

Optimalisasi penyearah daya RF ultra-rendah dengan metode kombinasi DC

Wildan Anugrah Pratama¹, Farrah Vauzia^{2*}, Enceng Sulaeman³

^{1,2,3} Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Bandung

Jl. Gegerkalong Hilir Ds. Ciwaruga, Kabupaten Bandung Barat, Indonesia

¹wildan.anugrah.tele421@polban.ac.id, ^{2*}farrah.vauzia@polban.ac.id, ³enceng.sulaeman@polban.ac.id

ABSTRAK

RF *energy harvesting* merupakan salah satu teknologi yang bertujuan untuk mengonversi sinyal gelombang radio menjadi energi listrik dalam jumlah kecil, yang kemudian dapat digunakan untuk mengoperasikan perangkat elektronik berdaya ultra-rendah seperti sensor nirkabel, perangkat IoT, dan sistem *monitoring* jarak jauh. Tantangan utama dalam proses ini adalah rendahnya daya *input* yang dapat ditangkap oleh antena, terutama ketika sumber sinyal RF berada pada jarak jauh. Untuk meningkatkan efisiensi konversi daya, digunakan metode DC *combination* dalam topologi rangkaian penyearah. Topologi DC *Combiner* ini dirancang untuk menggabungkan *output* dari beberapa jalur penyearah secara paralel untuk memaksimalkan tegangan *output* yang dihasilkan. Selain itu, sistem juga dilengkapi dengan unit pengelola daya (*Power Management Unit/PMU*) yang berfungsi untuk mengatur distribusi daya secara optimal agar sesuai dengan kebutuhan beban. Proses pengujian dilakukan dengan variasi jarak antara antena pemancar dan penerima, serta dalam kondisi *Line of Sight (LOS)*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu menghasilkan tegangan *output* maksimum sebesar 2,22 mV pada jarak 5 cm. Meskipun terjadi penurunan seiring bertambahnya jarak, sistem masih mampu menghasilkan tegangan sebesar -0,17 mV pada jarak 25 cm. Performa sistem juga dipengaruhi oleh orientasi antena dan nilai beban keluaran. Dengan hasil ini, sistem RF *energy harvesting* yang dirancang diharapkan dapat menjadi solusi potensial untuk mendukung aplikasi perangkat elektronik berdaya sangat rendah secara berkelanjutan tanpa ketergantungan pada sumber daya eksternal konvensional.

Kata kunci: RF *energy harvesting*, DC *Combiner*, penyearah, *ultra-low power*, PMU

ABSTRACT

RF *energy harvesting* is a technology aimed at converting radio frequency (RF) signals into small amounts of electrical energy, which can then be used to power ultra-low-power electronic devices such as wireless sensors, IoT systems, and remote monitoring equipment. The main challenge in this process lies in the low input power levels captured by the antenna, especially when the RF source is located at a significant distance. To improve power conversion efficiency, a DC combination method is applied in the rectifier circuit topology. This DC *Combiner* topology is designed to merge the outputs from multiple rectification paths in parallel to maximize the resulting output voltage. Additionally, the system is equipped with a Power Management Unit (PMU) to optimally regulate power distribution according to load requirements. Experimental testing was conducted by varying the distance between the transmitting and receiving antennas under Line of Sight (LOS) conditions. The results show that the system is capable of generating a maximum output voltage of 2.22 mV at a distance of 5 cm. Although the voltage decreases as the distance increases, the system still delivers a measurable voltage of -0.17 mV at 25 cm. The system's performance is also influenced by antenna orientation and output load values. These results indicate that the proposed RF *energy harvesting* system has the potential to support ultra-low-power electronic applications in a sustainable manner, reducing dependency on conventional external power sources.

