2. Secara amnya, silikon dan kaca adalah bahan yang biasa digunakan melalui teknik fabrikasi pemesinan mikro. Kepentingan kajian substrat berasaskan bahan RT/Duroid 5880 adalah sebagai rujukan perbandingan terhadap reka bentuk antenna konvensional yang lazimnya dihasilkan melalui teknik fabrikasi Papan Litar Bercetak (PCB). Bahan substrat RT/Duroid yang digunakan adalah mengikut spesifikasi piawai yang dikeluarkan oleh Perbadanan Rogers, Chandler, AZ, Amerika Syarikat (Yunus et al. 2019). Bahan substrat yang dikaji ini adalah bertujuan bagi membuat penilaian parameter pemilihan substrat antenna dengan lebih tepat.

JADUAL 2. Spesifikasi bahan substrat antenna yang dikaji untuk simulasi

Substrat	Kebertelusan Dielektrik, ϵ_r	Tangen kehilangan, $\tan \delta$	Ketebalan substrat, t_{sub} (μm)	Bahan pengalir
Kaca borosilikat Pireks	4.7	0.0037	2000	Aluminium
RT/Duroid 5880	2.2	0.0009	1500	Tembaga
Silikon kristal tunggal	11.9	*0.00025 S/m (kekondusian elektrik)	525	Aluminium

Rajah 3 menggambarkan pandangan keratan rentas struktur serta bahan-bahan yang digunakan iaitu silikon dan kaca bagi tiga reka bentuk antenna mikro-mesin yang berbeza. Spesifikasi dimensi ketebalan bahan pengalir iaitu aluminium dan dimensi ketinggian bahan substrat bagi setiap reka bentuk antenna juga ditunjukkan. Manakala, satu reka

bentuk antenna konvensional adalah merujuk kepada dimensi struktur yang sedia dibuat iaitu dengan menggunakan bahan RT/Duroid mengikut piawai yang telah dikeluarkan. Setiap dimensi mengikut struktur antenna mikro-mesin tertentu telah dimodelkan menggunakan perisian serta dijalankan simulasi dengan penetapan operasi salunan pada 5 GHz.



RAJAH 3. Pandangan keratan rentas antenna mikro-mesin

KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

Reka bentuk antenna dipastikan berpadanan berpadanan galangan iaitu 50Ω berhubung dengan padanan galangan litar penuai tenaga RF yang disambungkan (Yunus et al. 2020). Terdapat empat

reka bentuk antenna yang disimulasi bagi mendapatkan hasil perbandingan dimensi struktur dan parameter prestasi antenna. Empat reka bentuk tersebut iaitu tiga jenis antenna mikro-mesin dengan berasaskan bahan substrat yang berbeza iaitu antenna mikro-mesin permukaan berasaskan silikon, antenna mikro-mesin pukal berasaskan silikon dengan rongga udara dan antenna mikro-mesin permukaan berasaskan kaca serta antenna berasaskan substrat RT/Duroid 5880 sebagai rujukan. Jadual 3 menyenaraikan hasil simulasi dimensi struktur yang telah dioptimumkan pada frekuensi 5 GHz bagi empat reka bentuk antenna tersebut. Dimensi antenna adalah berbeza pada setiap jenis bahan substrat yang digunakan pada saluran frekuensi yang sama. Struktur reka bentuk antenna adalah seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 2.

Dimensi panjang dan lebar (L/W) substrat memberi gambaran saiz fizikal keseluruhan antenna. Dimensi L/W dapat ditentukan dengan kaedah cuba-jaya melalui penyesuaian pelbagai nilai bagi parameter dimensi secara simulasi, dengan memerhatikan hasil bagi plot parameter-S pada saluran frekuensi 5 GHz. Melalui hasil simulasi bagi dimensi L/W yang telah dioptimumkan, antenna mikro-mesin permukaan berasaskan substrat kaca adalah bersaiz paling kecil berbanding tiga antenna yang lain. Ia menunjukkan 29.63% saiz lebih kecil berbanding antenna berasaskan substrat RT/Duroid 5880 yang menghampiri saiz dimensi dengannya.

