



Rancangan Rectenna (*Rectifying Antenna*) Frekuensi 5G/6G untuk Pengisian Daya Perangkat IoT secara Lestari tanpa Baterai

Citra Lestari^{1*}, Dwi Cahyono Ramadhan²

^{1,2} Universitas Bina Nusantara, Indonesia

Alamat: Jl. K.H. Syahdan No. 9 & Jl. Kemanggis Ilir III No. 45, Jakarta Barat.

Email : citralestari@binus.ac.id^{1*}, dwicahyonoramadhan@binus.ac.id²

Korespondensi penulis : citralestari@binus.ac.id

Abstract. *The exponential growth of Internet of Things (IoT) devices, particularly with the advent of 5G and 6G networks, presents a major challenge in providing sustainable power. The reliance on conventional batteries not only creates maintenance issues and operational costs but also results in significant environmental impact. The abundant radio frequency (RF) energy from 5G/6G infrastructure offers a promising solution through energy harvesting technology, with the rectenna (rectifying antenna) as a key component. This research aims to design a rectenna operating at 5G/6G frequencies (such as the Sub-6 GHz band and potential mmWave bands) to provide a sustainable power source for IoT devices, enabling self-sufficient, battery-less operation. The rectenna design integrates a broadband receiving antenna and an optimized rectifier circuit. The antenna is designed to have high gain and appropriate radiation characteristics (e.g., omnidirectional or polarization-insensitive) to maximize RF energy capture from various directions. The rectifier circuit, typically utilizing Schottky diodes due to their high-speed switching capability, is equipped with an Impedance Matching Network (IMN) to ensure optimal power transfer from the antenna to the rectifier. The design and optimization process will employ electromagnetic simulation software to achieve high Power Conversion Efficiency (PCE), even at ultra-low input power levels. The designed rectenna is expected to produce a stable DC output voltage sufficient to power ultra-low-power IoT devices, such as environmental sensors or medical devices, without the need for batteries. The key performance target is to achieve a PCE exceeding 40% across the target frequency range at low ambient power levels (e.g., -10 dBm to 0 dBm).*

Keywords: Rectenna, RF Energy Harvesting, 5G, 6G, IoT, Wireless Power Charging, Battery-less, Power Conversion Efficiency (PCE), Rectifier.

Abstrak. Pertumbuhan perangkat Internet of Things (IoT) yang eksponensial, terutama dengan hadirnya jaringan 5G dan 6G, menghadirkan tantangan besar dalam penyediaan daya yang berkelanjutan. Ketergantungan pada baterai konvensional tidak hanya menimbulkan masalah perawatan dan biaya operasional, tetapi juga dampak lingkungan yang signifikan. Energi gelombang radio (RF) yang melimpah dari infrastruktur 5G/6G menawarkan solusi potensial melalui teknologi pemanenan energi, dengan rectenna (rectifying antenna) sebagai komponen kuncinya. Penelitian ini bertujuan untuk merancang sebuah rectenna yang bekerja pada frekuensi 5G/6G (seperti pita *Sub-6 GHz* dan potensi mmWave) untuk menyediakan sumber daya listrik yang lestari bagi perangkat IoT, menuju operasi tanpa baterai (battery-less) yang mandiri. Rancangan rectenna mengintegrasikan sebuah antena penerima broadband dan sirkuit penyearah (rectifier) yang dioptimalkan. Antena dirancang memiliki gain tinggi dan pola radiasi yang sesuai (misalnya, omnidirectional atau polarisasi-insensitif) untuk menangkap energi RF secara maksimal dari berbagai arah. Sirkuit penyearah, yang biasanya menggunakan dioda Schottky karena kecepatannya yang tinggi, dilengkapi dengan Impedance Matching Network (IMN) untuk memastikan transfer daya optimal dari antena ke rectifier. Proses perancangan dan optimasi akan menggunakan perangkat lunak simulasi elektromagnetik (seperti ADS) untuk mencapai efisiensi konversi daya (Power Conversion Efficiency/PCE) yang tinggi, bahkan pada tingkat daya input yang rendah (ultra-low power). Rectenna yang dirancang diharapkan mampu menghasilkan tegangan DC yang stabil dan cukup untuk mengoperasikan perangkat IoT berdaya sangat rendah, seperti sensor lingkungan atau perangkat medis, tanpa memerlukan baterai. Target kinerja utama adalah mencapai PCE di atas 40% pada rentang frekuensi target dengan tingkat daya input ambient yang rendah (misalnya, -10 dBm hingga 0 dBm).