Keywords: RF *energy harvesting*, DC *combiner*, rectifier, *ultra-low power*, PMU

1. PENDAHULUAN

Seiring dengan meningkatnya kebutuhan akan perangkat elektronik portabel dan sistem komunikasi nirkabel, efisiensi daya menjadi salah satu fokus utama dalam pengembangan teknologi modern. Perangkat seperti sensor nirkabel, dan sistem komunikasi jarak pendek, semakin membutuhkan solusi dengan konsumsi daya ultra rendah untuk memperpanjang masa pakai baterai atau bahkan beroperasi secara mandiri tanpa sumber daya eksternal konvensional. Dalam konteks ini, penyearah

(*rectifier*) berperan penting dalam mengkonversi energi dari sinyal *Radio Frequency* (RF) menjadi energi listrik yang dapat digunakan oleh perangkat. *Radio Frequency Energy Harvesting* (RFEH) merupakan teknik yang memungkinkan konversi gelombang elektromagnetik menjadi energi listrik, dan kini menjadi solusi potensial dalam mendukung keberlangsungan sistem komunikasi nirkabel yang hemat energi. Berbeda dengan sumber energi lainnya seperti matahari atau getaran, RF memiliki keunggulan dalam ketersediaan energi yang stabil dan dapat dikontrol, baik dari sumber RF seperti pemancar khusus, maupun dari sumber *ambient* seperti menara TV atau sinyal WiFi [1], [2], [3], [4].

Namun, RFEH menghadapi tantangan berupa rendahnya tingkat daya RF yang diterima, serta efisiensi konversi RF ke DC yang bergantung pada elemen-elemen seperti desain antenna, rangkaian penyearah, serta jaringan pencocokan impedansi. Faktor-faktor seperti jarak antara pemancar dan penerima, variabilitas daya RF yang masuk, serta ketidaksesuaian impedansi sangat mempengaruhi efisiensi konversi daya [5] dan menekankan pentingnya adanya *Impedance Matching Circuit* (IMC) antara antenna dan rangkaian penyearah, karena impedansi penyearah yang berubah-ubah berdampak pada efisiensi dan refleksi sinyal [6]. Adapun Dalam sistem RF *energy harvesting* salah satunya dengan metode DC *combination* adalah metode penggabungan *output* DC dari beberapa unit penyearah (*rectifier*) yang masing-masing menerima sinyal RF dari antenna yang berbeda. Dalam pendekatan ini, setiap antenna dipasangkan dengan rangkaian penyearahnya sendiri, lalu hasil tegangan DC dari masing-masing rangkaian tersebut digabungkan untuk menghasilkan satu *output* total [7].

Frekuensi 868 MHz dipilih karena termasuk dalam pita frekuensi yang diizinkan penggunaannya untuk perangkat berkomunikasi jarak dekat. Hal ini sesuai dengan ketentuan dari lembaga pengatur komunikasi di wilayah Eropa, yang menyatakan bahwa frekuensi ini boleh digunakan secara bebas untuk perangkat yang hanya beroperasi dalam jangkauan terbatas, seperti alat sensor, sistem otomatisasi, dan alat pemantau yang tidak memerlukan daya pancar besar. Karena termasuk kategori perangkat jarak pendek, maka tidak dibutuhkan izin khusus selama penggunaannya sesuai dengan aturan yang berlaku, seperti batas daya pancar dan rentang frekuensi. Kemudahan ini menjadikan 868 MHz sebagai pilihan yang umum dan praktis untuk berbagai keperluan, termasuk sistem pemanfaatan energi dari gelombang radio (RF *energy harvesting*), yang umumnya ditujukan untuk perangkat berdaya rendah yang tidak selalu terhubung ke sumber listrik [8]. Penelitian lain oleh Antwi Nimo dan timnya menunjukkan hasil pengujian sistem *Rectenna* di dalam ruangan menggunakan pemancar 1 Watt pada frekuensi 868 MHz, dengan ukuran antenna penerima sekitar 6 cm × 8 cm. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa sistem ini mampu menghasilkan tegangan DC sebesar 1 Volt pada jarak 13 meter, dan tetap menghasilkan 0,4 Volt pada jarak 20 meter dengan beban 0,5 MΩ. Hal ini membuktikan bahwa frekuensi 868 MHz sangat ideal untuk aplikasi pemanen energi RF pada lingkungan dalam ruangan dan mampu menyediakan energi yang cukup untuk perangkat elektronik sederhana tanpa perlu baterai [9].