Dimensi L_v , L_h dan w_s seperti yang ditunjukkan dalam Jadual 3 adalah dimensi lubang alur 'U'. Lazimnya, lubang alur direka bentuk bagi penambahan operasi jalur frekuensi. Namun, kajian ini hanya memfokuskan operasi frekuensi jalur sempit yang tunggal, di mana ia juga selari dengan operasi frekuensi tunggal bagi litar penuai tenaga RF yang dicadangkan (Yunus et al. 2020). Maka, lubang alur ini dapat menyokong kestabilan frekuensi operasi. Dimensi panjang garis suapan mikrojalur (ΔL) diberikan oleh perbezaan antara Panjang garis jalur (l_{sl}) dan Panjang takuk (l_n), $\Delta L = l_{sl} - l_n$.

JADUAL 3. Dimensi struktur reka bentuk antenna secara simulasi

Dimensi (mm)	Mikro-mesin Permukaan Si	Mikro-mesin Pukal Si	RT/Duroid 5880	Mikro-mesin Permukaan Kaca
L	49	30	26.99	19
W	40	27	27.5	19
l	39.5	17	16.98	10
w	33	17	23	15.5
l_{sl}	18	17	12.5	14.3
w_{sl}	2.98	2	1.85	1.93
l_n	11	7	6.5	6.48
w_n	5.18	4.58	3.75	3.85
G_{pf}	1.1	1.29	0.95	0.96
ΔL	7	10	6	7.82
L_v	17.74	10.82	7.76	8
L_h	15	7	5.91	5.6
w_s	1.37	0.91	0.78	0.9

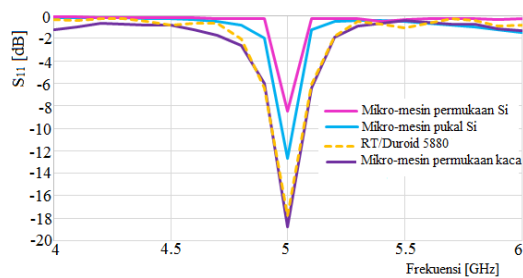
bersambung ...

... sambungan

a	0	20.46	0	0
b	0	20.46	0	0
t_{udara} (μm)	0	375	0	0
t_{sub} (μm)	525	525	1500	2000
t_{tampal} (μm)	1	1	17.5	1

Perbandingan dimensi antenna tampalan (l/w) berasaskan substrat RT/Duroid dan substrat kaca Pireks tidak menunjukkan perbezaan yang ketara diantara keputusan simulasi dan pengiraan menggunakan formula. Namun, bagi antenna berasaskan substrat silikon, keputusan simulasi menghasilkan perbezaan purata 78.41% dimensi lebih besar berbanding dimensi yang dihasilkan secara pengiraan. Ini kerana pengubahsuaian penambahan reka bentuk corak lubang alur pada antenna tampalan dan dimensi ruang udara pada substrat silikon memerlukan antenna tampalan yang lebih luas dalam sistem pengalir elektrik bagi menyokong pemancaran atau penerimaan isyarat gelombang elektromagnetik pada frekuensi tertentu.

Simulasi dijalankan pada setiap antenna yang telah dioptimumkan bagi mengkaji prestasinya. Rajah 4 menunjukkan plot perbandingan kehilangan balik S_{11} bagi empat antenna tersebut.



RAJAH 4. Perbandingan kehilangan balik S_{11} secara simulasi

Keputusan simulasi menunjukkan nilai kehilangan balik S_{11} yang diperolehi adalah kurang daripada -10 dB (< -10 dB) kecuali bagi antenna mikro-mesin permukaan silikon, di mana nilai kehilangan balik S_{11} melebihi -10 dB (> -10 dB). Kehilangan balik S_{11} pada nilai kurang daripada -10 dB menunjukkan rangkaian tahap di mana antenna boleh menjalankan fungsi secara berkesan dan beroperasi dengan baik. Sebaliknya, antara faktor yang menyumbang kepada penghasilan kehilangan balik S_{11} pada nilai lebih daripada -10 dB adalah kerana nilai Kebertelusan Dielektrik (ϵ_r) yang tinggi bagi bahan silikon iaitu melebihi nilai indeks 10 ($\epsilon_r \geq 10$). Oleh itu, penambahbaikan dengan membuat pengubahsuaian struktur silikon dijalankan dengan mengurangkan ketebalan dan mewujudkan rongga udara dalam had nisbah tertentu. Pengubahsuaian silikon ini dapat menghasilkan nilai kehilangan balik S_{11} berada pada bacaan kurang daripada -10 dB. Struktur antenna ini dapat dibangunkan dengan pelaksanaan teknik pemesinan mikro pukal. Melalui hasil keputusan simulasi, kehilangan balik S_{11} bagi antenna mikro-mesin pukal silikon dapat menghasilkan

penambahbaikan sebanyak 33.5% berbanding antenna mikro-mesin permukaan silikon.