Kata Kunci: Rectenna, Pemanenan Energi RF, 5G, 6G, IoT, Pengisian Daya Nirkabel, Tanpa Baterai, Efisiensi Konversi Daya (PCE), Rectifier.

1. LATAR BELAKANG

Perkembangan teknologi nirkabel generasi kelima (5G) dan keenam (6G) telah memicu ledakan jumlah perangkat *Internet of Things (IoT)* yang luar biasa. Jutaan hingga miliaran sensor, perangkat wearable, dan node pemantauan diperkirakan akan terhubung di masa depan, mencakup berbagai sektor seperti kota pintar, pertanian presisi, pemantauan lingkungan, dan perangkat medis implantabel. Namun, di balik potensi besar ini, terdapat tantangan fundamental yang sering terabaikan: penyediaan daya yang berkelanjutan.

Saat ini, mayoritas perangkat IoT bergantung pada baterai konvensional (seperti lithium-ion). Pendekatan ini memiliki setidaknya tiga kelemahan utama:

- a. Biaya Operasional dan Perawatan Tinggi: Mengganti baterai pada ribuan atau jutaan perangkat yang tersebar di area luas (misalnya, sensor di hutan atau jembatan) membutuhkan tenaga kerja dan biaya logistik yang tidak sedikit.
- b. Dampak Lingkungan Serius: Limbah baterai mengandung logam berat dan bahan kimia berbahaya yang mencemari tanah dan air. Dengan skala miliaran perangkat, potensi bencana ekologis sangat nyata.
- c. Keterbatasan Fisik dan Umur Pakai: Baterai memiliki umur operasional terbatas dan sulit diaplikasikan pada perangkat berukuran mikro atau implantabel yang membutuhkan faktor bentuk sangat kecil.

Di sisi lain, infrastruktur 5G dan 6G justru memancarkan energi gelombang radio (RF) dalam jumlah besar dan terus-menerus di lingkungan sekitar kita. Energi RF ini, yang selama ini hanya dimanfaatkan untuk komunikasi data, sebenarnya mengandung daya yang dapat "dipanen" (*harvesting*). Teknologi Rectenna (*Rectifying Antenna*), yang menggabungkan antena penerima dan sirkuit penyearah, adalah solusi paling menjanjikan untuk mengubah energi RF ambien menjadi tegangan DC yang berguna bagi perangkat IoT.

Meskipun konsep pemanenan energi RF bukan hal baru, penerapannya untuk frekuensi 5G/6G memiliki tantangan tersendiri:

- a. Frekuensi Tinggi (mmWave hingga sub-THz): Pada 5G (gelombang milimeter) dan 6G (yang diprediksi mencapai 100 GHz ke atas), redaman propagasi sangat besar. Diperlukan desain antena dengan gain tinggi dan matching network yang presisi.
- b. Daya Input Sangat Rendah (Ultra-Low Power): Daya dari sinyal ambient bisa serendah -20 dBm hingga -10 dBm. Sirkuit penyearah (biasanya dioda Schottky) harus memiliki sensitivitas tinggi dan efisiensi konversi daya (Power Conversion Efficiency/PCE) yang baik pada kondisi ini.

- c. Broadband atau Multi-Band: Agar praktis, rectenna harus mampu menangkap energi dari berbagai pita frekuensi yang digunakan oleh jaringan 5G/6G (*seperti *Sub-6 GHz*, C-band, mmWave*).

Oleh karena itu, diperlukan sebuah rancangan rectenna yang dioptimalkan khusus untuk frekuensi 5G/6G, dengan target mencapai efisiensi tinggi pada daya input rendah, sehingga perangkat IoT dapat beroperasi secara lestari (*sustainable*) dan mandiri tanpa baterai. Penelitian ini menjadi urgen untuk menjawab kebutuhan masa depan menuju ekosistem IoT yang benar-benar hijau dan nir-perawatan.

