

## Antena Tatasusun Grid Lut Sinar dengan Sel Suria Terpeka Pewarna (DSSC) (Integration of Grid Array Antenna with Dye Sensitised Solar Cell (DSSC))

Nur Izzati Mohd Ali<sup>a,b\*</sup>, Norbahiah Misran<sup>c</sup>, Mohd Fais Mansor<sup>c</sup>, Norsuzlin Mohd Sahar<sup>d</sup>, Mohd Faizal Jamlos<sup>e</sup> & Eryana Eiyda Hussin<sup>f</sup>

<sup>a</sup>Fakulti Kejuruteraan & Teknologi Elektronik, Universiti Malaysia Perlis, Kampus Pauh Putra, 02600 Arau, Perlis, Malaysia

<sup>b</sup>Centre of Excellence for Advanced Communication Engineering (ACE), Universiti Malaysia Perlis, Arau, 02600, Perlis, Malaysia

<sup>c</sup>Jabatan Kejuruteraan Elektrik, Elektronik & Sistem, Fakulti Kejuruteraan & Alam Bina, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 Bangi, Selangor, Malaysia

<sup>d</sup>Pusat Sains Angkasa, Institut Perubahan Iklim, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 Bangi, Selangor, Malaysia

<sup>e</sup>Fakulti Teknologi Kejuruteraan Elektrik & Elektronik, Universiti Malaysia Pahang, Kampus Pekan, 26600 Pekan, Pahang, Malaysia

<sup>f</sup>Faculty of Engineering, UCSI University, UCSI Heights, Cheras, 56000, Kuala Lumpur, Malaysia

\*Corresponding author: nurizzatimohdali@unimap.edu.my

Received 15 June 2023, Received in revised form 6 May 2024

Accepted 6 June 2024, Available online 30 July 2024

### ABSTRAK

Sistem komunikasi wayarles memerlukan tenaga elektrik untuk beroperasi dan berfungsi. Aplikasi sendiri pula memerlukan bekalan kuasa tak bersandar yang boleh direalisasikan dengan penggunaan teknologi fotovoltan. Lazimnya, sel fotovoltan dan antena adalah dua peranti yang berbeza. Peranti-peranti ini bersaing bagi memenuhi ruang pada sistem mudah alih atau sendiri yang umumnya amatlah terhad. Bagi mengatasi masalah ini, kombinasi antara antena dan sel suria menjadi satu alat yang sama diperlukan. Integrasi antena dan sel suria adalah mencabar kerana kepentingan ciri kompak, ringkas dan bagi memperolehi kecekapan yang optimum bagi kedua-dua elemen antena dan sel suria. Kajian ini memfokuskan pada mereka bentuk antena tatasusun grid lut sinar berintegrasi sel suria Sel Suria Terpeka Pewarna (DSSC) bagi aplikasi jalur-Ku. Reka bentuk tatasusun grid adalah bagi menambah baik prestasi antena, dan dipilih kerana kesesuaian teknik ini dengan reka bentuk dan struktur peranti antena suria. Antena diintegrasikan bersama sel suria disimulasi menggunakan perisian Computer Simulation Technology (CST) pada frekuensi 14GHz bagi aplikasi jalur-Ku. Prototaip antena dan sel suria dibangunkan menggunakan proses fabrikasi dan kemudian diuji dan diukur kecekapan bagi kedua-dua elemen antena dan suria. Bagi elemen suria pula, pengukuran prestasi dilakukan dengan menggunakan lampu halida bagi memimik cahaya matahari dan kemudian dapatan akan dibentangkan dalam bentuk lengkung arus-voltan. Secara ringkasnya, di akhir kajian ini, antena suria lut sinar bagi aplikasi jalur-Ku berjaya direka dengan gandaan melebihi 10 dBi, manakala prestasi sel suria dengan  $0.6733 V_{OC}$ ,  $2.06 \text{ mA/cm}^2 J_{SC}$ , diikuti dengan faktor pengisian,  $f_F$  dan kecekapan penukaran kuasa sel suria,  $\eta$  masing-masing 29.31% dan 0.407%.

Kata kunci: Antena suria; antena lut sinar; antena suria lut sinar; sel suria terpeka pewarna; tatasusun grid

### ABSTRACT

Wireless communication systems require electrical energy to operate and function. Whereas standalone applications require reliable power sources which can be realised by photovoltaic technology. Typically, photovoltaic cells and antennas are two separate devices. These devices compete for space in mobile or standalone systems, where available space is generally very limited. To address this issue, a combination of an antenna and a solar cell into a single device

is needed. Integrating an antenna with a solar cell is challenging due to the importance of maintaining a compact, simple design while achieving optimal efficiency for both elements. This study focuses on designing a transparent grid array antenna integrated with Dye-Sensitized Solar Cells (DSSC) for Ku-band applications. The grid array design aims to improve antenna performance and is chosen for its suitability with the design and structure of the solar antenna device. The integrated antenna and solar cell were simulated using Computer Simulation Technology (CST) software at a frequency of 14 GHz for Ku-band applications. A prototype of the antenna and solar cell was fabricated, then tested and measured for the efficiency of both the antenna and solar elements. For the solar element, performance measurements were conducted using a halide lamp to mimic sunlight, with results presented in the form of current-voltage curves. In summary, by the end of this study, a transparent solar antenna for Ku-band applications was successfully designed with a gain exceeding 10 dBi. The solar cell's performance showed an open-circuit voltage ( $V_{oc}$ ) of 0.6733 V, a short-circuit current density ( $J_{sc}$ ) of 2.06 mA/cm<sup>2</sup>, a fill factor ( $f_p$ ) of 29.31%, and a power conversion efficiency ( $\eta$ ) of 0.407%.