Beberapa penelitian sebelumnya telah dilakukan dalam mengembangkan sistem penyearah untuk aplikasi RF *energy harvesting* dengan berbagai pendekatan topologi dan rentang frekuensi kerja. Ali et al. [10] mengusulkan topologi penyearah bertingkat Cockcroft-Walton yang bekerja pada frekuensi 900 MHz dan menghasilkan tegangan *output* antara 0,220 V hingga 17,36 V untuk *input* RF antara -20 dBm hingga 20 dBm. Sementara itu, Davatgaran dan Raju [11] memanfaatkan konverter *boost* BQ25504 pada frekuensi 868 MHz dengan *input* sebesar -19 dBm dan menghasilkan tegangan hingga 2,85 V. Penelitian oleh Sebastian et al. [12] menggunakan penyearah gelombang penuh (*full-wave rectifier*) pada frekuensi 868 MHz, 920–960 MHz, dan 1,8 GHz yang menghasilkan rata-rata tegangan sebesar 580 mV pada *input* -10,7 dBm. Jolly et al. [13] mengembangkan sirkuit penyearah tiga tahap pada frekuensi 915 MHz dan menghasilkan tegangan *output* hingga 6 V pada *input* 8 dBm.

Penelitian lainnya oleh Elsheakh et al. [14] merancang rangkaian penyearah *quad-band* menggunakan dioda Schottky SMS-7630-061 yang mampu bekerja pada frekuensi 1,8 GHz dan 2,45 GHz, menghasilkan tegangan *output* berkisar antara 1,3–30 mV dan 0,2–46 mV secara berturut-turut untuk variasi *input* 0–20 dBm. Assimonis et al. [15] menggunakan konfigurasi rangkaian seri dengan dua dioda pada frekuensi 868 MHz dengan *input* RF -30 dBm dan menghasilkan tegangan sebesar 29,3 mV. Liu et al. [16] mengembangkan struktur penyearah dengan *input* independen pada dua frekuensi, yaitu GSM900 (915 MHz) dan GSM1800 (1800 MHz), menghasilkan tegangan hingga 6,2 V pada beban 2,1 kΩ untuk rentang *input* -15 hingga 20 dBm. Adapun Khemar et al. [17] mengembangkan *dual-band rectenna* yang bekerja pada frekuensi 868 MHz, UMTS, dan GSM1800 dengan *input* sebesar -8 dBm dan tegangan *output* sebesar 360 mV.

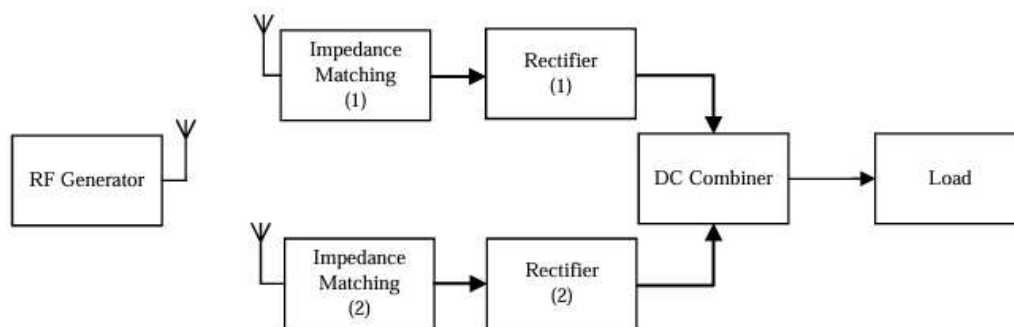
Tujuan penelitian ini dibahas pendekatan dalam sistem RF *energy harvesting* dengan memanfaatkan sumber 2 *input* RF yaitu menggunakan antenna LoRa 868 Mhz dan topologi penyearah *Dickson Charge Pump* dua tingkat dikombinasikan dengan metode DC *Combiner*. Dengan penggunaan dioda Schottky HSMS-2822 yang memiliki karakteristik tegangan ambang rendah, sistem dirancang untuk konversi daya RF ke DC pada level daya ultra rendah.