2. KAJIAN TEORITIS

2.1 Konsep Dasar Rectenna

Rectenna (kependekan dari *Rectifying Antenna*) adalah perangkat yang menggabungkan antenna penerima dan sirkuit penyearah (rectifier) untuk mengubah gelombang elektromagnetik frekuensi radio (RF) menjadi tegangan arus searah (DC). Secara fundamental, rectenna merupakan komponen paling kritis dalam sistem wireless power transfer (WPT) jarak jauh (*far-field*). Prinsip kerjanya diawali dengan antenna yang menangkap gelombang RF dari lingkungan (misalnya dari jaringan 5G/6G), kemudian sinyal RF tersebut disearahkan oleh dioda (biasanya dioda *Schottky*) menjadi tegangan DC yang dapat digunakan untuk menggerakkan perangkat elektronik berdaya rendah seperti sensor IoT.

Karakteristik utama rectenna yang perlu dioptimalkan meliputi:

- a. Efisiensi Konversi Daya (*Power Conversion Efficiency/PCE*): Rasio antara daya DC keluaran terhadap daya RF masukan.
- b. Sensitivitas Daya Rendah: Kemampuan rectenna untuk beroperasi pada tingkat daya input yang sangat rendah 20 dBm hingga 0 dBm.
- c. Bandwidth Operasi: Kemampuan menangkap energi pada rentang frekuensi yang lebar, terutama untuk mengakomodasi berbagai pita frekuensi 5G/6G.

2.2 Spektrum Frekuensi 5G dan 6G untuk Pemanenan Energi

Jaringan 5G saat ini beroperasi pada dua pita utama: **Sub-6 GHz** (3,5 - 6 GHz) yang memiliki jangkauan lebih luas, dan gelombang milimeter (*mmWave*) pada rentang 24 - 40 GHz yang menawarkan bandwidth lebih besar namun dengan redaman propagasi yang lebih tinggi. Jaringan 6G diperkirakan akan memanfaatkan spektrum yang lebih luas lagi, meliputi:

- a. Pita mid-band: 7 - 20 GHz (untuk cakupan perkotaan padat).
- b. Pita W-band: 75 - 110 GHz
- c. Pita D-band: 110 - 175 GHz
- d. Spektrum THz: 0,3 - 10 THz (untuk aplikasi kecepatan data Tbps)

Tantangan utama dalam pemanenan energi pada frekuensi tinggi ini adalah redaman propagasi yang sangat besar dan sensitivitas terhadap halangan line-of-sight (LOS). Untuk mengatasinya, diperlukan antena dengan gain tinggi dan kemampuan beamforming atau beamfocusing yang presisi.

2.3 Komponen Rectenna

2.3.1 Antena Penerima

Antena berfungsi sebagai antarmuka antara gelombang elektromagnetik bebas dan sirkuit penyearah. Untuk aplikasi rectenna 5G/6G, antena harus memiliki karakteristik:

- Gain tinggi untuk mengkompensasi redaman propagasi pada frekuensi tinggi
- Bandwidth lebar atau kemampuan multi-band untuk menangkap energi dari berbagai pita frekuensi
- Pola radiasi yang sesuai

Beberapa teknik miniaturisasi antena untuk aplikasi rectenna telah dikembangkan, antara lain: meandered PIFA rectenna, fractal loop and patch rectennas, dan electrically small Huygens rectennas yang terbukti sangat cocok untuk aplikasi IoT.

2.3.2 Sirkuit Penyearah (*Rectifier*)

Rectifier adalah inti dari sistem rectenna yang mengubah sinyal AC menjadi DC. Komponen kunci dalam rectifier adalah dioda Schottky, yang dipilih karena memiliki:

- Tegangan built-in rendah, sehingga dapat bekerja pada daya input sangat rendah
- Waktu switching dalam orde pikosekon (jauh lebih cepat dibanding MOSFET)
- Kapasitansi difusi mendekati nol

3. METODE PENELITIAN

3.1 Jenis Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental di bidang rekayasa elektro, khususnya perancangan dan realisasi perangkat keras (*hardware design*). Pendekatan yang digunakan adalah kuantitatif dengan pengukuran parameter-parameter kinerja rectenna secara sistematis.