**Keywords:** Solar antenna; transparent antenna; transparent solar antenna; Dye Sensitized Solar Cell (DSSC); grid array

## PENGENALAN

Konsep menggunakan matahari bagi menghasilkan tenaga elektrik mempunyai potensi untuk menangani masalah pemanasan global yang disebabkan oleh penggunaan bahan api fosil yang tidak dibendung. Oleh itu, sebagai satu alternatif kepada bahan api fosil, tenaga suria menjadi pilihan utama untuk membekalkan kuasa kepada sistem komunikasi secara mesra alam (An et al. 2021; Xi et al. 2020; Z. Zhang et al. 2020). Sistem komunikasi wayarles memerlukan tenaga elektrik untuk beroperasi dan berfungsi. Aplikasi sendiri pula memerlukan bekalan kuasa tak bersandar yang boleh direalisasikan dengan penggunaan teknologi fotovoltan. Lazimnya, sel fotovoltan dan antena adalah dua peranti yang berbeza. Peranti-peranti ini bersaing bagi memenuhi ruang pada sistem mudah alih atau sendiri yang umumnya amatlah terhad. Bagi mengatasi masalah ini, kombinasi antara antena dan sel suria menjadi satu alat yang sama diperlukan. Integrasi antena dan sel suria adalah mencabar kerana kepentingan ciri kompak, ringkas dan bagi memperoleh kecekapan yang optimum bagi kedua-dua elemen antena dan sel suria.

Antena satah bersel suria yang direka bentuk menggunakan bahan yang legap bagi setiap strukturnya dilihat mempunyai reka bentuk dan proses integrasi antena dan sel suria yang kompleks, sukar dihasilkan, dan mempunyai saiz yang besar (An et al. 2021; Cambero et al. 2019; Henze et al. 2003; Lim et al. 2010; Rabie et al. 2018; Yurduseven et al. 2012; Z. Zhang et al. 2020). Disebabkan bahan legap yang digunakan bagi menghasilkan antena suria ini, cahaya matahari yang sepatutnya sampai ke sel suria jadi terhalang dan fenomena ini dinamakan sebagai kesan bayangan. Kesan bayangan adalah salah satu faktor bagi prestasi sel suria terjejas (Rabie et al. 2018; Roo-Ons et al. 2010; S. V Shynu et al. 2009; S. V. Shynu et al. 2007; 2008).

Penggunaan bahan lut sinar iaitu pada sebahagian struktur antena, terutamanya untuk bahagian substrat

dielektrik, kemudian diletakkan sel suria pada bahagian bawah sebagai bumi telah dilakukan oleh beberapa penyelidik (Hautcoeur et al. 2014; Rabie et al. 2018; Roo-Ons et al. 2011; Turpin and Baktur 2009; Xi et al. 2020; Yurduseven, Smith, and Elsdon 2014). Hasil dapatan kajian daripada reka bentuk ini, kesan bayangan dapat dikurangkan kerana reka bentuk bahagian pemancarnya yang berstruktur grid membenarkan cahaya menembusnya. Walau bagaimanapun, kesan bayangan ini semestinya tidak dapat disingkirkan sepenuhnya bagi reka bentuk ini dan seterusnya masih menjejaskan prestasi sel suria terutamanya kuasa keluaran yang dicapai.

Antena suria yang direka bentuk menggunakan bahan yang lut sinar sepenuhnya bagi lapisan pemancar, substrat dan bumi adalah satu penyelesaian bagi masalah bayangan yang dihadapi dan telah dilakukan oleh (Hong et al. 2016a; Jizat et al. 2015; Kang and Jung 2018; Peter et al. 2014; 2011; Mohd Ali et al. 2020). Struktur yang ringkas dan berprofil rendah juga diperlukan bagi memastikan peranti tersebut boleh dipelbagaikan dari segi pemasangan dan aplikasi kerana sifatnya yang lut sinar dan kurang menonjol.

Kekangan terbesar mereka bentuk antena menggunakan bahan oksida konduktif lut sinar (*transparent conductive oxides*) sebagai bahan pemancar adalah kompromi di antara kehantaran optikal (*optical transmittance*) dan rintangan keping (*sheet resistance*),  $R_s$  bahan, sekali gus mempengaruhi kekonduksian bahan. Nilai kekonduksian bahan oksida konduktif lut sinar yang lazimnya rendah menjadi faktor kehilangan yang tinggi disebabkan oleh kedalaman kulit.

Pelbagai kaedah boleh digunakan bagi menambah baik prestasi antena, khususnya prestasi parameter gandaan, seperti penggunaan bahan konduktor berbilang lapisan seperti, mendapan lapisan-nano emas pada ITO (Ghiyasvand et al. 2018; Haraty et al. 2016), IZTO/Ag/IZTO (Hong et al. 2016b; Hong, Kim, and Won Jung 2017), gabungan ITO dan Cu (Zarbaksh et al. 2020), dan bahan Ag ITO (Eltresy

et al. 2021). Penggunaan bahan ini berjaya mengurangkan nilai rintangan keping bahan, sekali gus meningkatkan prestasi antenna, terutamanya nilai kecekapan. Walau bagaimanapun, selain proses penghasilan yang agak kompleks dan berkost tinggi, nilai ketelusan optik bagi bahan ini juga sangat terkesan. Teknik tatasusun juga adalah salah satu pendekatan bagi menambah baik prestasi gandaan antenna yang sering menjadi pilihan kerana faktor pendekatannya yang ringkas dan kos yang efisien (Muhammad Saqib Rabbani and Ghafouri-Shiraz 2017; M. S. Rabbani and Ghafouri-Shiraz 2017). Walau bagaimanapun, kekangan utama bagi teknik ini adalah saiznya yang besar (Li et al. 2021; M. S. Rabbani and Ghafouri-Shiraz 2017) di samping kesan gandingan saling (*mutual coupling*) sesama antenna boleh memberi kesan, termasuklah terhadap perubahan dalam corak teradiasi, gandaan, impedans dan juga kecekapan antenna.