Perbandingan keputusan kehilangan balik S_{11} dilanjutkan menggunakan antenna mikro-mesin permukaan berasaskan kaca Pireks. Substrat kaca dipilih kerana sifat nilai ϵ_r yang lebih rendah berbanding silikon. Secara kasarnya merujuk kepada Rajah 4, nilai S_{11} bagi antenna mikro-mesin permukaan kaca Pireks, antenna mikro-mesin permukaan silikon dan antenna konvensional substrat RT/Duroid masing-masing adalah 19 dB, 8.5 dB dan 18 dB. Keputusan ini menunjukkan nilai S_{11} bagi antenna mikro-mesin permukaan kaca Pireks meningkat sebanyak 55.1% dan 5.6% berbanding masing-masing, antenna mikro-mesin permukaan silikon dan antenna konvensional substrat RT/Duroid. Ini disebabkan oleh dimensi ketebalan kaca adalah lebih tebal berbanding bahan substrat lain, di mana ia menyebabkan berkurangnya kesan kapasitan parasitik yang dihasilkan.

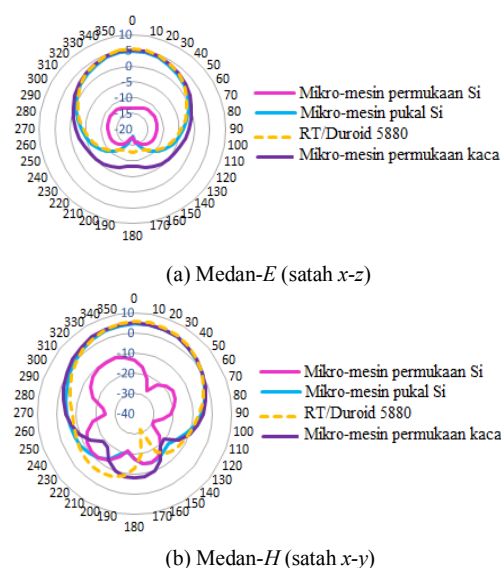
Melalui plot keputusan kehilangan balik S_{11} yang dihasilkan, nilai bagi Lebar Jalur (BW) dapat ditentukan. Nilai BW berdasarkan kepada bacaan jarak antara dua titik maksimum-minimum frekuensi salunan pada aras 0 dB berdasarkan plot kehilangan balik S_{11} pada aras < -10 dB. Oleh itu, hasil bacaan BW tidak wujud bagi antenna mikro-mesin permukaan silikon kerana kehilangan balik S_{11} tidak mencapai aras < -10 dB. Rangkaian pencapaian bagi BW yang luas iaitu dalam julat dari 100 MHz hingga 2.45 GHz adalah diperlukan mengikut piawaian jalur frekuensi Perindustrian, Sainifik dan Perubatan (ISM). Oleh itu, nilai BW bagi antenna mikro-mesin permukaan kaca iaitu 117 MHz melalui nilai julat bacaan dari 4.9474 GHz hingga 5.0644 GHz dan antenna konvensional RT/Duroid 5880 iaitu 115 MHz melalui nilai julat bacaan dari 4.948 GHz hingga 5.063 GHz. Ini menunjukkan kedua-dua antenna tersebut dapat dikategorikan sebagai antenna dengan BW yang lebar mengikut piawaian. Walau bagaimanapun, antenna mikro-mesin pukal silikon menunjukkan keputusan nilai BW yang sempit iaitu 32 MHz melalui nilai julat bacaan dari 4.981 GHz hingga 5.013 GHz.