2. METODE PENELITIAN

Pembuatan rangkaian penyearah dengan metode DC *Combiner* memiliki beberapa tahapan seperti pembuatan rancangan *Power Management Unit* (PMU), perancangan sistem secara elektronik, pembuatan rangkaian rangkaian penyesuaian impedansi pada jalur PCB serta pembuatan *layout* PCB.

2.1 Diagram Blok Power Management Unit (PMU)

Prinsip kerja dari sistem pada Gambar 1 *Power Management Unit* (PMU) yang berdasarkan diagram blok sistem dimulai dengan penerimaan tegangan keluaran dari rangkaian penyearah RF yang berfungsi mengubah sinyal gelombang radio (RF) menjadi tegangan DC. Karena daya dan tegangan yang dihasilkan dari proses ini sangat rendah, maka diperlukan tahapan pemrosesan lebih lanjut. Tegangan DC dari *output* penyearah ini akan dialirkan menuju DC *Combiner*, yang berfungsi menggabungkan dan menstabilkan tegangan dari beberapa sumber atau jalur penyearah.

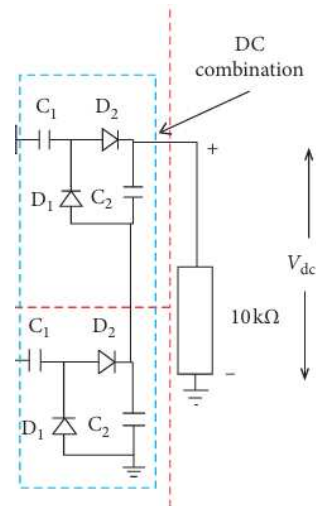


Gambar 1. Diagram blok sistem power management unit (PMU)

2.2 Perancangan Elektronik

Dioda Schottky merupakan jenis dioda khusus yang memiliki tegangan maju lebih rendah dibandingkan dioda biasa. Saat arus mengalir melalui dioda, terdapat hambatan internal yang menyebabkan penurunan tegangan di terminal *input* dioda menjadi kecil. Umumnya, dioda konvensional memiliki tegangan maju sekitar 0,7 hingga 1,7 volt, sedangkan dioda Schottky hanya sekitar 0,15 hingga 0,45 volt [18].

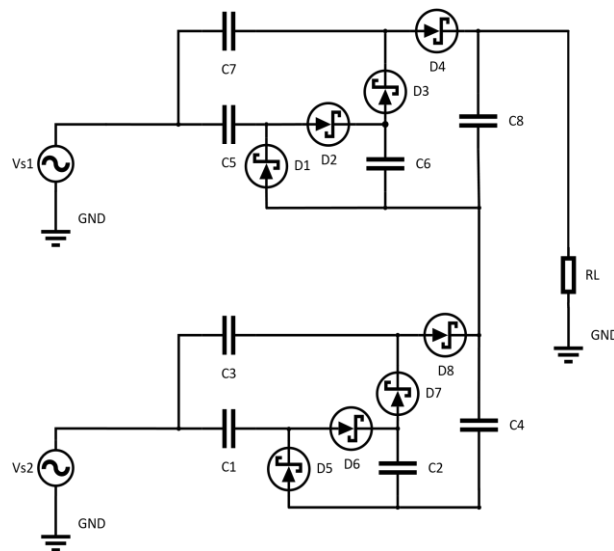
Pada Gambar 2 Terdapat dua rangkaian *rectifier* yang digabungkan menunjukkan kinerja yang beragam tergantung pada kondisi frekuensi *input* dan karakteristik komponen. Pada sistem ini, digunakan dua antenna yang masing-masing dirancang untuk menerima sinyal dari lingkungan pada frekuensi berbeda, yaitu antenna *multiband* (GSM, Wi-Fi) dan antenna FM (sekitar 98 MHz). Setelah sinyal ditangkap, masing-masing jalur antenna meneruskan sinyal RF ke rangkaian *rectifier* khusus yang kemudian mengubahnya menjadi tegangan DC. Penggabungan dua jalur DC ini dilakukan pada satu titik *output* melalui pendekatan DC *combination* [7].