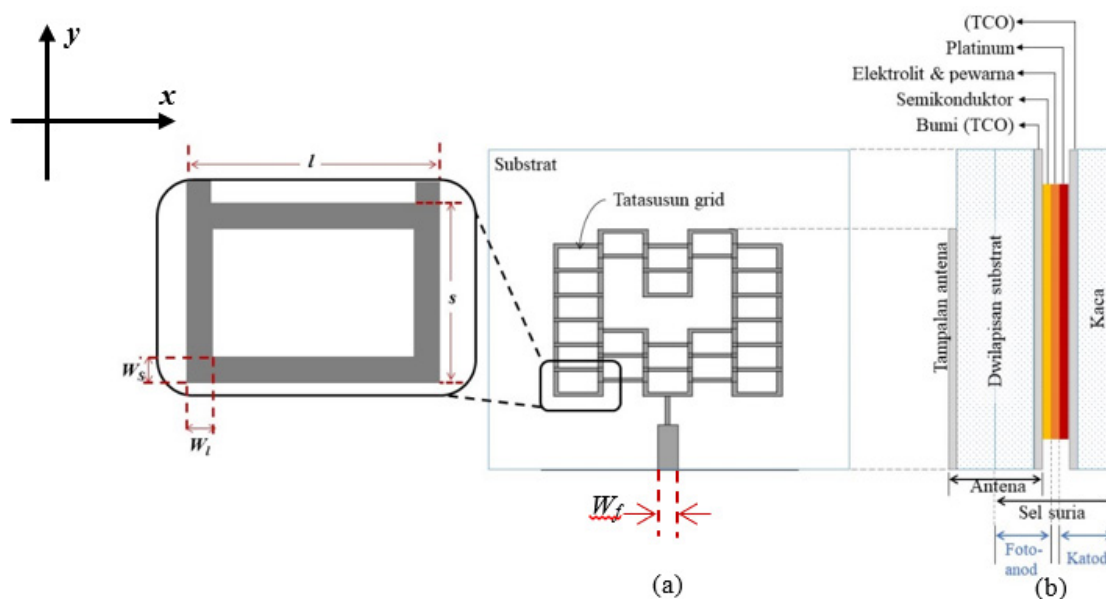
Pendekatan lain bagi menambah baik prestasi gandaan antenna adalah dengan penggunaan struktur bahan meta pada reka bentuk antenna. Pendekatan ini berjaya menarik minat para penyelidik lebih-lebih lagi bagi aplikasi frekuensi tinggi disebabkan keupayaannya menambah baik lebar jalur, gandaan dan kecekapan di samping meminiaturan peranti tersebut (Van Yem and Lan 2018; Dadgarpour et al. 2020; Pandit, Mohan, and Ray 2017; K. Sun et al. 2018; Zhai et al. 2019). Walau bagaimanapun, ciri fizikal dan struktur reka bentuk antenna ini menjadikan teknik ini kurang sesuai digunakan pada antenna lut sinar mahupun filem tipis.

Kaedah menambah baik prestasi gandaan antenna menggunakan kaedah tatasusun grid seperti dilakukan oleh (Zihao and Yueping 2017; Ahmed, McEvoy, and Ammann 2018; Muhamad et al. 2016) kelihatan berpotensi tinggi kerana strukturnya yang ringkas yang sangat sesuai bagi tujuan integrasi elemen antenna dan sel suria. Terdapat beberapa penyelidikan telah dilakukan bagi meneroka kesan variasi bentuk grid selain segi empat terhadap prestasi antenna yang melibatkan corak radiasi (Kawano and Nakano 2017; 2019; Nakano 2016; Nakano, Iitsuka, and Yamauchi 2013; Jiang et al. 2012; B. Zhang and Zhang 2012).

Dalam kertas ini, hasil reka bentuk antenna tatasusun grid lut sinar bagi frekuensi operasi 14 GHz dengan integrasi sel suria dibincangkan. Antenna menggunakan bahan kaca dan *Indium tin-oxide* (ITO) masing-masing sebagai elemen substrat dielektrik dan pemancar yang bersifat lut sinar. Bagi elemen sel suria pula, sel suria terpeka pewarna atau *Dye Sensitised Solar Cell* (DSSC) adalah digunakan,

#### REKA BENTUK

Umumnya, seperti yang kita ketahui, terdapat tiga elemen utama antenna, iaitu elemen pemancar, substrat, dan bumi. Manakala DSSC pula mengandungi tiga komponen utama peranti ini; elektrod kerja atau foto-elektrod (anod), elektrolit cecair, dan elektrod-lawan (katod) (Jamalullail et al. 2018; Kamarulzaman et al. 2021; Trihutomo et al. 2019).



RAJAH 1. Struktur antenna sel suria dari (a) pandangan atas (b) pandangan sisi

Reka bentuk antenna tatasusun grid lut sinar yang berintegrasi sel suria adalah seperti yang ditunjukkan di Rajah 1. Reka bentuk ini merangkumi kedua-dua elemen sel suria dan antenna

Dalam reka bentuk ini, elemen pemancar bagi antenna adalah ITO dengan rintangan keping,  $R_s$   $10\Omega/\text{sq}$ , ketebalan  $0.185\mu\text{m}$ , dan kehantaran optik 90%. Substrat yang digunakan adalah dwilapisan kaca, dengan pemalar dielektrik,  $\epsilon_r$  3.0214, tangen kehilangan,  $\tan \delta$  sebanyak 0.0054, dengan ketebalan setiap satu lapisan 1.1 mm. Lapisan bumi adalah terdiri daripada bahan ITO. Kedua-dua lapisan substrat dan bumi antenna adalah sebahagian daripada lapisan fotoanod sel suria DSSC. Dimensi optimum bagi reka bentuk tatasusun grid ditunjukkan pada Jadual 1.

JADUAL 1. Dimensi teroptimum antenna

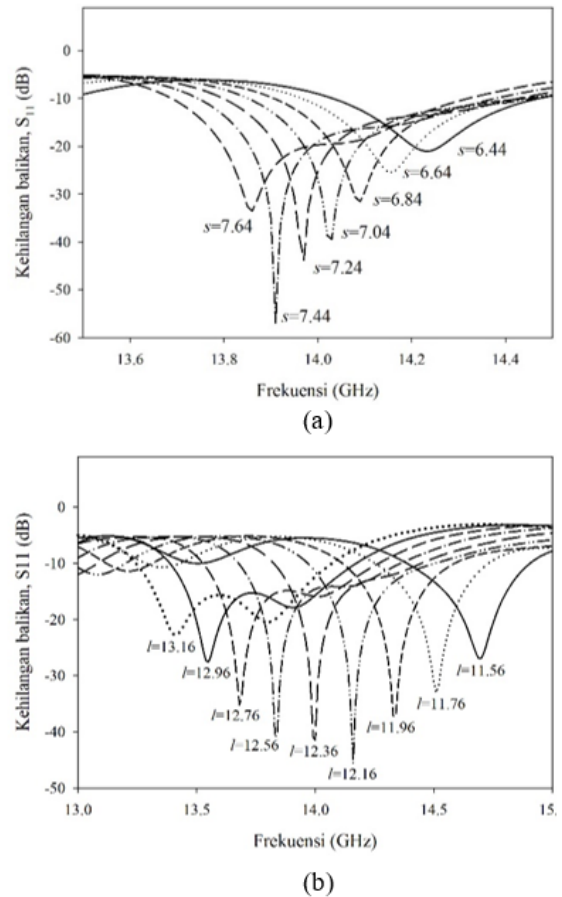
Parameter	Panjang (mm)
$l$	12.36
$s$	7.75
$W_l$	1.0
$W_s$	1.25
$W_f$	5.0