Nilai BW dapat ditentukan berdasarkan kepada dua parameter iaitu kehilangan balik S_{11} kurang daripada -10 dB dan VSWR kurang daripada 2. Melalui simulasi, hanya tiga jenis antenna iaitu antenna mikro-mesin pukal silikon, antenna konvensional RT/Duroid 5880 dan antenna mikro-mesin permukaan kaca menunjukkan hasil VSWR kurang daripada 2. Nilai BW tidak dapat dihasilkan oleh antenna mikro-mesin permukaan silikon kerana tidak memenuhi dua spesifikasi yang diperlukan. Keadaan ini adalah disebabkan oleh sifat asas bahan substrat silikon dengan nilai ϵ_r yang

tinggi, di mana ia dapat menguji gelombang permukaan dan pelemahan corak pemancaran seperti dalam hasil kajian oleh (Papapolymerou et al. 1998).

Rajah 5 menunjukkan rajah Dua-dimensi (2D) hasil simulasi corak pemancaran bagi perbandingan medan-jauh antara medan- E dan medan- H bagi empat reka bentuk antenna tersebut. Dalam medan- E , kesemua antenna menunjukkan corak simetri lurus pada arah atas dan juga corak alur semua-arah menghala ke atas. Dalam medan- H , antenna mikro-mesin permukaan silikon menunjukkan sedikit

corak pemancaran yang tidak homogen, manakala ketiga-tiga antenna yang lain menunjukkan corak pemancaran alur semua-arah menghala ke atas. Corak pemancaran bagi empat reka bentuk antenna ini lebih menumpu ke arah menghala ke atas pada kedua-dua medan- E dan medan- H . Ia menunjukkan alur pemancaran bagi antenna tersebut adalah lebih bertumpu pada bahagian lapisan atas pada antenna tampalan berbanding lapisan bawah satah bumi bagi antenna. Nilai maksimum bacaan parameter gandaan antenna dapat dirujuk pada plot puncak corak pemancaran pada sudut 0° .



RAJAH 5. Perbandingan corak pemancaran secara simulasi

Ringkasan perbandingan prestasi antenna yang diperolehi secara pengumpulan data melalui hasil keputusan simulasi tersebut ditunjukkan dalam Jadual 4. Keputusan gandaan antenna dan pengarahannya bagi antenna konvensional RT/Duroid adalah lebih tinggi berbanding antenna yang lain. Bagaimanapun, antenna mikro-mesin permukaan kaca juga mempunyai reka bentuk yang baik dengan gandaan antenna melebihi 5 dB serta pengarahannya melebihi 5 dBi. Hasil keputusan antenna mikro-mesin permukaan kaca

adalah cukup baik bagi menghantar alur pemancaran dalam kedudukan yang dikehendaki pada titik tumpuannya. Hasil keputusan pengarahannya adalah lebih tinggi bagi kedua-dua antenna konvensional RT/Duroid 5880 dan antenna mikro-mesin pukal silikon berbanding antenna mikro-mesin permukaan kaca. Ini menunjukkan kedua-dua antenna ini adalah lebih berkesan untuk beroperasi pada penumpuan tenaga yang diterima atau ditangkap dalam kedudukan yang statik dari satu arah yang tepat.

JADUAL 4. Ringkasan perbandingan prestasi antenna secara simulasi

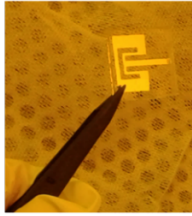
Antena	S_{11} (dB)	VSWR	BW (MHz)	Gandaan (dB)	Pengarahannya (dBi)
Mikro-mesin Permukaan Si	-8.45	22	Tidak wujud	- 7.8	3.584
Mikro-mesin Pukal Si	-12.7	1.6	32	4.754	6.410
RT/Duroid 5880	-17.75	1.3	115	5.555	7.195
Mikro-mesin Permukaan kaca	-18.8	1.2	117	5.022	5.849

FABRIKASI REKA BENTUK ANTENA

Kajian ini memfokuskan antenna mikro-mesin permukaan kaca bagi menjalani proses fabrikasi Mikro Elektro Mekanik (MEMS). Pemilihan antenna berasaskan substrat kaca adalah berdasarkan kesesuaian bagi aplikasi dalam kajian ini berbanding bahan silikon. Reka bentuk antenna yang lutsinar bersaiz (L/W) iaitu 19 mm x 19 mm seperti ditunjukkan

dalam Rajah 6 telah berjaya difabrikasikan. Kajian ini telah membuktikan fabrikasi antenna tampalan mikrojalur dapat dijalankan pada substrat kaca dengan menggunakan binaan lapisan bahan pengalir iaitu aluminium. Lapisan aluminium berketebalan mikrometer ini diendap pada permukaan kaca melalui proses pemercitan. Bahan pengalir aluminium dipilih dalam kajian ini berbanding tembaga yang kebiasaannya digunakan dalam reka bentuk antenna. Ini kerana aluminium

adalah pengalir yang baik iaitu pada parameter 3.8×10^7 S/m, kebolehpemercayaan ikatan penyambungan wayar yang lebih baik dan kos pembuatan yang jimat seperti penemuan kajian oleh (Hügler, P. et al. 2019).



