



JITE (Journal of Informatics and Telecommunication Engineering)

Available online <http://ojs.uma.ac.id/index.php/jite> DOI : 10.31289/jite.v6i1.7271

Received: 19 May 2022

Accepted: 27 June 2022

Published: 21 July 2022

Hybrid RF-Energy Harvester for IoT Smart Device Applications Low Power Consumption

Nurfitri1)*, Elyas Palantei2) & Intan Sari Areni2)

1)Teknik Informatika, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sorong, Indonesia

2) Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, Indonesia

*Corresponding Email: nurfitri3003@gmail.com

Abstrak

Kemandirian energi dan long battery lifetime merupakan visi teknologi 5G salah satunya untuk perangkat cerdas IoT. Fokus terhadap tantangan pada visi teknologi ini maka solusi efisien dari sistem ini dengan memanen sumber energi yang ada disekitarnya sebagai backup atau menghilangkan penggunaan baterai. Output dari metode hybrid energy harvester sebagai salah satu solusi dari kemandirian energi menggunakan gelombang frekuensi radio (RF) telah dioptimasi pada penelitian ini. Antena mikrostrip patch double-T berbasis metamaterial CSRR sebagai pemanen energi RF bekerja pada frekuensi ISM band 2.45 GHz memiliki nilai return loss, gain dan bandwidth yang sudah sesuai untuk konsep sistem RF-Energy harvester. Antena ini mampu menyerap energi menggunakan rangkaian konverter DC pada jarak terdekat maksimum sebesar 6.79 V menggunakan 2 buah access point pada posisi antena pemancar saling berhadapan satu sama lain dengan efisiensi konversi 6.68%. Salah satu metode untuk memaksimalkan output energy harvester juga dilakukan pada penelitian ini dengan melakukan hybrid dengan mini solar cell, yang mampu menyuplai tegangan secara konstant dan dapat melakukan charging terhadap beban berupa handphone. Sistem hybrid RF-Energy harvester yang dirancang pada penelitian ini sudah dapat menyuplai sumber energi pada perangkat cerdas dengan kebutuhan daya kecil.

Kata Kunci: Energy harvester, gelombang Radio Frequency (RF), Antena Mikrostrip, ISM Band, Metamaterial, CSRR, Solar cell.

Abstract

Energy independence and long battery lifetime, the vision of 5G technology is one of them for IoT smart devices. Focusing on the challenges in this technological vision, the solution for this system is to harvest the energy sources around it as a backup or eliminate the use of batteries. The output of the hybrid energy harvester method as a solution to energy independence using radio frequency (RF) waves has been optimized in this study. The double-T patch microstrip antenna based on CSRR metamaterial as an RF energy harvester works at the ISM band frequency of 2.45 GHz and has return loss, gain and bandwidth values that are in accordance with the concept of the RF-Energy harvester system. This antenna is capable of absorbing energy using a DC converter circuit at a maximum distance of 6.79 V using 2 access points at the position of the transmitting antenna facing each other with a conversion efficiency of 6.68%. One method to maximize the output of the energy harvester is also carried out in this study by doing a hybrid with a mini solar cell, which is able to carry out constant voltage and can charge the load in the form of a cellphone. The hybrid RF-Energy harvester system designed in this research can be used as a source of energy in smart devices with small power requirements.

Keywords: Energy harvester, Radio Frequency (RF), Microstrip Antenna, ISM Band, Metamaterial, CSRR, Solar cell.

How to Cite: Nurfitri, N., Palantei, E., & Areni, I. S. (2022). Hybrid RF-Energy Harvester For IoT Smart Device Applications Low Power Consumption. JITE (Journal of Informatics and Telecommunication Engineering), 6(1), 135 - 147.

I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi 5G ke depannya khususnya di Indonesia telah gencar dilakukan oleh banyak peneliti. Salah satu fokus penelitian yakni pada monitoring dan *control* aplikasi/*device* yang saling terhubung satu sama lain dalam skala besar misalnya pada bidang kesehatan, pertanian, keamanan dan lainnya yang berkembang dari konvergensi teknologi nirkabel, kemampuan sensing dan peningkatan protokol komunikasi antar objek yang merupakan bentuk paradigma dari *Internet of Things* (IoT) (Sri Wiwoho Mudjanarko, 2017).

IoT merupakan faktor utama menuju revolusi industri 4.0 yang diluncurkan Presiden Joko Widodo pada 4 April 2018 dimana teknologi ini berpengaruh dalam berbagai macam industri seperti manufaktur, logistik, kesehatan, tata kota, rumah, pertanian, bahkan industri otomotif (Rauf, 2018). Ada beberapa tantangan dari teknologi IoT ini yakni keamanan, *Quality of Service*, media transmisi dan konsumsi energi (Laith Farhan, 2018) (Kehinde Lawal, 2022) (Shashi Rekha, 2021). Fokus terhadap tantangan konsumsi energi, merujuk pada visi teknologi 5G yakni *long battery lifetime* maka solusi efisien dari sistem ini dengan memanen sumber energi yang ada disekitarnya sebagai backup atau menghilangkan penggunaan baterai. Pemanenan energi ini biasa dikenal dengan *energy harvesting*. Beberapa penelitian telah dilakukan dengan menggunakan sumber energi dari lingkungan telah dirangkum (Long Liu, 2021) seperti energi solar, energi angin, energi potensial dari hujan, energi vibrasi, energi thermal dan lainnya. Namun pada penelitian ini sumber energi yang dimanfaatkan yakni frekuensi radio/sinyal elektromagnetik dimana ketersediaan sinyal elektromagnetik yang bersifat kontinu dan melimpah seperti pada sinyal antenna TV, radio AM/FM, Wi-Fi, BTS atau pada handphone/mobile phone. Metode *energy harvesting* ini juga telah peneliti lakukan dengan menggunakan PIN-Diode (menambah pita kerja antenna) sehingga memaksimalkan output harvester dan menyaring pita frekuensi yang diinginkan (Nurfitri, 2019). Beberapa penelitian lainnya juga menggunakan metode ini telah dirangkum (Sleebi K. Divakaran, 2018) (Maryam Eshaghi, 2020) (M. Shafiqur Rahman, 2020). Tantangan dalam perancangan sistem *energy harvesting* menggunakan frekuensi radio, rangkaian penyearah, dan *matching network* menjadi topik pada penelitian tersebut.