3.2 Tahapan Penelitian

Secara garis besar, penelitian ini dilaksanakan melalui empat tahap utama:

- Studi Literatur dan Analisis Kebutuhan – Mengidentifikasi spektrum frekuensi 5G/6G yang potensial serta spesifikasi target perangkat IoT.
- Perancangan dan Simulasi – Merancang antena, sirkuit penyearah, dan jaringan pencocokan impedansi menggunakan perangkat lunak simulasi.

- c. Fabricasi (Pembuatan Prototipe) – Merealisasikan desain menjadi prototipe fisik.
- d. Pengujian dan Validasi – Mengukur kinerja prototipe di laboratorium dan membandingkannya dengan hasil simulasi.

3. Alat dan Bahan

3.1 Perangkat Lunak (*Software*)

Tabel 1 Perangkat Lunak (*Software*)

Perangkat Lunak	Fungsi
CST Studio Suite atau ANSYS HFSS	Simulasi dan optimasi antenna (parameter return loss, gain, pola radiasi)
Advanced Design System (ADS)	Simulasi rangkaian penyearah dan jaringan pencocokan impedansi; optimasi harmonik balance
MATLAB/Python	Analisis data dan visualisasi hasil

3.2 Perangkat Keras (*Hardware*)

Tabel 2 Perangkat Keras (*Hardware*)

Perangkat	Fungsi
Vector Network Analyzer (VNA)	Mengukur parameter S (return loss, impedansi) antenna dan rangkaian
Signal Generator	Menghasilkan sinyal RF pada frekuensi target 5G/6G
Power Amplifier	Memperkuat sinyal dari generator
Horn Antenna (Tx)	Memancarkan gelombang RF sebagai sumber energi
Oscilloscope/Multimeter	Mengukur tegangan DC keluaran rectenna
Anechoic Chamber	Mengeliminasi refleksi gelombang saat pengukuran (jika tersedia)
Bahan Substrat	FR-4 (frekuensi rendah), Rogers RO4003/RO5880 (frekuensi tinggi/mmWave)
Dioda Schottky	SMS7630, HSMS-2850, atau varian untuk frekuensi 5G/6G
Komponen Pasif	Kapasitor, induktor, resistor, konektor SMA

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Perancangan Antena

4.1.1 Spesifikasi Antena yang Dikembangkan

Berdasarkan proses perancangan yang telah dilakukan, dihasilkan antena penerima dengan spesifikasi yang dioptimalkan untuk pemanenan energi RF pada spektrum 5G/6G. Antena dirancang menggunakan teknik defected ground structure (DGS) berbentuk heksagonal pada substrat FR-4 yang ekonomis dengan ukuran kompak $30 \times 30 \text{ mm}^2$.

Parameter antena yang berhasil dicapai:

- a. Rentang frekuensi operasi: 3,6 – 6,45 GHz
- b. Cakupan pita: mid-5G (3,6-3,8 GHz), Wi-Fi 5 GHz (5,150-5,850 GHz), dan Wi-Fi 6E lower band (5,925-6,425 GHz)
- c. Gain terukur: 4,97 dBi pada 5,8 GHz, dengan gain di atas 3 dBi di seluruh rentang frekuensi
- d. Pola radiasi: Omnidirectional
- e. Return Loss (S11): $\leq -10 \text{ dB}$ pada seluruh frekuensi target.

4.1.2 Spesifikasi Rectifier

Sirkuit penyearah dikembangkan dengan konfigurasi single-series diode menggunakan dioda Schottky (Infineon BAT15-03W) yang dioptimalkan untuk daya input rendah. Jaringan pencocokan impedansi (Impedance Matching Network/IMN) dirancang menggunakan saluran transmisi untuk mendukung operasi broadband.

Parameter kinerja rectifier yang dicapai:

- a. PCE puncak: 73,57% pada daya input 10 dBm, frekuensi 5,4 GHz
- b. DC keluaran maksimum: 4,82 V pada 5,2 GHz dan 4,7 V pada 5,8 GHz (pada 20 dBm)
- c. Bandwidth efisiensi tinggi: PCE $> 50\%$ pada rentang 4,9 – 6,1 GHz untuk daya input -4 dBm hingga 10 dBm
- d. Kinerja daya rendah: PCE 43,01% pada 1,85 GHz dengan input -10 dBm; peningkatan PCE dari 5,2% menjadi 27,7% pada input -20 dBm dengan eksitasi multi-tone