Sisi panjang,  $l$  berpandukan nilai  $\lambda_g$ , dan sisi pendek,  $s$  pula berpandukan  $\lambda_g$ . Sisi panjang grid,  $l$  berperanan sebagai elemen talian penghantaran, manakala sisi pendek,  $s$  juga sebagai elemen talian penghantaran dan dalam masa yang sama sebagai elemen penyinaran (Ahmed, McEvoy, and Ammann 2018; Ali, Misran, and Mansor 2019; Muhamad et al. 2016). Nilai-nilai ini kemudian melalui proses analisis parameter bagi memperoleh frekuensi operasi yang tepat pada 14GHz. Teknik suapan antenna yang digunakan adalah talian suapan kerana strukturnya yang ringkas dan tidak menjejaskan struktur lapisan bumi, sekali gus lapisan sel suria.

Rajah 2 menunjukkan analisis daripada kajian parametrik bagi perubahan parameter sisi pendek grid,  $s$  dan sisi panjang grid,  $l$ . Rajah tersebut menunjukkan keputusan bagi beberapa sambutan frekuensi yang terkesan dengan jelas oleh perubahan panjang sisi grid.

Berdasarkan rajah tersebut, pertambahan panjang sisi grid  $s$  mahupun  $l$  merubah frekuensi operasi menjadi lebih rendah. Sebaliknya pula bagi prestasi lebar jalur yang semakin baik dengan pertambahan panjang sisi grid  $s$  dan  $l$ . Perubahan sisi grid pendek,  $s$  dilihat memberikan lebih impak terhadap nilai kehilangan balikan,  $S_{11}$ . Perkara ini adalah disebabkan parameter fizikal  $s$  itu sendiri yang berperanan sebagai talian penghantaran di samping sebagai elemen pemancar antenna (Muhamad et al. 2016; Ali, Misran, and Mansor 2019; M. Sun and Zhang 2016). Ini

bermakna, dimensi panjang grid  $s$  ini akan mempengaruhi padanan impedans, sekali gus prestasi kehilangan balikan antenna. Ketebalan bagi grid panjang,  $W_p$  dan pendek,  $W_s$ , masing-masing ditetapkan kepada 1.0 mm dan 1.25 mm. Rumusan kajian parametrik ini dijelaskan lagi dalam Jadual 4.8.

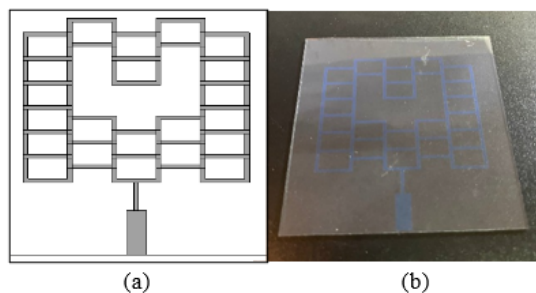


RAJAH 2. Kajian parametrik bagi kepanjangan (a) sisi pendek grid,  $s$  dan (b) sisi panjang grid,  $l$

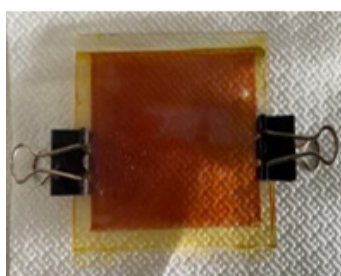
KEPUTUSAN & PERBINCANGAN

Rajah 3 menunjukkan reka bentuk lapisan tampalan antenna ini yang disimulasi dan dibangunkan, manakala Rajah 4 menunjukkan peranti DSSC yang telah dihasilkan. Prototaip antenna dan sel suria yang dibangunkan ini kemudian diuji dan diukur kecekapan bagi kedua-dua elemen antenna dan suria. Pengukuran prestasi antenna dilakukan dalam ruang bebas gema. Bagi elemen suria pula, pengukuran prestasi dilakukan dengan menggunakan lampu halida bagi memimik cahaya matahari dan kemudian dapatan dibentangkan dalam bentuk lengkung arus-voltan.

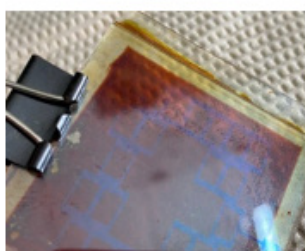




RAJAH 3. Reka bentuk antenna yang (a) disimulasi (b) dibangunkan



(a)

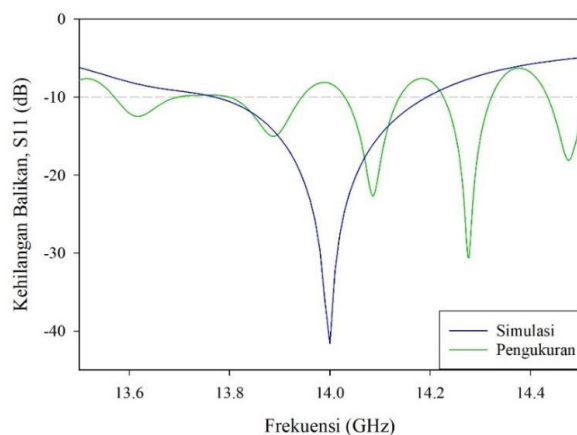


RAJAH 4. (a) Sel suria terpeka pewarna (b) Sel suria terpeka pewarna dengan elemen antenna

PRESTASI ANTENA

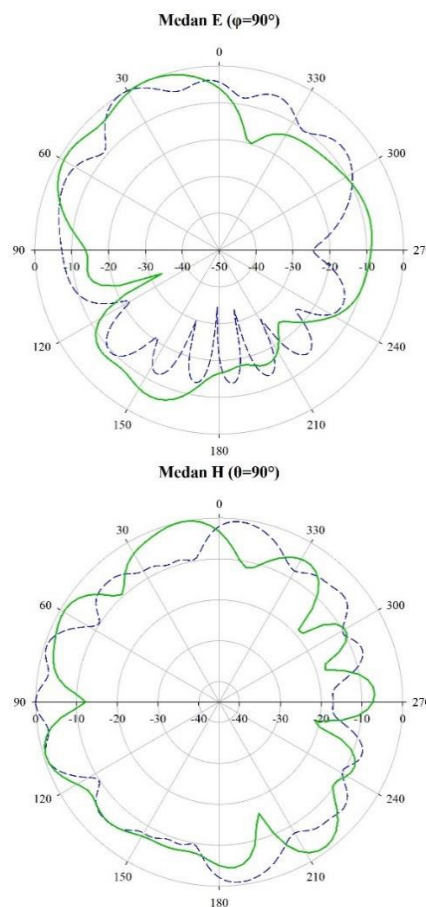
Sambutan frekuensi antenna ditunjukkan pada Rajah 5 dan dirumuskan di Jadual 2. Frekuensi operasi antenna yang dibangunkan dilihat sedikit teralih berbanding nilai simulasi, iaitu sebanyak 85MHz. Frekuensi yang teralih ini tidak menjejaskan aplikasi antenna kerana masih berada dalam julat Ku-band.