Gambar 2. Skematik rangkaian DC combination

Gambar 2 menunjukkan konfigurasi dasar dari rangkaian penyearah bertingkat (*2-stage*) yang diintegrasikan dengan pendekatan kombinasi ganda (*DC-combiner*). Topologi ini dirancang untuk meningkatkan efisiensi konversi daya dari sinyal RF (*Radio Frequency*) menjadi daya DC dalam aplikasi *RF energy harvesting* dengan daya sangat rendah (*ultra-low power*).

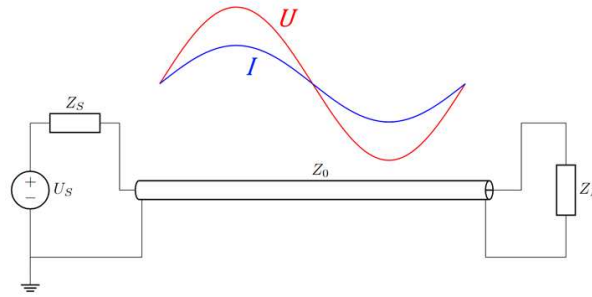
Kemudian pada Gambar 3 konfigurasi ini, terdapat dua jalur *input* sinyal RF yang masing-masing bekerja secara paralel. Setiap jalur terdiri dari dua tahap penggandaan tegangan (*2-stage multiplier*) yang menggunakan komponen dioda Schottky yang memiliki tegangan ambang (*threshold voltage*) rendah dan respons cepat terhadap frekuensi tinggi dan kapasitor sebagai elemen penyimpanan dan mengalihkan muatan listrik. Setiap tahap bekerja dengan prinsip dasar *charge pump*, yaitu mengalihkan muatan dari satu kapasitor ke kapasitor berikutnya melalui dioda, sehingga menghasilkan tegangan *output* yang lebih tinggi dibandingkan dengan tegangan *input* pada masing-masing jalur.



Gambar 3. Skematik diagram rangkaian

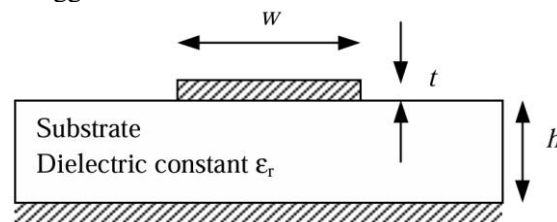
2.3 Rangkaian Penyesuaian Impedansi pada jalur PCB

Pada Gambar 4 menunjukkan skema dasar dari sistem transmisi sinyal menggunakan saluran transmisi, tujuannya adalah untuk memastikan seluruh energi sinyal dapat ditransmisikan secara efisien tanpa adanya pantulan kembali ke sumber. Ketika impedansi tidak cocok, sebagian energi akan dipantulkan, membentuk *standing wave* yang dapat menyebabkan distorsi sinyal dan kerugian daya. Oleh karena itu, pencocokan impedansi sangat penting untuk memaksimalkan efisiensi pengalihan daya dan menjaga kualitas sinyal dalam sistem RF [19].



Gambar 4. Sirkuit diagram pada jalur transmisi

Pada Gambar 5 menunjukkan struktur jalur mikrostrip pada desain jalur tembaga PCB pada kebutuhan rangkaian frekuensi tinggi.



Gambar 5. Permukaan mikrostrip

Berikut pada Tabel 1 menjelaskan simbol-simbol yang digunakan dalam struktur jalur mikrostrip pada PCB. Parameter-parameter ini sangat penting dalam perancangan jalur transmisi berimpedansi terkendali, khususnya untuk aplikasi frekuensi tinggi.