Pada penelitian sebelumnya (Nurfitri, 2019) menggunakan antenna mikrostrip dengan struktur metamaterial SRR dan CSRR pada *ground plane* dapat mereduksi ukuran 72.25% dari antenna konvensional. Selain itu, pada (Vinnakota Sarath Sangkar, 2018) melakukan *energy harvesting* menggunakan antenna mikrostrip metamaterial dengan topologi penyearah seperdua gelombang dapat melakukan efisiensi daya sebesar 80%. Antena mikrostrip berbasis metamaterial CSRR diusulkan pada penelitian ini dimana struktur metamaterial dapat mereduksi ukuran antenna dari antenna konvensional, meningkatkan bandwidth dan gain dari antenna tersebut. Pada (Woosol Lee, 2021) terdapat tiga layer untuk sistem *energy harvesting* yang diusulkan yang terdiri dari 4x4 array metamaterial pada layer pertama, antenna mikrostrip pada layer kedua, dan sistem penyearah pada layer ketiga. Antena juga bekerja pada frekuensi 2.4GHz. Sistem ini dipabrikan menggunakan substrat patch jenis R05880. Hasil efisiensi konversi output DC yang didapatkan maksimal 78.9%.

Berdasarkan data dari 89 stasiun pengamatan BMKG, normal suhu udara periode 1981-2010 di Indonesia adalah sebesar 26.6°C dan suhu udara rata-rata tahun 2021 adalah sebesar 27.0°C (BMKG, 2021). Hal ini menjadi potensi yang bagus sebagai solusi sumber pemanen energi alternatif lainnya yang tidak bersifat polutif, berlimpah, terbarukan dan merupakan energi sepanjang masa. Sehingga, selain menggunakan metode antenna mikrostrip peneliti juga memanfaatkan panas matahari sebagai *energy harvester* menggunakan solar cell.

Dengan dua sumber energi yang potensial ini, penulis melakukan hybrid terhadap kedua sumber tersebut dengan pemanen energi sinyal elektromagnetik menggunakan teknologi metamaterial dan solar cell. Penelitian sebelumnya telah dilakukan dengan sumber yang sama yakni antenna mikrostrip dan solar cell (Irfan Mujahidin, 2021) (Muhammad Hamza, 2021) dengan ukuran antenna yang *compact* dan dapat bekerja pada perangkat IoT. Dengan konsep yang sama namun dengan jenis antenna mikrostrip yang berbeda, merujuk pada tujuan desain antenna dan untuk pengaplikasiannya pada perangkat cerdas konsumsi daya rendah maka diusulkan suatu sistem *Hybrid RF-Energy harvester* berbasis antenna metamaterial CSRR yang diharapkan mampu menjadi sumber energi pengganti baterai atau backup untuk perangkat konsumsi daya rendah itu sendiri.

II. STUDI PUSTAKA

A. Antena Mikrostrip

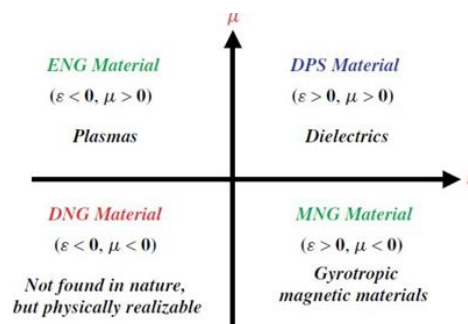
Antena merupakan sebuah alat yang digunakan untuk mengirim dan menerima gelombang elektromagnetik di ruang bebas (Balanis, 1997). Dari semua jenis antena, antena mikrostrip telah menjadi antena dengan banyak variasi pada metode pencatutan, bentuk dan arsitekturnya. Konsep radiator mikrostrip pertama kali diajukan oleh Deschamps di tahun 1953. Antena mikrostrip dapat diartikan sebagai sebuah struktur yang memiliki patch konduktif yang tercetak di atas substrat microwave yang memiliki ground tercetak di bawahnya. Teknologi antena mikrostrip berkembang karena keuntungan-keuntungan yang dimiliki khususnya strukturnya yang *low profile*.

Strukturnya kompak dan menarik yang ringan, volume yang kecil dan konfigurasi yang tipis. Jenis antena ini dapat disesuaikan ke bentuk permukaan manapun. Hal ini membuat antena mikrostrip cocok digunakan untuk aplikasi nirkabel (Eva Yovita Dwi Utami, 2017) dikarenakan kemampuannya dipasang ke tubuh dari perangkat apapun tanpa mengorbankan nilai estetikanya. Antena mikrostrip terdiri dari tiga lapisan. Lapisan tersebut adalah *conducting patch*, substrat dielektrik, dan bidang ground.

B. Metamaterial

Metamaterial merupakan media/bahan yang dirancang (artifisial) untuk memiliki karakteristik permeabilitas dan/atau permitivitas negatif (Catharina Ira Dian Anggitaratna, 2021). Untuk metamaterial dengan permitivitas dan permeabilitas negatif, beberapa sebutan telah diajukan meskipun pada dasarnya mendefinisikan hal yang sama, antara lain, “left-handed” media (LHM), media dengan negative refractive index (NRI), “backward-wave” media (BW media), dan “double-negative” (DNG) metamaterial, sedangkan untuk permitivitas atau permeabilitas saja yang negatif biasa disebut “single negative material” (SNG).

Gambar 1. memperlihatkan klasifikasi material dalam kuadran ϵ (sumbu x) dan μ (sumbu y). Kuadran 1 merupakan daerah bahan dielektrik yang sering dijumpai dengan ϵ dan μ positif. Material plasma untuk frekuensi tertentu memiliki karakteristik $\epsilon < 0$ dan $\mu > 0$ sehingga termasuk di kuadran 2. Begitu juga dengan material di kuadran 4 ($\epsilon > 0$, $\mu < 0$) yang sangat jarang ditemui kecuali material gyrotropic yang memiliki sifat ini untuk frekuensi tertentu. Dan untuk kuadran 3 dengan ϵ dan μ negatif sampai saat ini belum ditemukan di alam. Namun demikian sifat ϵ dan μ negative dapat diperoleh dengan merekayasa struktur dari material yang sudah ada.

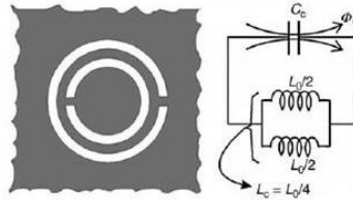


Gambar 1. Klasifikasi material berdasarkan ϵ dan μ (Jelinek, 2007)

C. CSRR (Complementary Split Ring Resonator)

CSRR menghasilkan medium dengan permitivitas negatif dan *left-handed* (Jingwei Zhang, 2021). CSRR merupakan elemen komplementer dari *Split-Ring Resonator* (SRR) di mana jika SRR dibangkitkan oleh medan magnetik maka sebaliknya CSRR akan dibangkitkan oleh medan listrik yang timbul ketika arus mengalir melalui saluran transmisi (host line) yang berada di atasnya. Dan dikarenakan sifat dualitas dari keduanya, pada kondisi ideal, karakteristik dan sifat elektromagnetik serta model rangkaiannya hampir sama. Yang membedakan hanya dari faktor L dan C yang saling berkebalikan ketika dimasukkan dalam rangkaian ekuivalen dan persamaan parameternya.