Perbezaan nilai-nilai yang diperolehi daripada pengukuran berbanding simulasi adalah telah dijangka kerana sifat bahan filem tipis ITO yang kurang konduktif berbanding bahan logam tipikal seperti kuprum. Selain itu, terdapat pelbagai sifat dielektrik mahupun konduktor yang tidak dapat dikenal pasti dengan tepat yang mungkin mempengaruhi keputusan prestasi. Kehadiran elemen sel suria sedikit sebanyak menjadi faktor perbezaan prestasi antenna simulasi dan pengukuran. Walaupun begitu, keputusan antenna ini menunjukkan bahawa ia dapat berfungsi dengan baik.



RAJAH 5. Perbandingan sambutan frekuensi hasil simulasi dan pengukuran

Corak teradiasi pada Rajah 6 menunjukkan corak yang terarah bagi kedua-dua keputusan simulasi dan pengukuran dengan cuping utama yang jelas pada satah  $\phi=90^\circ$ . Prestasi gandaan bagi antenna suria lut sinar ini adalah 10.87dBi.



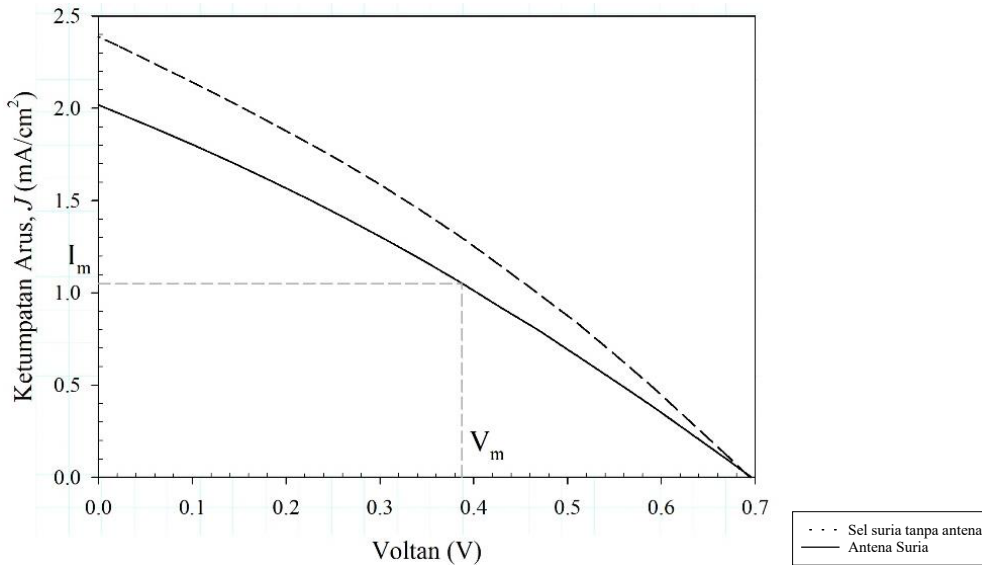
RAJAH 6. Perbandingan corak teradiasi antenna hasil simulasi dan pengukuran

JADUAL 2. Perbandingan keputusan simulasi dan pengukuran

Parameter	Panjang (mm)	
	Simulasi	Pengukuran
$f_r$ (GHz)	14.0	14.085
$S_{11}$ (dB)	-41.630	-22.681
Lebar jalur (MHz)	422.41	107.5

PRESTASI SEL SURIA

Keputusan prestasi elemen sel suria dengan sinaran bagi antenna suria diwakili dengan plot graf lengkung I-V pada Rajah 7. Perincian dimulakan dengan sel suria DSSC tanpa antenna bagi tujuan perbandingan. Kemudian, perincian diteruskan bagi antenna suria.



RAJAH 7. Keputusan prestasi lengkung I-V dengan sinaran

Antena suria ini mempunyai kecekapan,  $\eta$  0.407% bersama nilai faktor pengisian,  $f_F$  29.31%, dengan  $J_{SC}$  2.06 mA/cm<sup>2</sup> dan  $V_{OC}$  0.6733 V. Prestasi ini adalah berada dalam tahap memuaskan, sejajar dengan prestasi sel suria seumpamanya, iaitu yang dihasilkan dengan bahan-bahan asas yang murah dan mudah didapati, tanpa melalui proses inovasi yang kompleks, iaitu sekitar 0.20-0.40% (Al-Alwani et al. 2018; 2017; Hafez, Shenouda, and Fadel

2018; Kabir, Sakib, and Matin 2019; Siddick, Lai, and Juan 2018). Prestasi ini dilihat sedikit menyusut berbanding sel suria DSSC tanpa elemen antenna.

Keputusan keseluruhan pengukuran bagi prestasi sel suria dalam kajian ini dirumuskan dalam Jadual 3. Secara keseluruhannya, antenna suria lut sinar yang dihasilkan adalah memenuhi keperluan kajian dan boleh beroperasi dengan baik.

JADUAL 3. Keputusan prestasi sel suria

Parameter	Sel suria tanpa antenna	Antena suria
$V_{OC}$	0.6733	0.6733
$J_{SC}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	2.4376	2.0616
$J_m$ (mA/cm <sup>2</sup> )	1.2972	1.0497
$V_m$ (V)	0.3875	0.3875
$P_m$ (mW/cm <sup>2</sup> )	0.5027	0.4068
$f_F$	0.3063	0.2931
$\eta$ (%)	0.503	0.407

Kemerosotan prestasi elemen sel suria bagi antenna suria berbanding sel suria tanpa kehadiran antenna adalah telah dijangka disebabkan penambahan lapisan elemen antenna sedikit sebanyak akan mempengaruhi ketelusan sel suria. Walau bagaimanapun, elemen antenna bagi antenna suria bagi kajian ini adalah lut sinar. Ini menjadikan kemerosotan yang berlaku adalah minimal.