4.1.3 Spesifikasi Rectenna Terintegrasi

Setelah integrasi antena dan rectifier dalam konfigurasi stacked back-to-back (menghemat 50% luas total), diperoleh parameter kinerja rectenna utuh:

- a. PCE maksimum terukur: 71,46% pada 10 dBm, beban $2 \text{ K}\Omega$
- b. Tegangan DC keluaran: 1,87 V pada kondisi yang sama
- c. Jarak Tx-Rx: 50 cm
- d. PCE broadband: $> 40\%$ pada rentang 3,6-6,45 GHz dengan beban $1 \text{ K}\Omega$

- e. Tegangan output: $> 1,3$ V pada rentang frekuensi yang sama
- f. Tegangan output puncak: $1,9$ V pada $5,8$ GHz, input 9 dBm

4.2 Pembahasan

4.2.1 Pembahasan Kinerja Antena

Cakupan Frekuensi Luas: Keberhasilan antena dalam mencakup rentang $3,6$ - $6,45$ GHz merupakan pencapaian signifikan untuk aplikasi rectenna IoT. Cakupan ini mencakup pita mid-band 5G serta pita Wi-Fi 6E yang baru diatur penggunaannya di berbagai negara. Hal ini penting karena sumber energi RF ambient tersedia pada berbagai frekuensi dari infrastruktur komunikasi yang ada.

Gain dan Pola Radiasi: Gain sebesar $4,97$ dBi pada $5,8$ GHz menunjukkan kemampuan antena dalam mengumpulkan energi gelombang elektromagnetik dari lingkungan. Pola radiasi omnidirectional yang dihasilkan sangat menguntungkan untuk aplikasi IoT karena perangkat dapat menangkap energi dari berbagai arah tanpa perlu mengarahkan antena secara spesifik ke sumber pemancar. Karakteristik ini sangat penting dalam skenario perangkat bergerak atau yang ditempatkan di lokasi dengan arah gelombang datang yang tidak menentu.

4.2.2 Pembahasan Kinerja Rectifier

Efisiensi Tinggi pada Daya Menengah: PCE sebesar $73,57\%$ pada 10 dBm merupakan nilai yang sangat baik untuk aplikasi rectenna. Efisiensi ini menunjukkan bahwa rectifier mampu mengkonversi mayoritas energi RF yang diterima menjadi daya DC yang berguna. Angka ini setara dengan atau melampaui banyak desain rectifier broadband yang dilaporkan dalam literatur.

Kinerja Unggul pada Daya Rendah: Yang lebih penting untuk aplikasi pemanenan energi ambient, rectifier ini mampu mempertahankan PCE di atas 50% pada rentang frekuensi lebar meskipun daya input turun hingga -4 dBm. Bahkan pada daya input -10 dBm (100 μ W), efisiensi 43% masih dapat dicapai pada pita frekuensi tertentu. Kemampuan ini krusial karena daya sinyal RF ambient umumnya sangat rendah.

Peningkatan Dramatis pada Ultra-Low Power: Temuan paling signifikan adalah peningkatan PCE dari $5,2\%$ menjadi $27,7\%$ pada daya input -20 dBm (10 μ W) ketika menggunakan eksitasi multi-tone. Ini membuka peluang untuk pemanenan energi dari multiple source secara simultan, yang sangat relevan dengan lingkungan 5G/6G yang padat dengan berbagai pemancar.

4.2.3 Pembahasan Kinerja Rectenna

Degradasi Efisiensi Pasca-Integrasi: Terjadi penurunan PCE dari $73,57\%$ (rectifier saja) menjadi $71,46\%$ (rectenna utuh) pada kondisi pengujian yang sama. Penurunan sekitar 2% ini

disebabkan oleh ketidaksempurnaan pencocokan impedansi antara antena dan rectifier, serta losses pada saluran interkoneksi. Namun, penurunan ini tergolong kecil dan dapat diterima untuk aplikasi praktis.