CSRR dibentuk dari dua ring slot yang masing-masing “dipotong” oleh tembaga pada ujung-ujung yang berseberangan, dan di antara kedua ring slot terdapat sebuah strip tembaga (lihat Gambar 2). CSRR dicetak di bidang ground atau pada strip konduktor (jika memiliki cukup ruang). Desain dari CSRR ini mampu menghasilkan dipol listrik yang kuat pada frekuensi resonansinya, dan juga memiliki dimensi yang kecil, sehingga sangat baik untuk rancangan metamaterial. Adapun untuk mendapatkan dimensi dari CSRR ini, formula yang digunakan masih belum ada. Sehingga pada saat perancangan pada penelitian ini merujuk pada formula dimensi SRR. Dimensi SRR yang didapatkan kemudian dilakukan optimasi sehingga menjadi struktur CSRR yang dapat bekerja pada frekuensi yang diinginkan.



Gambar 2. CSRR dan rangkaian ekuivalen (Marquez, 2008)

Untuk menghitung dimensi dari struktur SRR seperti dibawah ini (Chaturvedi & Raghavan, 2018):

$$L_{SRR} = \frac{\mu_0 l_{savg}}{2} \frac{4.86}{4} \left[\ln \frac{0.98}{\rho} + 1.84\rho \right] \quad (1)$$

$$\rho = \frac{(N-1)(d+g_3)}{l_{ring} - (N-1)(d+g_3)} \quad (2)$$

$$C_{SRR} = \frac{N-1}{2[2l_{ring} - (2N-1)(d+g_3)]} C_0 \quad (3)$$

$$C_0 = \epsilon_{r0} \epsilon_r(h, d, g_3) \frac{K \cdot \sqrt{1-k_1^2}}{K \cdot k_1} \quad (4)$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_{SRR} C_{SRR}}} \quad (5)$$

Dimana μ_0 nilai permeabilitas udara bebas ($4\pi \times 10^{-7}$), sehingga

$$l_{savg} = 4[l_{ring} - (N-1)(d+g_3)] \quad (6)$$

dan

$$k_1 = \left[\frac{(g_3/2)}{((d+g_3/2))} \right] \quad (7)$$

Kemudian, N adalah jumlah cincin, d adalah lebar cincin, l_{ring} adalah panjang dari cincin bagian dalam, g_3 adalah jarak spasi antara cincin, ϵ_0 adalah nilai dielektri konstan dari udara, dan k_1 adalah nilai integral eliptik.

D. Solar Cell

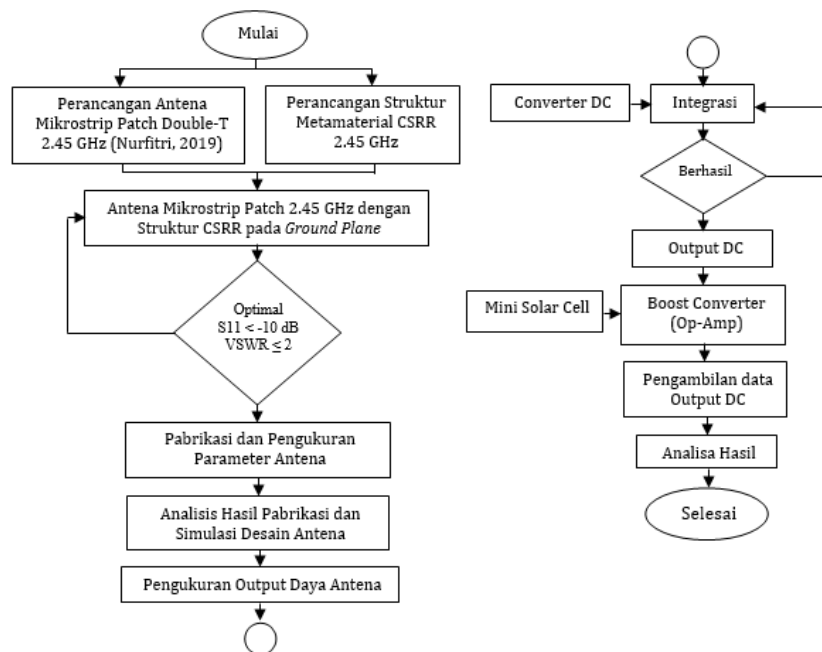
Solar cell merupakan komponen semikonduktor yang dapat menghasilkan listrik arus searah (DC) dengan memanfaatkan energi matahari. Ketika solar cell menerima foton dari suatu sumber cahaya, maka elektron akan terlepas dari struktur atomnya. Elektron yang terlepas menjadi bebas bergerak di dalam bidang kristal sehingga terjadilah arus. Elektron adalah partikel sub atom yang bermuatan negatif, sehingga silikon paduan dalam hal ini disebut sebagai semikonduktor jenis N (negatif) (Faisal Irsan Pasaribu, 2021).

Secara umum struktur sel surya terdiri dari beberapa lapisan tipis yaitu lapisan elektroda belakang (back contact), lapisan absorber tipe-p, lapisan transparan tipe-n dan lapisan elektroda

depan (front-contact). Cara kerja sel surya sendiri sebenarnya dentik dengan piranti semikonduktor diode. Ketika cahaya bersentuhan dengan sel surya dan diserap oleh bahan semikonduktor terjadi pelepasan elektron. Apabila elektron tersebut bisa menempuh perjalanan menuju bahan semikonduktor pada lapisan yang berbeda, terjadi perubahan sigma gaya-gaya pada bahan. Gaya tolakan antar bahan semikonduktor menyebabkan aliran medan listrik dan menyebabkan elektron dapat disalurkan ke saluran awal dan akhir untuk digunakan pada perabot listrik. Pada penelitian ini digunakan mini solar cell dengan tegangan maksimal 5V dan arus 60mA.

III. METODE PENELITIAN

Berdasarkan tujuan penelitian yakni melakukan optimalisasi antenna mikrostrip untuk energy harvester berbasis metamaterial agar dapat bekerja pada frekuensi 2.45 GHz serta merancang suatu sistem hybrid RF harvester dengan output maksimal, maka pada bagian ini dijelaskan metode yang digunakan untuk masing-masing tujuan tersebut baik pada tahap perancangan simulasi maupun proses pengambilan data yang dilakukan.