Selain daripada faktor kemerosotan sifat elektrolit yang disebabkan oleh penyerapan sinar UV, faktor lain kemerosotan prestasi sel suria dengan kehadiran antenna adalah disebabkan struktur elemen sel suria yang tidak kemas, menjadikan potensi untuk berlakunya kebocoran elektrolit.

Keperluan bagi mengatasi masalah ini telah pun menarik minat ramai dan menjadi bidang kajian yang sedang berkembang dalam bidang inovasi DSSC (Ismail et al. 2020; Kamarulzaman et al. 2020; Mustaffa, Rahman, and Umar 2018; Saidi et al. 2021; Trihutomo et al. 2019).

#### KESIMPULAN

Dalam kajian ini, matlamat utama yang ingin dicapai adalah menghasilkan antenna lut sinar berintegrasi sel suria bagi aplikasi jalur-Ku dengan prestasi optimum bagi kedua-dua elemen antenna dan suria..

Secara ringkasnya, di akhir kajian ini, antenna suria lut sinar bagi aplikasi jalur-Ku berjaya direka dengan gandaan melebihi 10 dBi, manakala prestasi sel suria dengan 0.6733  $V_{OC}$ , 2.06  $J_{SC}$ , diikuti dengan faktor pengisian,  $f_F$  dan kecekapan penukaran kuasa sel suria,  $\eta$  masing-masing 29% dan 0.4%.

#### PENGHARGAAN

Penghargaan diberikan kepada Universiti Kebangsaan Malaysia di atas tajaan di bawah geran DIP-2021-004.

#### PENGISYTIHAN MINAT BERSAING

Tiada.

#### RUJUKAN

Ahmed, Zeeshan, Patrick McEvoy, and Max J. Ammann. 2018. Comparison of grid array and microstrip patch array antennas at 28 GHz. In *2018 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on 5G Hardware and System Technologies, IMWS-5G*. Ireland: IEEE. <https://doi.org/10.1109/IMWS-5G.2018.8484539>.

- Al-Alwani, Mahmoud A.M., Norasikin A. Ludin, Abu Bakar Mohamad, Abd Amir H. Kadhum, and Abduljabbar Mukhlus. 2018. Application of dyes extracted from alternanthera dentata leaves and musa acuminata bracts as natural sensitizers for dye-sensitized solar cells. *Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* 192: 487–98. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2017.11.018>.
- Al-Alwani, Mahmoud A.M., Norasikin A. Ludin, Abu Bakar Mohamad, Abd Amir H. Kadhum, and Kamaruzzaman Sopian. 2017. Extraction, preparation and application of pigments from cordyline fruticosa and hylocereus polyrhizus as sensitizers for dye-sensitized solar cells. *Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* 179: 23–31. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2017.02.026>.
- Ali, N I Mohd, N Misran, and M F Mansor. 2019. Design of transparent microstrip grid array antenna. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science* 15(2): 888–93. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v15.i2.pp888-893>.
- An, Wenxing, Liuyan Hong, Yu Luo, Kaixue Ma, Jianguo Ma, and Xiangdong Huang. 2021. A wideband dual-function solar cell dipole antenna for both energy harvesting and wireless communications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 69 (1): 544–49. <https://doi.org/10.1109/TAP.2020.3005250>.
- Cambero, Eduardo Vicente Valdes, Humberto Pereira Da Paz, Vinicius Santana Da Silva, Humberto Xavier De Araujo, Ivan Roberto Santana Casella, and Carlos Eduardo Capovilla. 2019. A 2.4 GHz rectenna based on a solar cell antenna array. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* 18 (12): 2716–20. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2019.295017>.
- Dadgarpour, Abdolmehdi, Marco A. Antoniades, Abdelrazik Sebak, Ahmed A. Kishk, Milad Sharifi Sorkherizi, and Tayeb A. Denidni. 2020. High-gain 60 GHz linear antenna array loaded with electric and magnetic metamaterial resonators. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 68 (5): 3673–84. <https://doi.org/10.1109/TAP.2020.2964945>.
- Eltresy, Nermeen A., Abd Elhamid M. Abd Elhamid, Dalia M. Elsheakh, Hadia M. Elhennawy, and Esmat A. Abdallah. 2021. Silver sandwiched ITO based transparent antenna array for RF energy harvesting in 5G mid-range of frequencies. *IEEE Access* 9: 49476–86. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3069409>.
- Ghiyasvand, Moharram, Mohammad Naser-Moghadas, Abbas Ali Lotfi-Neyestanak, and Alireza Nikfarjam. 2018. Improving the performance of transparent enclosure using heterogeneous deposition of a gold nanolayer. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* 17 (4): 567–70. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2018.2803113>.