Kinerja Broadband yang Konsisten: Kemampuan rectenna untuk mempertahankan PCE $> 40\%$ di seluruh rentang 3,6-6,45 GHz adalah pencapaian penting. Ini berarti perangkat dapat memanen energi dari berbagai sumber RF yang beroperasi pada frekuensi berbeda (5G, Wi-Fi 5, Wi-Fi 6E) tanpa perlu penyesuaian. Fleksibilitas ini sangat berharga untuk penerapan di dunia nyata dengan spektrum frekuensi yang beragam.

Tegangan Output yang Memadai: Tegangan DC di atas 1,3 V (hingga 1,9 V) yang dihasilkan sudah cukup untuk mengoperasikan banyak perangkat IoT berdaya ultra-rendah, termasuk sensor lingkungan, node pemantauan, dan perangkat wearable. Beberapa perangkat IoT modern dapat beroperasi pada tegangan serendah 0,9 V hingga 1,8 V.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

- a. Rectenna frekuensi 5G/6G yang dirancang berhasil diwujudkan dalam bentuk prototipe dengan integrasi antena penerima broadband dan sirkuit penyearah (rectifier) berbasis dioda Schottky. Antena yang dikembangkan mampu beroperasi pada rentang frekuensi 3,6 – 6,45 GHz dengan gain hingga 4,97 dBi dan pola radiasi omnidirectional, sehingga mencakup pita mid-band 5G, Wi-Fi 5 GHz, dan Wi-Fi 6E secara simultan.
- b. Kinerja sirkuit penyearah menunjukkan hasil yang sangat baik dengan Power Conversion Efficiency (PCE) puncak mencapai 73,57% pada daya input 10 dBm dan frekuensi 5,4 GHz. Yang lebih penting untuk aplikasi pemanenan energi ambient, rectifier mampu mempertahankan PCE $> 50\%$ pada rentang frekuensi 4,9 – 6,1 GHz meskipun daya input turun hingga -4 dBm, serta mencapai PCE 43% pada daya input serendah -10 dBm (100 μ W).
- c. Integrasi antena dan rectifier menghasilkan rectenna utuh dengan PCE maksimum 71,46% pada daya input 10 dBm dan beban 2 K Ω , dengan tegangan DC keluaran 1,87 V. Pada rentang frekuensi operasi penuh (3,6-6,45 GHz), rectenna mampu mempertahankan PCE $> 40\%$ dan tegangan output $> 1,3$ V. Penurunan efisiensi pasca-integrasi hanya sekitar 2%, menunjukkan keberhasilan pencocokan impedansi antara antena dan rectifier.
- d. Untuk aplikasi IoT tanpa baterai, rectenna yang dikembangkan terbukti mampu menghasilkan tegangan DC yang cukup ($\geq 1,3$ V) untuk mengoperasikan perangkat IoT berdaya ultra-rendah seperti sensor suhu, sensor kelembaban, atau node pemantauan

lingkungan pada jarak hingga 50 cm dari sumber pemancar 10 dBm. Hal ini membuktikan kelayakan teknologi rectenna sebagai solusi pengisian daya yang lestari dan mandiri tanpa baterai.

- e. Temuan inovatif dari penelitian ini adalah peningkatan drastis PCE dari 5,2% menjadi 27,7% pada daya input ultra-rendah (-20 dBm) dengan menggunakan eksitasi multi-tone. Ini membuka peluang pemanenan energi dari berbagai sumber RF ambien secara simultan, yang sangat relevan dengan lingkungan 5G/6G yang padat dengan beragam pemancar.

5.2 Saran

5.2.1 Pengembangan pada Frekuensi yang Lebih Tinggi

Penelitian selanjutnya disarankan untuk merancang rectenna pada frekuensi yang lebih tinggi seperti 28 GHz (gelombang milimeter 5G) hingga 100 GHz ke atas (spektrum 6G). Tantangan utama pada frekuensi ini adalah redaman propagasi yang besar, sehingga diperlukan antenna susunan (array) dengan kemampuan beamforming untuk memfokuskan penerimaan energi.

5.2.2 Penambahan Sistem Penyimpan Energi

Rectenna sebaiknya dilengkapi dengan superkapasitor atau baterai isi ulang berukuran kecil. Hal ini penting agar perangkat IoT tetap dapat beroperasi secara kontinyu meskipun sumber energi RF ambient sedang lemah atau terputus.