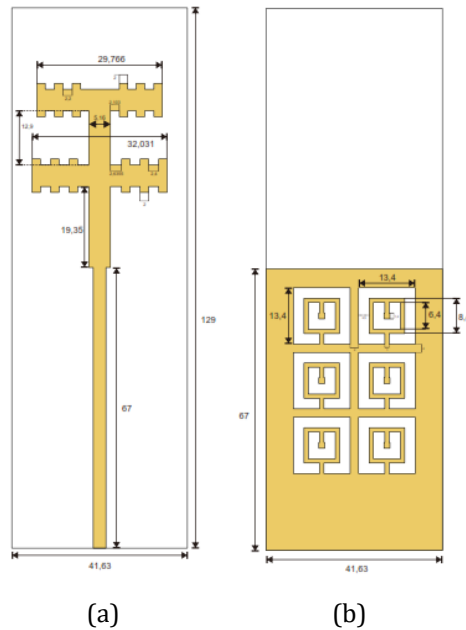
Gambar 3. Flowchart Penelitian

A. Perancangan Antena Mikrostrip Patch Double-T dengan Berbasis Metamaterial CSRR

Pada bagian ini, dilakukan simulasi integrasi antenna konvensional dengan struktur metamaterial CSRR menggunakan desain antenna dan metamaterial yang telah penulis teliti sebelumnya. Perancangan integrasi kedua rancangan ini disimulasikan menggunakan software CST Microwave Studio 2018. Parameter antenna yang diusulkan yakni frekuensi kerja dari antenna berada pada pita frekuensi ISM Band 2.45 GHz, impedansi input 50Ω , bahan dielektrik FR-4 Epoxy yang memiliki $\epsilon_r = 4.5$ sedangkan untuk patch dan ground plane menggunakan Copper (*pure*). Bahan substrat dielektrik yang digunakan memiliki ketebalan 1.6 mm. Tebal material copper pada bagian patch dan ground plant adalah 0.035 mm.

Berdasarkan hasil simulasi dari rancangan antenna dan struktur metamaterial CSRR yang telah dioptimasi, maka pada bagian ini dilakukan integrasi antenna mikrostrip patch double-T dengan struktur metamaterial CSRR. Bagian metamaterial CSRR ditempatkan pada bagian ground antenna mikrostrip. Namun, pada beberapa proses simulasi parameter unjuk kerja antenna yang dihasilkan kurang baik. Frekuensi kerja antenna yang didapat hanya beroperasi pada rentang frekuensi 900 MHz. Selanjutnya, desain kemudian dimodifikasi dan dioptimasi sedemikian rupa sehingga didapatkan desain akhir seperti pada Gambar 4 dengan penambahan sisi bergerigi pada bagian patch.

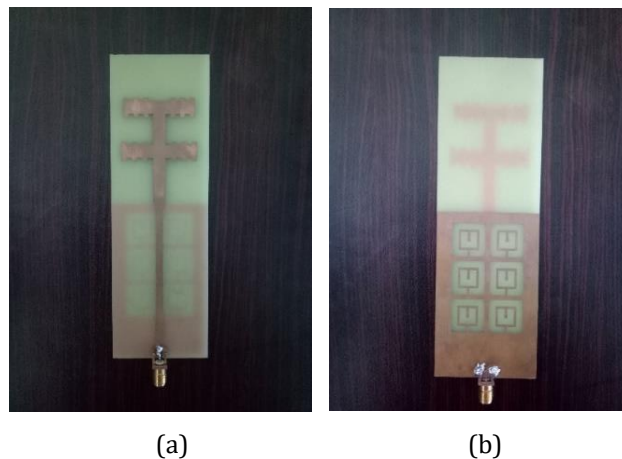
Jumlah unit struktur CSRR pada penelitian ini sebanyak 6 unit. Penempatan 6 unit struktur CSRR ini dipilih karena performansi parameter yang didapatkan yang paling maksimal.



Gambar 4. Antena metamaterial mikrostrip patch double-T
(a) Tampak depan, (b) Tampak belakang

B. Pabrikasi Antena Mikrostrip Patch Double-T dengan Berbasis Metamaterial CSRR dan Pengukuran Performansi

Setelah dilakukan simulasi terhadap performansi antena yang diusulkan, maka selanjutnya dilakukan pabrikasi desain antena dengan ukuran dan karakteristik bahan substrat yang sama yakni FR-4 Epoxy. Adapun parameter antena yang diukur yakni S_{11} , VSWR, pola radiasi dan tampilan nilai daya output dari antenna menggunakan *Cable and Antenna Analyzer*, *AVG Power Sensor*, *Anechoic Chamber* dan multimeter.



Gambar 5. Hasil pabrikasi antena metamaterial mikrostrip patch double-T
(a) Tampak depan, (b) Tampak belakang

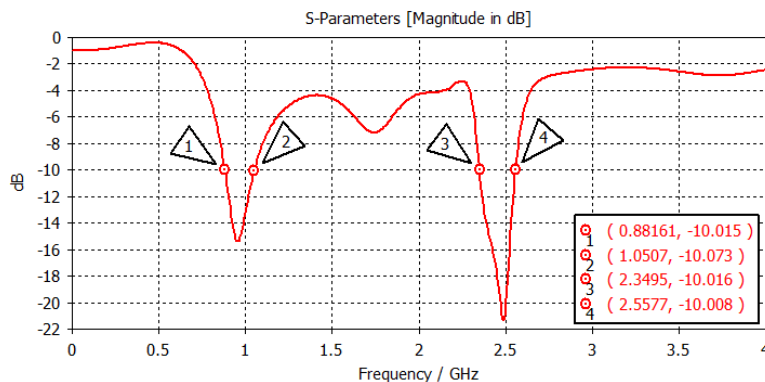
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Parameter antenna seperti gain, pola radiasi, bandwidth memenuhi untuk sistem RF-Energy harvester. Syarat yang penting pada suatu sistem RF-Energy harvester yakni ukuran yang compact, mudah diintegrasikan, portable dan lainnya. Syarat lainnya yakni gain yang tinggi sehingga dapat menyerap gelombang elektromagnetik dengan maksimal dan efisiensi antenna yang tinggi (Divakaran, 2017). Setelah proses simulasi dan fabrikasi antenna mikrostrip patch double-T berbasis metamaterial CSRR, maka perlu dilakukan pengujian untuk menilai parameter performansi perancangan suatu antenna. Dalam tahap pengujian antenna ini, digunakan batasan parameter sesuai dengan parameter pada saat proses perancangan atau simulasi menggunakan software CST Microwave Studio 2018 antara lain, return loss (S_{11}), Voltage Standing Wave Ratio (VSWR), Pola radiasi 2D (plot polar), gain dan efisiensi antenna.