Tabel 1. Elemen penting pada jalur mikrostrip

Simbol	Keterangan
w	Lebar jalur Tembaga
t	Ketebalan Jalur Tembaga
h	jarak jalur tembaga dan ground plane
ϵ_r	Konstanta dielektrik dari substrat

Untuk menghitung impedansi karakteristik jalur mikrostrip, digunakan pendekatan matematis oleh IPC-2141. Rumus yang digunakan mempertimbangkan pengaruh ketebalan jalur terhadap lebar efektif (w'), dan konstanta dielektrik substrat (ϵ_r).

$$Z_0 = \frac{87.0}{\sqrt{\epsilon_r + 1.41}} \ln \left(\frac{5.98h}{0.8w + t} \right) \quad (1)$$

Dengan:

Z_0 = impedansi karakteristik (Ω)

ϵ_r = konstanta dielektrik dari substrat

h = jarak antara jalur tembaga dan *ground plane*

w = lebar jalur tembaga

t = ketebalan jalur tembaga

Perhitungan *impedance matching* pada PCB bertujuan untuk memastikan bahwa impedansi antara jalur transmisi dan beban (atau antar blok rangkaian) berada dalam kondisi serasi, sehingga refleksi sinyal dapat diminimalkan dan pengalihan daya menjadi optimal, terutama pada sistem yang beroperasi dalam frekuensi tinggi. Komponen induktor konvensional yang biasa digunakan sebagai bagian dari jaringan pencocokan impedansi dapat digantikan oleh jalur mikrostrip yang dirancang pada lapisan

PCB. Jalur mikrostrip memiliki karakteristik induktif atau kapasitif tergantung pada panjang, lebar, dan konfigurasi geometri yang digunakan [20]. Tercantum spesifikasi PCB yang digunakan pada Tabel 2 diantaranya lebar jalur tembaga, ketebalan jalur tembaga, jarak jalur, *ground plane*, dan konstanta dielektrik dari substratnya.

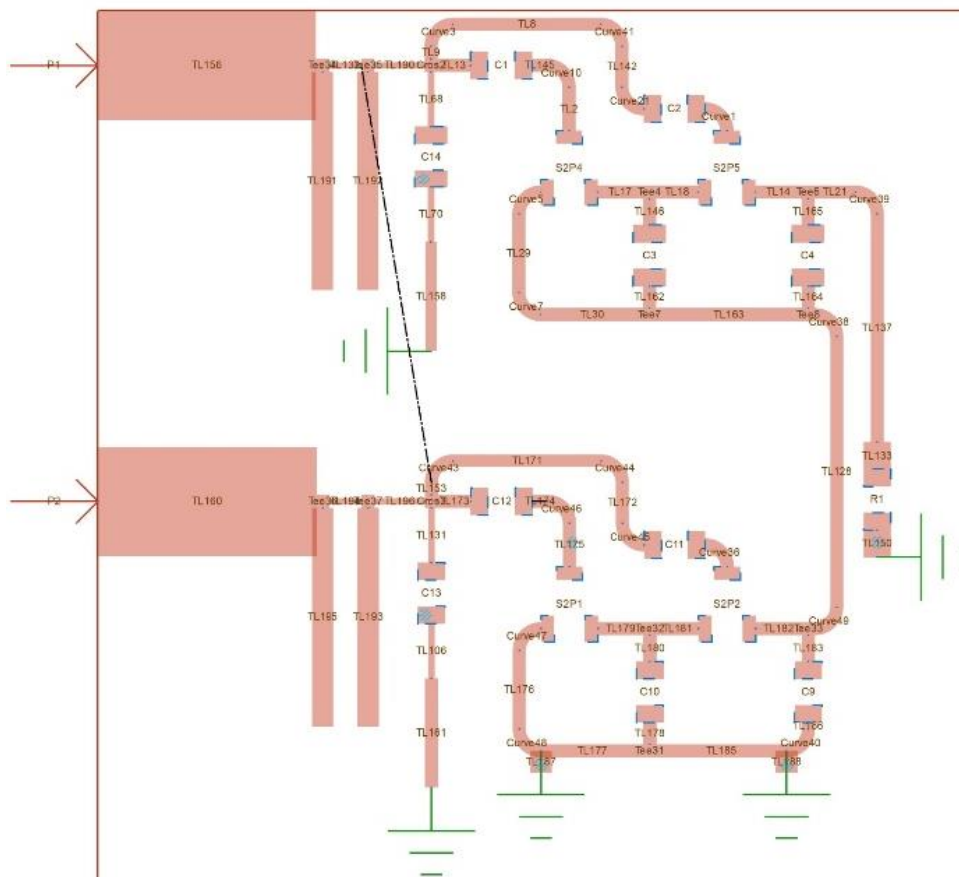
Tabel 2. Elemen parameter yang digunakan pada PCB Rogers 5880 dan ukuran jalur mikrostrip