RAJAH 6. Hasil fabrikasi antenna MEMS

KESIMPULAN

Reka bentuk antenna MEMS bagi kajian ini menggunakan perisian CST-MWS dan penganalisaan merangkumi parameter $-S$, gandaan antenna, pengarah, VSWR dan corak pemancaran. Perbandingan bagi empat jenis antenna iaitu antenna mikro-mesin permukaan silikon, antenna mikro-mesin pukal silikon dengan rongga udara, antenna mikro-mesin permukaan kaca dan antenna RT/Duroid 5880 sebagai rujukan. Hasil simulasi dimensi struktur telah dioptimumkan pada frekuensi 5 GHz dan dimensi antenna adalah berbeza pada setiap jenis bahan substrat yang digunakan pada salunan frekuensi yang sama. Hasil simulasi menunjukkan antenna mikro-mesin permukaan kaca adalah bersaiz paling kecil berbanding tiga antenna yang lain. Kehilangan balik, S_{11} antenna ini juga adalah lebih baik iaitu meningkat sebanyak 55.1% dan 5.6% berbanding masing-masing, antenna mikro-mesin permukaan silikon dan antenna konvensional berasaskan substrat RT/Duroid. Antenna mikro-mesin permukaan kaca juga mempunyai nilai BW yang lebar iaitu 117 MHz, gandaan melebihi 5 dB dan pengarah melebihi 5 dBi. Parameter antenna MEMS kaca ini sangat sesuai untuk menangkap tenaga RF yang sangat rendah dan dapat menghidupkan penuai tenaga mikro bagi membekalkan tenaga kepada peranti elektronik. Antenna ini juga telah berjaya difabrikasi menggunakan teknologi MEMS yang menghasilkan antenna lutsinar bersaiz (L/W) 19 mm x 19 mm. Antenna kaca yang bersaiz kecil ini sangat sensitif dan lebih kukuh bagi menangkap isyarat ambien RF dengan berkesan.

PENGHARGAAN

Kajian ini telah mendapat sumbangan dari Kementerian Pendidikan Malaysia di bawah geran (FRGS/1/2018/TK04/UKM/02/1) dan syarikat Perwira AI Shura M&E Sdn. Bhd. di bawah geran industri (RR-2022-001).

PENGISYTIHARAN KEPENTINGAN BERSAING

Tiada.