Antenna mikrostrip patch yang difabrikasi perlu dilakukan validasi terhadap simulasi yang telah dilakukan untuk melihat performansi antenna pada parameter-parameter pengukuran yang telah ditentukan dimana pengukuran dilakukan pada ruangan dengan asumsi kondisi semua peralatan listrik dalam keadaan off karena keterbatasan ruangan yang ideal. Oleh karena itu, perlu adanya analisis parameter mulai dari tahap perancangan desain antenna konvensional dan optimasi hingga analisis hasil pengujian prototipe sistem RF-energy harvester.

A. Analisa Hasil Simulasi Antena Mikrostrip Patch Double-T Berbasis Metamaterial CSRR

Adapun total dimensi antenna setelah dilakukan optimasi yakni 41.63 mm x 129 mm x 1.6 mm. Jika dibandingkan dengan desain antenna konvensional penelitian sebelumnya (Nurfritri, 2019), maka terjadi penurunan ukuran antenna berbasis metamaterial CSRR sebesar 72.25% (Tabel 1). Parameter antenna yang dianalisis pada bagian ini yakni *return loss* (S_{11}), *Voltage Standing Wave Ratio* (VSWR), Pola radiasi 2D, serta gain.



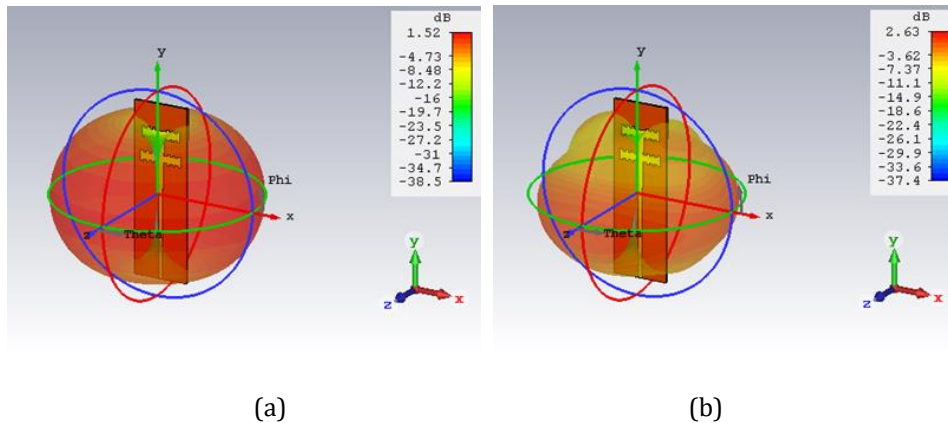
Gambar 6. Grafik nilai *return loss* (S_{11}) antenna Mikrostrip Patch Double-T Berbasis Metamaterial CSRR

Tabel 1. Perbandingan Dimensi Antena Konvensional dan Antena yang Diusulkan

	Antena Konvensional	Antena yang Diusulkan
Panjang	193.5 mm	41.63 mm
Lebar	129 mm	129 mm
Tebal Substrat	1.6 mm	1.6 mm

Dari Gambar 6 diatas menunjukkan bahwa antenna bekerja lebih dari satu frekuensi (multiband) yakni pada 900 MHz dan 2.45 GHz. Pada frekuensi 900 MHz antenna beresonansi pada frekuensi 0.88161 GHz sampai 1.0507 GHz dengan nilai S_{11} -11.68 dB. Sedangkan untuk frekuensi kerja antenna pada 2.4 GHz beresonansi pada frekuensi 2.3495 GHz sampai 2.5577 GHz dengan nilai S_{11} -17.72 dB.. Adapun bandwidth antenna yang didapatkan untuk kedua frekuensi masing-masing BW_{900MHz} sebesar 169.1 MHz

dan $BW_{2.4\text{GHz}}$ sebesar 208.2 MHz. Analisis VSWR juga didapatkan $VSWR \leq 2$. Gain masing-masing frekuensi 900 MHz dan 2.4GHz adalah 1.52 dB dan 2.63 dB.

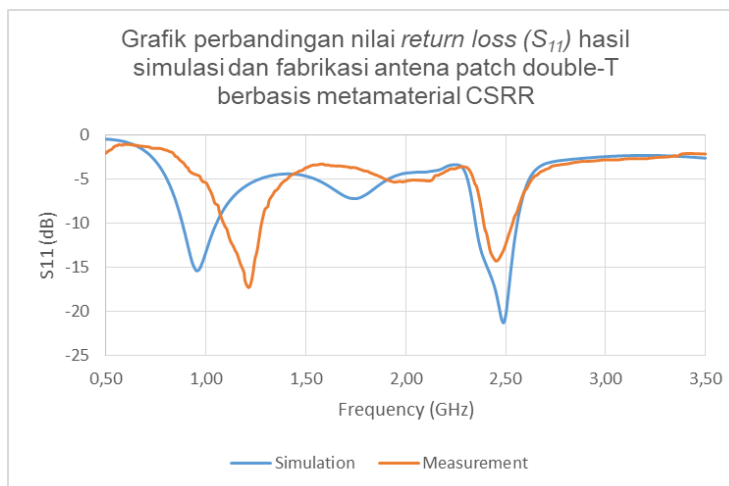


Gambar 7. Pola radiasi antenna bentuk 3D, (a) Frekuensi 900 MHz, dan (b) Frekuensi 2.45 GHz

B. Analisa Hasil Pabrikasi Antena Mikrostrip Patch Double-T Berbasis Metamaterial CSRR

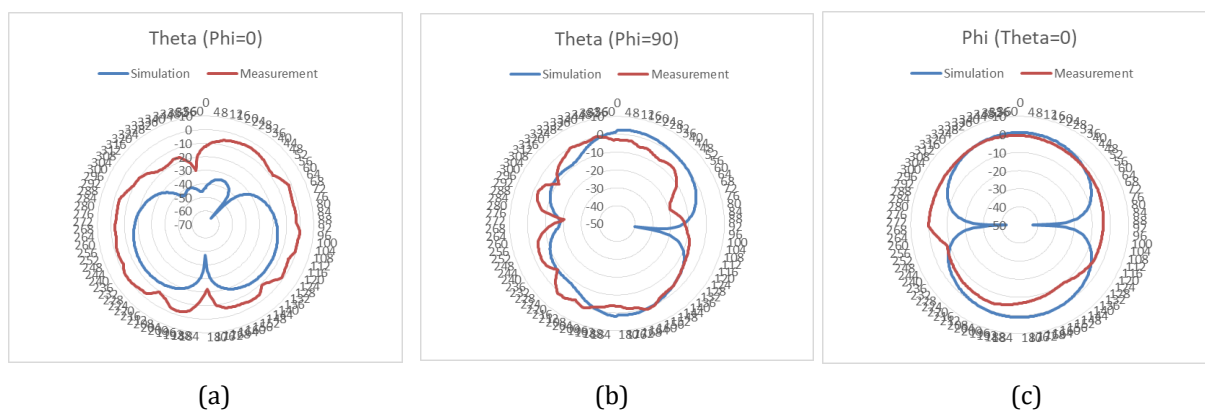
Hasil fabrikasi dari desain antenna yang dilakukan menggunakan bahan PCB FR-4 Epoxy dengan ketebalan 1.6 mm, ketebalan lapisan copper 0.035 mm dan penyambungan SMA connector pada bagian feeding selanjutnya dilakukan pengukuran terhadap parameter unjuk kerja antenna dalam ruangan Anechoic Chamber.