- Hafez, H. S., S. S. Shenouda, and M. Fadel. 2018. Photovoltaic characteristics of natural light harvesting dye sensitized solar cells. *Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* 192: 23–26. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2017.10.066>.
- Haraty, Mohammad Reza, Mohammad Naser-Moghadasi, Abbas Ali Lotfi-Neyestanak, and Alireza Nikfarjam. 2016. Improving the efficiency of transparent antenna using gold nanolayer deposition. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* 15: 4–7. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2015.2424918>.
- Hautcoeur, Julien, Larbi Talbi, Khelifa Hettak, and Mourad Nedil. 2014. 60 GHz optically transparent microstrip antenna made of meshed AuGL material. *IET Microwaves, Antennas & Propagation* 8(13): 1091–96. <https://doi.org/10.1049/iet-map.2013.0564>.
- Henze, Norbert, Andre Giere, H. Fruchting, and Pascal Hofmann. 2003. GPS patch antenna with photovoltaic solar cells for vehicular applications. *2003 IEEE 58th Vehicular Technology Conference. VTC 2003-Fall (IEEE Cat. No.03CH37484)* 1: 50–54. <https://doi.org/10.1109/VETECEP.2003.1284976>.
- Hong, Seungman, Seok Hyon Kang, Youngsung Kim, and Chang Won Jung. 2016a. Transparent and flexible antenna for wearable glasses applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 64 (7): 2797–2804. <https://doi.org/10.1109/TAP.2016.2554626>.
- . 2016b. Transparent and flexible antenna for wearable glasses applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 64(7): 2797–2804. <https://doi.org/10.1109/TAP.2016.2554626>.
- Hong, Seungman, Youngsung Kim, and Chang Won Jung. 2017. Transparent microstrip patch antennas with multilayer and metal-mesh films. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* 16: 772–75. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2016.2602389>.
- Ismail, Mashasriyah, Norasikin Ahmad Ludin, Norul Hisham Hamid, Mahmoud A.M. Al-Alwani, Norani Muti Muhamed, Suhaila Sepeai, Mohd Adib Ibrahim, and Mohd Asri Mat Teridi. 2020. Electrochemical properties of natural sensitizer from garcinia mangostana and archidendron pauciflorum pericarps for Dye-Sensitized Solar Cell (DSSC) application. *Sains Malaysiana* 49 (12): 3007–15. <https://doi.org/10.17576/jsm-2020-4912-12>.
- Jamalullail, N., I. Smohamad, M. Nnorizan, and N. Mahmed. 2018. Enhancement of energy conversion efficiency for dye sensitized solar cell using zinc oxide photoanode. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 374. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/374/1/012048>.
- Jiang, Dai Wei, Ying Song Zhang, Hao Zhang, and Jun Jin. 2012. A novel broadband reflect-array antenna with rectangle ring element for ku-band application. *IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Millimeter Wave Wireless Technology and Applications, IMWS 2012 - Proceeding*, 113–16. <https://doi.org/10.1109/IMWS2.2012.6338224>.
- Jizat, N. M., S. K.A. Rahim, Y. C. Lo, and M. M. Mansor. 2015. Compact size of CPW dual-band meander-line transparent antenna for WLAN applications. In *2014 IEEE Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics, APACE*, 20–22. Johor Bahru, Malaysia: IEEE. <https://doi.org/10.1109/APACE.2014.7043779>.
- Kabir, Fahmid, Syed Nazmus Sakib, and Nafisa Matin. 2019. Stability study of natural green dye based DSSC. *Optik* 181: 458–64. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.12.077>.
- Kamarulzaman, U. A., M. Y.A. Rahman, M. S. Su'ait, and A. A. Umar. 2020. Effect of annealing treatment on multilayer TiO<sub>2</sub> films on the performance of dye-sensitized solar cells. *Optik* 218(March): 164976. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.164976>.
- . 2021. NickelPalladium alloy–reduced graphene oxide as counter electrode for dye-sensitized solar cells. *Journal of Molecular Liquids* 326: 115289. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.115289>.
- Kang, Seok Hyon, and Chang Won Jung. 2018. Transparent patch antenna using metal mesh. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 66(4): 2095–2100. <https://doi.org/10.1109/TAP.2018.2804622>.
- Kawano, Toru, and Hisamatsu Nakano. 2017. A diamond-shaped grid array antenna printed on a dielectric substrate. *2017 IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications, APWC 2017* 2017-Janua: 105–7. <https://doi.org/10.1109/APWC.2017.8062253>.
- . 2019. An Unbalanced-feed grid array antenna composed of diamond-shaped elements printed on a dielectric substrate. In *2019 IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC)*, 119–20. Granada, Spain: IEEE.
- Li, Long, Pei Zhang, Fangjie Cheng, Mingyang Chang, and Tie Jun Cui. 2021. An optically transparent near-field focusing metasurface. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 69(4): 2015–27. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2021.306147>.
- Lim, E H, K W Leung, C C Su, and H Y Wong. 2010. Green antenna for solar energy collection. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* 9: 689–92. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2010.205581>.
- Mohd Ali, Nur Izzati binti, Mohd Fais bin Mansor, Norbahiah binti Misran, Mohd Faizal bin Jamlos, and Radial Anwar. 2020. Perkembangan teknologi antena solar : Satu tinjauan. *Jurnal Kejuruteraan* 32(3): 17–24.
- Muhamad, W.A.W., R. Ngah, M.F. Jamlos, P. J. Soh, and H. Lago. 2016. Gain enhancement of microstrip grid array antenna for 5G applications. *2016 URSI Asia-Pacific Radio Science Conference*, 1827–29.
- Mustaffa, N., M. Y.A. Rahman, and A. A. Umar. 2018.