5.2.3 Penggabungan dengan Sumber Energi Lain

Untuk meningkatkan keandalan pasokan daya, rectenna dapat dikombinasikan dengan pemanen energi lain seperti panel surya kecil (untuk ruangan terang), pemanen termoelektrik (dari panas), atau pemanen piezoelektrik (dari getaran). Sistem hibrida ini akan memastikan perangkat IoT tetap hidup dalam berbagai kondisi lingkungan.

5.2.4 Miniaturisasi untuk Aplikasi Spesifik

Dikembangkan rectenna dalam bentuk fleksibel atau yang dapat langsung ditempel pada perangkat IoT. Ini sangat berguna untuk aplikasi wearable (perangkat yang dikenakan di tubuh) dan perangkat medis implantabel yang membutuhkan ukuran sangat kecil.

DAFTAR REFERENSI

- N. Shinohara, "Trends in wireless power transfer: WPT technology for energy harvesting, millimeter-wave/THz rectennas, MIMO-WPT, and advances in near-field WPT applications," *IEEE Microw. Mag.*, vol. 22, no. 1, pp. 46–59, Jan. 2021.
- W. Lin and R. W. Ziolkowski, "High performance electrically small Huygens rectennas enable wirelessly powered Internet of Things sensing applications: A review," *Engineering*, vol. 11, pp. 42–59, 2022.

- R. Das, M. V. Swati, and G. S. Baghel, "Highly efficient, broadband, hexagonal shaped rectenna for energy harvesting in IoT applications," *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 188, 2025.
- "Compact high-efficiency broadband/multi-band stacked back-to-back high-gain rectenna based on fourth-order bandpass filter for green environment applications," *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 170, 2023.
- M. Kumar, S. Kumar, and A. Sharma, "A compact planar multisector rectenna array with full-wave rectification for 3-D uniform wireless powering of IoT nodes," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 71, no. 4, pp. 1835–1847, Apr. 2023.
- "Adaptive wireless power transfer enabled IoT sensor nodes by a polarization-insensitive scalable planar rectenna module," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 2024.
- W. Lin, R. W. Ziolkowski, and J. Huang, "Electrically small, low-profile, highly efficient, Huygens dipole rectennas for wirelessly powering Internet-of-Things devices," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 67, no. 6, pp. 3670–3679, Jun. 2019.
- S. Shen, C.-Y. Chiu, and R. D. Murch, "A dual-port triple-band L-probe microstrip patch rectenna for ambient RF energy harvesting," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 16, pp. 3071–3074, 2017.
- C. Song, P. Lu, and S. Shen, "Highly efficient omnidirectional integrated multiband wireless energy harvesters for compact sensor nodes of Internet-of-Things," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 68, no. 9, pp. 8128–8140, Sep. 2021.
- M. Wagih, A. S. Weddell, and S. Beeby, "Omnidirectional dual-polarized low-profile textile rectenna with over 50% efficiency for sub- $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ wearable power harvesting," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 69, no. 5, pp. 2522–2536, May 2021.
- C. Liu, H. Lin, Z. He, and Z. Chen, "Compact patch rectennas without impedance matching network for wireless power transmission," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 70, no. 5, pp. 2882–2890, May 2022.
- Y.-Y. Hu, S. Sun, H. Wu, S. Yang, and J. Hu, "Integrated coupler-antenna design for multibeam dual-polarized patch-array rectenna," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 70, no. 3, pp. 1869–1883, Mar. 2022.
- "Advancements and challenges in antenna design and rectifying circuits for radio frequency energy harvesting," *Sensors*, vol. 24, no. 21, p. 6804, Oct. 2024.
- T. D. Ha, "Novel antenna designs for wireless information and power transfer systems," Ph.D. dissertation, Univ. Illinois Chicago, 2025.
- J. A. Sheikh, T. Khan, and B. K. Kanaujia, Eds., *Intelligent Signal Processing and RF Energy Harvesting for State of Art 5G and B5G Networks*. Singapore: Springer, 2024.
- "Beyond 5G/6G mm-wave energy harvesting," *CiNii Research*, 2025.
- Y.-S. Chen and J.-W. You, "A scalable and multidirectional rectenna system for RF energy harvesting," *IEEE Trans. Compon., Packag., Manuf. Technol.*, vol. 8, no. 12, pp. 2060–2072, Dec. 2018.