Dari hasil pengukuran sesuai pada Gambar 8, didapatkan pergeseran untuk frekuensi 900 MHz ke frekuensi 1.2 GHz. Adapun frekuensi ini antenna beresonansi pada 1.0944 GHz – 1.2777 GHz dengan nilai S_{11} -17.48 dB. Dan untuk frekuensi kedua tetap bekerja pada frekuensi 2.45 GHz yang beresonansi pada frekuensi 2.4 GHz – 2.5333 GHz dengan nilai S_{11} -14.27 dB. Adapun bandwidth antenna yang didapatkan $BW_{1.2\text{GHz}}$ sebesar 183.3 MHz dan $BW_{2.45\text{GHz}}$ sebesar 133.3 MHz.



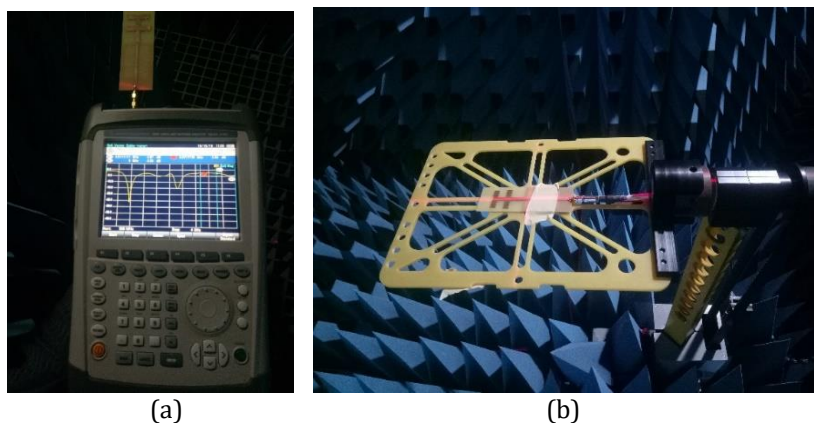
Gambar 8. Grafik perbandingan nilai *return loss* (S_{11}) hasil simulasi dan fabrikasi antenna patch double-T berbasis metamaterial CSRR

Dengan menggunakan *Cable and Antenna Analyzer* didapatkan VSWR antenna $VSWR \leq 2$. Selanjutnya untuk pengukuran pola radiasi dan gain antenna menggunakan *Anechoic Chamber* hanya pada frekuensi 2.4 GHz saja sesuai dengan tujuan system RF Energy harvesting yang diusulkan. Pada gambar 9, dilakukan perbandingan pola radiasi antara simulasi dan hasil pabrikasi.



Gambar 9. Perbandingan pola radiasi dan gain simulasi dan pengukuran antenna mikrostrip patch double-T berbasis metamaterial CSRR (a) Theta($\Phi=0$), (b) Theta($\Phi=90$), dan (c) Phi($\Theta=0$)

Adapun untuk gain maksimum yang didapat pada hasil pengukuran yakni 1 dB pada komponen Theta ($\Phi=90$) dengan sudut 160° seperti halnya pada hasil simulasi dengan gain maksimum pada komponen Theta ($\Phi=90$) sebesar 2.63 pada sudut 170° . Hasil simulasi dan pengukuran memiliki persamaan bentuk untuk setiap perubahan komponen Phi dan Theta, walaupun terlihat pada hasil pengukuran terdapat distorsi yang mempengaruhi bentuk dan arah pola radiasi antenna. Selain itu, terdapat pergeseran fasa pada hasil pengukuran yang juga mempengaruhi bentuk pola radiasi secara umum yang membuat terjadinya penurunan besar gain yang dihasilkan.



Gambar 10. (a) Pengukuran S_{11} dan VSWR Antena serta (b) Pengukuran Pola Radiasi dan Gain diruangan Anechoic Chamber

C. Analisa Pengukuran Kemampuan Harvesting Antena

Pengukuran kemampuan harvesting dari antena yang telah dirancang dan difabrikasi menggunakan access point sebagai sumber harvesting dilakukan dengan tujuan dapat menyerap energi bebas dari radiasi gelombang elektromagnetik yang dihasilkan oleh access point ini. Tahap awal yang dilakukan adalah pengukuran antena untuk mengetahui posisi atau sudut terbaik dari antena dapat menyerap energi secara maksimal. Setelah diperoleh output (dBm) dari berbagai sudut antena menggunakan *Cable and Antenna Analyzer* dan *AVG Smart Sensor*, didapatkan posisi yang paling baik yakni pada 0° . Pada hasil pengukuran pola radiasi dan gain untuk antena yang diusulkan, didapatkan sudut maksimum gain pada sudut 160° atau 170° .

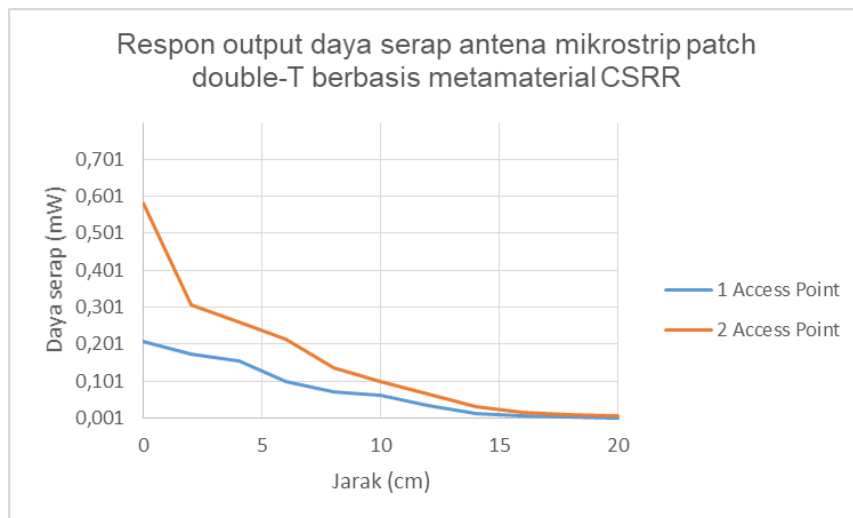
Pada Tabel 2, untuk sudut 160° memiliki output yang lebih besar dari 0° yang seharusnya jika ditinjau dari hasil simulasi harusnya lebih besar. Pengukuran dilakukan pada beberapa ruangan di Laboratorium namun karena keterbatasan ruangan yang ideal (tidak ada radiasi gelombang elektromagnetik lain selain dari access point) sehingga data hasil pengukuran output antena yang digunakan yakni data paling mendekati dengan nilai output antena pada saat simulasi kemudian