RUJUKAN

- Amjad, O., Munir, S. W., İmeci, Ş. T. & Ercan, A. Ö. 2018. Design and Implementation of Dual Band Microstrip Patch Antenna for WLAN Energy Harvesting System 33(7): 746–752.
- Ansari, J. A., Mishra, A., Yadav, N. P., Singh, P., & Vishvakarma, B. R. 2012. Analysis of W-slot loaded patch antenna for dualband operation. *AEU-International Journal of Electronics and Communications* 66(1): 32–38.
- Bakkali, A., Sogorb, T. & Llario, V. 2016. A Dual-Band Antenna for RF Energy Harvesting Systems in Wireless Sensor Networks.
- Balanis, C. A. 2015. *Antenna Theory: Analysis and Design*. 3rd edition. New York. Wiley.
- Garg, R., Bhartia, P., Bahl, I., Ittipiboon, A. 2001. *Microstrip Antenna Design Handbook*. Artech house, Narwood, US.
- Guo, S. & Shi, Y. 2017. Energy Efficiency Maximization in Mobile Wireless Energy Harvesting Sensor Networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing* 17(7): 1524–1537.
- Hügler, P., Zaky, M., Roos, M., Strehle, S., & Waldschmidt, C. 2019. Optically Transparent Patch Antennas at 77 GHz Using Meshed Aluminum. *IEEE 2019 12th German Microwave Conference (GeMiC)*: 186–189.
- Ishak, S. N., Sampe, J., Yusoff, Z., & Faseehuddin, M. 2022. All digital Phase Locked Loop (ADPLL) Topologies for RFID System Application: A Review. *J. Teknol. Eng* 84(1) :219–230.
- Kim, S., Tentzeris, M. M. & Georgiadis, A. 2019. Hybrid Printed Energy Harvesting Technology for Self-Sustainable Autonomous Sensor Application. *sensors* 19(3): 728.
- Kim, H., & Kwon, I. 2019. Design of high-efficiency CMOS rectifier with low reverse leakage for RF energy harvesting. *Electronics Letters*.
- Lee, K. F. L., & Luk, K. M. 2011. *Microstrip Patch Antennas*. Imperial College Press: London.
- Liu, X. & Ansari, N. 2019. Toward Green IoT : Energy Solutions and Key Challenges. *IEEE Communications Magazine* 57(March): 104–110.
- Maniam, G., Sampe, J., Jaafar, R. & Ibrahim, M. F. 2022. Smart monitoring system for chronic kidney disease patients based on fuzzy logic and IoT. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications* 13(2): 324–333.
- Mehler, M. J. 2003. *Propagation of Radio Waves*. 2nd edition. L. Barclay, Ed.: Institution of Electrical Engineers.
- Mohamad, T.N.T, Sampe, J. and Berhanuddin, D. D. 2017. Architecture of micro energy harvesting using hybrid input of RF, thermal and vibration for semi-active RFID tag. *Engineering Journal* 21 (2):183-197
- Papapolymerou, I., Member, S., Drayton, R. F. & Katehi, L. P. B. 1998. Micromachined patch antennas. *IEEE Trans. Antennas Propag* 46(2): 275–283.
- Ren, J., Hu, J., Zhang, D., Guo, H., Zhang, Y. & Shen, X. S. 2018. Imminent Communication Technologies for Smart Communities RF Energy Harvesting and Transfer in Cognitive Radio Sensor Networks : Opportunities and Challenges. *IEEE Communications Magazine* 56(January): 104–110.
- Sampe, J., Zulkifli, F.F., Semsudin, N.A.A. and Majlis, B.Y. 2017. Litar penuai tenaga hibrid mikro untuk aplikasi bioperubatan. *Jurnal Kejuruteraan* 29(1): 41-48.

- Saravanan, M., Janardhana, M. & Rangachar, S. 2019. Design of Rhombus-Shaped Slot Patch Antenna for 2019.
- Sengar, S. K. & Koei, N. 2014. Introduction to Wireless Power Transmission, March.
- Shen, S., Member, S., Chiu, C., Member, S. & Murch, R. D. 2018. Multiport pixel rectenna for ambient RF energy harvesting. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 66(2): 644–656.
- Shrestha, S., Noh, S. & Choi, D. 2013. Comparative study of antenna designs for RF energy harvesting. *International Journal of Antennas and Propagation*, Volume 2013, Article ID 385260, 10 pages
- Sung, G. M., Chung, C. K., Lai, Y. J., & Syu, J. Y. 2019. Small-area radiofrequency-energy-harvesting integrated circuits for powering wireless sensor networks. *Sensors* 19(8): 1754.
- Thorat, R. & Pande, V. 2015. A Review of MEM sensors. *International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management* 4(1): 101–104.
- Waterhouse, R. 2013. Microstrip patch antennas: A designer's guide. Springer Science & Business Media. doi.org/10.2528/PIERB13111105
- Xu, P., Flandre, D., & Bol, D. 2018. Design of a 2.45-GHz RF Energy Harvester for SWIPT IoT smart sensors. In 2018 IEEE Asian Solid-State Circuits Conference (A-SSCC) IEEE: 107–110.
- Yunus, N.H.M, Yunas, J, Pawi, A., Rhazali, Z. A. and Sampe, J. 2019. Investigation of micromachined antenna substrates operating at 5 Ghz for RF energy harvesting applications. *Micromachines* 10(2019): 146.
- Yunus, N.H.M., Sampe, J., Yunas, J. and Pawi, A. and Rhazali, Z. A. 2020. MEMS based antenna of energy harvester for wireless sensor node. *Microsystem Technologies* 26(9): 2785-2792.