- Dye-sensitized solar cell utilizing silver-reduced graphene oxide film counter electrode: Effect of silver content on its performance. *Ionics* 24(11): 3665–71. <https://doi.org/10.1007/s11581-018-2524-4>.
- Nakano, Hisamatsu. 2016. Linearly polarized rhombic grid array antenna. In *Low-Profile Natural and Metamaterial Antennas: Analysis Methods and Applications*, 1st ed., 175–84. Wiley-IEEE Press. <https://doi.org/10.1002/9781118859704.ch14>.
- Nakano, Hisamatsu, Yasushi Iitsuka, and Junji Yamauchi. 2013. Rhombic grid array antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 61 (5): 2482–89. <https://doi.org/10.1109/TAP.2013.2242822>.
- Pandit, Soumen, Akhilesh Mohan, and Priyadip Ray. 2017. A low-profile high-gain substrate-integrated waveguide-slot antenna with suppressed cross polarization using metamaterial. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* 16: 1614–17. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2017.265426>.
- Peter, Thomas, Tharek Abd Rahman, S. W. Cheung, Rajagopal Nilavalan, Hattan F. Abutarboush, and Antonio Vilches. 2014. A novel transparent UWB antenna for photovoltaic solar panel integration and RF energy harvesting. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 62(4): 1844–53. <https://doi.org/10.1109/TAP.2014.2298044>.
- Peter, Thomas, T I Yuk, R Nilavalan, and S W Cheung. 2011. A novel technique to improve gain in transparent UWB antennas. In *2011 Loughborough Antennas & Propagation Conference*, 1–4. Loughborough, UK: IEEE. <https://doi.org/10.1109/LAPC.2011.6114156>.
- Rabbani, M. S., and H. Ghafouri-Shiraz. 2017. Evaluation of gain enhancement in large microstrip antenna arrays for Mm-wave applications. *IET Seminar Digest* 2017 (2): 3–7. <https://doi.org/10.1049/ic.2017.0001>.
- Rabbani, Muhammad Saqib, and Hooshang Ghafouri-Shiraz. 2017. Liquid crystalline polymer substrate-based THz microstrip antenna arrays for medical applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* 16: 1533–36. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2017.2647825>.
- Rabie, Mostafa M, Hadia El-Henawy, Fatma El-Hefnawy, and Fawzy Ibrahim. 2018. Meshed conductor and meshed substrate GPS L1 band microstrip antenna for cubesat applications. In *National Radio Science Conference, NRSC*, 55–62. Cairo, Egypt: IEEE. <https://doi.org/10.1109/NRSC.2018.8354359>.
- Roo-Ons, M.J., S.V. Shynu, M.J. Ammann, S.J. McCormack, and B. Norton. 2011. Transparent patch antenna on A-Si thin-film glass solar module. *Electronics Letters* 47 (2): 85–86. <https://doi.org/10.1049/el.2010.7397>.
- Roo-Ons, M.J., S.V. Shynu, M. Seredynski, M.J. Ammann, S.J. McCormack, and B. Norton. 2010. Influence of solar heating on the performance of integrated solar cell microstrip patch antennas. *Solar Energy* 84 (9): 1619–27. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.06.007>.
- Saidi, Norshahirah Mohamad, N. K. Farhana, S. Ramesh, and K. Ramesh. 2021. Influence of different concentrations of 4-Tert-Butyl-pyridine in a gel polymer electrolyte towards improved performance of Dye-Sensitized Solar Cells (DSSC). *Solar Energy* 216 (October 2020): 111–19. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.12.058>.
- Shynu, S.V., M.J.R. Ons, G. Ruvio, M.J. Ammann, S. McCormack, and B. Norton. 2008. A microstrip printed dipole solar antenna using polycrystalline silicon solar cells. In *2008 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, 1–4. USA: IEEE. <https://doi.org/10.1109/APS.2008.4619048>.
- Shynu, S.V., Maria J. Roo Ons, Max J Ammann, Sarah Gallagher, and Brian Norton. 2007. Inset-fed microstrip patch antenna with integrated polycrystalline photovoltaic solar cell. In *The Second European Conference on Antennas and Propagation EuCAP 2007.*, 1–4. Edinburgh, UK: IET. <https://doi.org/10.1049/ic.2007.1373>.
- Shynu, S V, Maria Jose, Roo Ons, Patrick Mcevoy, Max J Ammann, Sarah J McCormack, and Brian Norton. 2009. Integration of microstrip patch antenna with polycrystalline silicon solar cell. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 57 (12): 3969–72.
- Siddick, Siti Zubaidah, Chin Wei Lai, and Joon Ching Juan. 2018. An investigation of the dye-sensitized solar cell performance using Graphene-Titania (TrGO) photoanode with conventional dye and natural green chlorophyll dye. *Materials Science in Semiconductor Processing* 74 (July 2017): 267–76. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2017.10.046>.
- Sun, Kepei, Sanghyun Han, Jun H. Choi, and Jay Kyoong Lee. 2018. Miniaturized active metamaterial resonant antenna with improved radiation performance based on negative-resistance-enhanced CRLH transmission lines. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* 17 (7): 1162–65. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2018.2836803>.
- Sun, Mei, and Yue Ping Zhang. 2016. Grid antenna arrays. In *Handbook of Antenna Technologies*, edited by Zhi Ning Chen, 747–50. Singapore: Springer, Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-4560-44-3>.
- Trihutomo, Prihanto, Sudjito Soeparman, Denny Widhiyanuriyawan, and Lilis Yuliati. 2019. Performance Improvement of Dye-Sensitized Solar Cell- (DSSC-) based natural dyes by clathrin protein. *International Journal of Photoenergy* 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/4384728>.
- Turpin, T.W., and R. Baktur. 2009. Meshed patch antennas integrated on solar cells. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* 8: 693–96. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2009.2025522>.

- Xi, Baoliang, Xianling Liang, Senior Member, Qian Chen, and Kun Wang. 2020. Optical transparent antenna array integrated with solar cell. *IEEE ANTENNAS AND WIRELESS PROPAGATION LETTERS* 19 (3): 457–61. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2020.2969694>.
- Yem, Vu Van, and Nguyen Ngoc Lan. 2018. Gain and bandwidth enhancement of array antenna using novel metamaterial structure. *Journal of Communications* 13(3): 101–7. <https://doi.org/10.12720/jcm.13.3.101-107>.
- Yurduseven, Okan, David Smith, and Michael Elsdon. 2014. A transparent meshed solar monopole antenna for UWB applications. *The 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2014)*, April, 2145–49. <https://doi.org/10.1109/EuCAP.2014.6902233>.
- Yurduseven, Okan, David Smith, Nicola Pearsall, and Ian Forbes. 2012. Design of a highly efficient wideband suspended solar array antenna. *Proceedings of the 2012 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation*, no. 1 (July): 1–2. <https://doi.org/10.1109/APS.2012.6348555>.
- Zarbaksh, Saman, Mohammad Akbari, Mohammadmahdi Farahani, Alireza Ghayekhloo, Tayeb A. Denidni, and Abdel Razik Sebak. 2020. Optically transparent subarray antenna based on solar panel for CubeSat application. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 68 (1): 319–28. <https://doi.org/10.1109/TAP.2019.2938740>.
- Zhai, Guohua, Xi Wang, Rensheng Xie, Jin Shi, Jianjun Gao, Bo Shi, and Jun Ding. 2019. Gain-enhanced planar log-periodic dipole array antenna using nonresonant metamaterial. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 67 (9): 1693–6198. <https://doi.org/10.1109/TAP.2019.2924111>.
- Zhang, Bing, and Yue Ping Zhang. 2012. Grid array antennas with subarrays and multiple feeds for 60-GHz radios. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 60 (5): 2270–75. <https://doi.org/10.1109/TAP.2012.2189733>.
- Zhang, Zheng, Bowen Bai, Xiaoping Li, Yanming Liu, Chao Sun, and Yanchao Zhang. 2020. Integration of circularly polarized microstrip slot array antenna with amorphous silicon solar cells. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* 19 (12): 2320–23. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2020.3031608>.
- Zihao, Chen, and Zhang Yueping. 2017. Comparison between microstrip grid array antenna and patch array antenna. *IEEE Region 10 Annual International Conference, Proceedings/TENCON*, 3359–62. <https://doi.org/10.1109/TENCON.2016.7848675>.