dilanjutkan pengambilan data selanjutnya pada posisi, kondisi dan ruangan pengambilan data tersebut. Namun untuk memudahkan pengukuran dan presisi sudut terima antenna, penulis memakai sudut 0° yang nilainya hampir sama dengan sudut 160° atau 170°.

Tabel 2. Hasil pengukuran output antenna terhadap sudut

Sudut (°)	Output (dBm)
0	-6.24
20	-11.74
40	-15.64
60	-16.23
80	-14.23
100	-11.75
120	-12.48
140	-11.01
160	-8.50
180	-6.81
270	-13.63
340	-10.21

Selanjutnya melakukan pengukuran daya output antenna. Skenario pengukuran pertama menggunakan satu buah access point dan kemudian pada pengukuran kedua menggunakan dua buah access point berdasarkan perubahan jarak yang diberikan. Adapun hasil pengukuran pada Gambar 11.



Gambar 11. Respon output daya serap antenna mikrostrip patch double-T berbasis metamaterial CSRR Untuk mengetahui efisiensi daya serap antenna digunakan persamaan (Amir, 2011):

$$\epsilon_r = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (8)$$

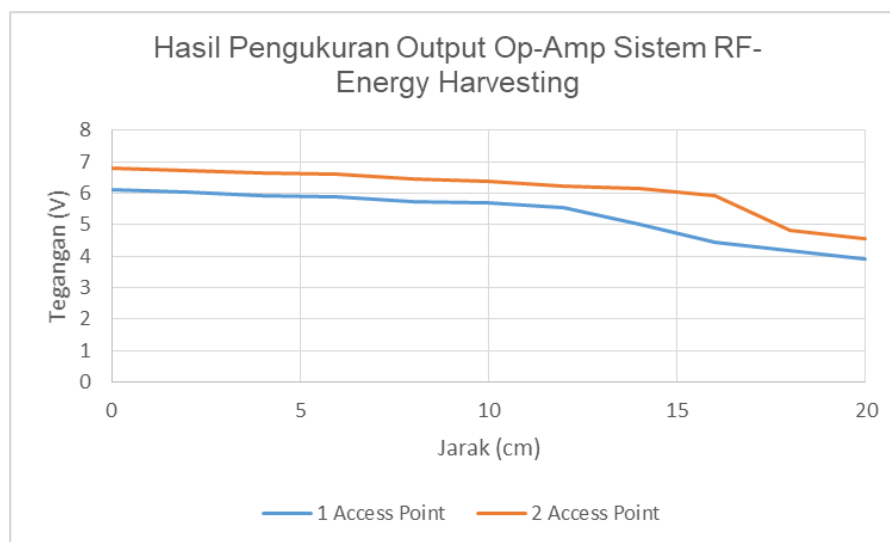
Sehingga dapat dilihat pada Tabel 3, efisiensi daya serap antenna maksimum pada nilai 6.68% dengan menggunakan 2 buah access point.

Pengukuran selanjutnya yakni pengambilan data output DC yang dihasilkan oleh penyerapan gelombang elektromagnetik dari radiasi antenna access point menggunakan rangkaian converter DC. Adapun scenario pengukuran dilakukan dengan mengubah tegangan Vcc Op-Amp yang diberikan yakni 9V dan 6V. Pada tegangan Op-Amp 9V dari jarak terdekat antenna mampu menyerap energi 6.79 V hingga jarak 20 cm sebesar 4.56 V setelah melewati rangkaian Op-Amp. Dan untuk Vcc Op-Amp 6V. dari jarak terdekat antenna mampu menyerap energi 3.86 V hingga jarak 20 cm sebesar 1.85 V setelah melewati rangkaian Op-Amp juga. Dari perbandingan kedua input Vcc ini didapatkan bahwa dengan memberikan tegangan Vcc 6V pada rangkaian Op-Amp.

Sistem harvesting tidak dapat memberikan output yang maksimal agar dapat digunakan pada perangkat IoT konsumsi daya rendah. Adapun hasil pengukuran dalam bentuk grafik terlihat pada Gambar 12.

Tabel 3. Efisiensi Daya Serap Antena

Jarak (cm)	Efisiensi (%)	
	1 Access Point	2 Access Point
Saling menempel	3.97	6.68
2	3.32	3.54
4	3.01	3.01
6	1.94	2.46
8	1.38	1.58
10	1.19	1.14
12	0.67	0.77
14	0.25	0.37
16	0.13	0.17
18	0.08	0.11
20	0.04	0.07



Gambar 12. Perbandingan Hasil Pengukuran Output DC Op-Amp Sistem *RF-Energy Harvesting*

Berdasarkan hasil yang diperoleh, sistem yang dibuat sudah berfungsi sesuai tujuan penelitian yaitu energi yang diserap antena dan dikonversi ke dalam tegangan DC diharapkan mampu menjadi sumber energi pengganti baterai atau backup untuk perangkat konsumsi perangkat daya rendah itu sendiri.

D. Analisa Kemampuan Harvesting Output Hybrid Solar Cell dengan Antena Mikrostrip

Pada bagian ini, skenario pengambilan data dilakukan dengan antena harvester ditempatkan diantara antena access point dengan jarak terdekat yakni saling menempel. Pengukuran dilakukan pada jam 11.52 siang dengan intensitas panas matahari yang cukup tinggi. Output dari sistem ini dilakukan pengaturan pada output konstan 5V sesuai kebutuhan dari handphone.

Adapun spesifikasi dari baterai handphone yang digunakan adalah baterai jenis Li-Ion 2100 mAh. Kondisi awal baterai handphone dalam keadaan 1%. Pengamatan pertama dilakukan selama 30 menit. Handphone dalam kondisi ter-charging namun pada rentang waktu ini baterai tidak mengalami penambahan charging. Kemudian dilakukan tambahan waktu menjadi 1 jam namun posisi persentase charging masih pada 1 %.

Dari hasil pengamatan ini dapat dilihat bahwa lama charging tergantung dari besar arus yang dihasilkan oleh penyerapan untuk kedua sumber yakni gelombang RF dan panas sinar matahari. Arus yang dihasilkan oleh sumber ini masih dalam orde mA sehingga proses charging lama.

V. SIMPULAN

Optimasi dan komputasi numerik pada desain antenna untuk RF-Energy harvesting ini telah selesai dilakukan dimana ukuran antenna konvensional dapat direduksi ukurannya dengan menggunakan teknologi metamaterial CSRR cukup besar. Selain itu, peningkatan nilai *return loss* dan peningkatan bandwidth dapat terealisasi pada desain antenna yang diusulkan. Performansi parameter hasil simulasi dan fabrikasi juga sudah masuk sebagai syarat untuk sistem RF-energy harvesting. Pada hasil pengukuran output kemampuan penyerapan antenna mikrostrip double-T berbasis metamaterial CSRR untuk output DC sesuai dengan tujuan pada penelitian ini sudah cukup besar. Sistem antenna yang dirancang pada penelitian ini sudah dapat berfungsi sebagaimana tujuan dari penelitian ini dilakukan yakni untuk sumber energi perangkat cerdas dengan kebutuhan daya kecil.

DAFTAR PUSTAKA

- Amir. (2011). Analisis Efisiensi Antena Dipole Ditinjau dari Penggunaan Bahan Reflektor. *LITEK*, (pp. 47-51).
- Balanis, C. A. (1997). *Antenna Theory: Analysis and Design, Second Edition*. New York: Harper & Row Publisher.
- BMKG. (2021). *Ekstrim Perubahan Iklim*. Indonesia: BMKG .
- Catharina Ira Dian Anggitaratna, B. S. (2021). Perancangan dan Analisis Antena Mikrostrip Berbasis Metamaterial Pada Frekuensi 3.5 GHz Untuk Aplikasi 5G. *eProceeding of Engineering* (pp. 214-222). Universitas Telkom.
- Divakaran, S. K., Krishna, D. D., & Nasimuddin. (2017). An Overview of Compact Antennas for RF Energy Harvesting. *International WIE Conference on Electrical and Computer Engineering* (pp. 47-50). India: IEEE.
- Eva Yovita Dwi Utami, F. D. (2017). Rancang Bangun Antena Mikrostrip Persegi Panjang 2,4 GHz untuk Aplikasi Wireless Fidelity (Wi-Fi). *JURNAL NASIONAL TEKNIK ELEKTRO*, 196-202.
- Faisal Irsan Pasaribu, M. R. (2021). Rancang Bangun Charging Station Berbasis Arduino Menggunakan Solar Cell 50 WP. *Rekayasa Elektrikal dan Energi (RELE)*, 46-55.
- Irfan Mujahidin, A. K. (2021). The Novel CPW 2.4 GHz Antenna with Parallel Hybrid Electromagnetic Solar for IoT Energy Harvesting and Wireless Sensors. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*.
- Jelinek, L. J. (2007). Metamaterials - A Challenge for Contemporary Advanced Technology. *Faculty of Electrical Engineering, Czech Technical University*. Republik Ceko: IEEE.
- Jingwei Zhang, Y. D. (2021). Implementation of Left-Handed Transmission Lines Based on Waveguided TM Modes. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2811-2818.
- Kehinde Lawal, H. N. (2022). Trends, benefits, risks, and challenges of IoT implementation in residential and commercial buildings. *Energy and Built Environment*, 251-266.
- Laith Farhan, R. K.-C. (2018). A Concise Review on Internet of Things (IoT) - Problems, Challenges and Opportunities. *11th International Symposium on Communication Systems, Networks & Digital Signal Processing (CSNDSP)*. Hungary: IEEE.
- Long Liu, X. G. (2021). Promoting smart cities into the 5G era with multi-field Internet of Things (IoT) applications powered with advanced mechanical energy harvesters. *Nano Energy*.
- M. Shafiqur Rahman, U. K. (2020). A Multiband RF Energy Harvesting System for Efficient Power Conversion. *Proceedings of the ASME 2020 International Mechanical Engineering Congress and Exposition* (pp. 16-19). ASME.
- Marquez, R. F. (2008). *Metamaterials With Negative Parameters*. Toronto: John Wiley & Sons.
- Maryam Eshaghi, R. R. (2020). An Energy Harvesting Solution for IoT Devices in 5G Networks. *2020 IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)* (pp. 1-4). IEEE.

- Muhammad Hamza, M. U. (2021). Hybrid Dual Band Radio Frequency and Solar Energy Harvesting System for Making Battery-less Sensing Nodes. *2021 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS)* (pp. 116-118). IEEE.
- Nurfitri, E. P. (2019). A Metamaterial Based RF Absorber Electronically Reconfigure for an Efficient DC Low Power Generation. *2019 IEEE 4th International Conference on Technology, Informatics, Management, Engineering & Environment (TIME-E)* (pp. 21-25). Bali, Indonesia: IEEE.
- Nurfitri, E. P. (2019). A Smart RF Harvesting Energy Absorber Applied for Low Electrical Power Charging Unit. *2019 Photonics & Electromagnetics Research Symposium, Fall (PIERS-FALL)*, (pp. 2844-2847). Xiamen, China.
- Rauf, M. F. (2018). *Internet of Things (IoT) dalam Revolusi Industri 4.0*. Jakarta: medium.com.
- Shashi Rekha, L. T. (2021). Study of security issues and solutions in Internet of Things (IoT). *Materials Today: Proceedings*.
- Sleebi K. Divakaran, D. D. (2018). RF energy harvesting systems: An overview and design issues. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*.
- Sri Wiwoho Mudjanarko, S. W. (2017). Pemanfaatan Internet Of Things (IOT) Sebagai Solusi Manajemen Transportasi Kendaraan Sepeda Motor . *Prosiding Seminar Nasional Aplikasi Teknologi Prasarana Wilayah X (ATPW)* (pp. 151-164). Surabaya: Departemen Teknik Infrastruktur Sipil ITS Surabaya.
- Vinnakota Sarath Sangkar, R. K. (2018). Metamaterial-Inspired Rectenna Loaded With a DR for RF Energy Harvesting. *2018 IEEE Indian Conference on Antennas and Propagation (InCAP)* (pp. 1-3). IEEE.
- Woosol Lee, S.-i. C.-i.-K. (2021). Metamaterial-Integrated High-Gain Rectenna for RF Sensing and Energy Harvesting Applications. *Sensors*.