Parameter	Keterangan
w	4 mm
t	0,018 mm
h	1,575 mm
ϵ_r	2,20

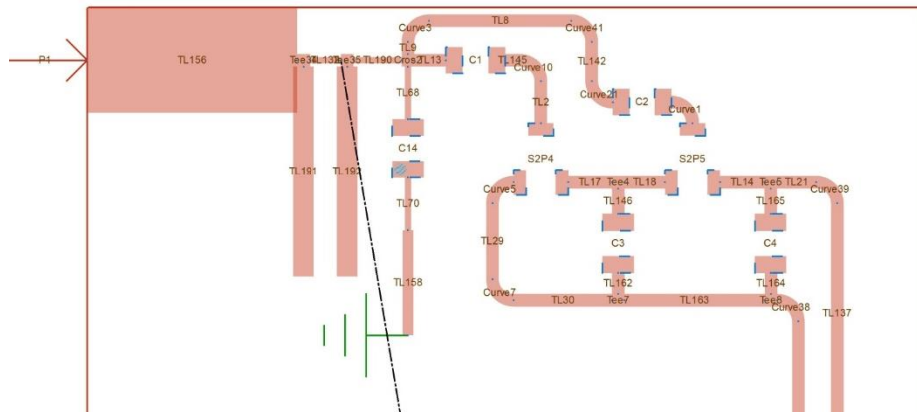
Dengan menggunakan persamaan analitis (1) seperti dari IPC-2141, diperoleh nilai impedansi karakteristik (Z_0) dari jalur *microstrip* $Z_0 = 49,23 \Omega$.

2.4 Perancangan Layout PCB

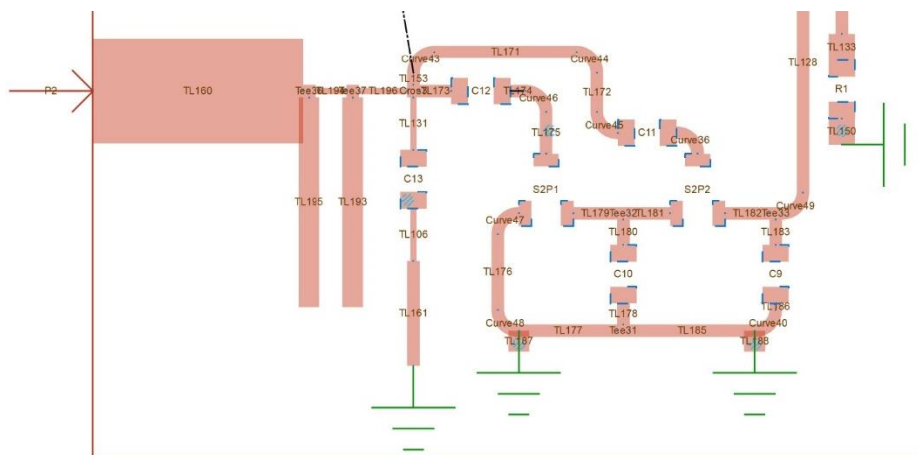
Pada tahap yang ditunjukkan pada Gambar 6, Gambar 7, dan Gambar 8 dilakukan perancangan jalur konduktor dengan mempertimbangkan lebar jalur, jarak antar jalur, serta bentuk geometri yang sesuai untuk menjaga impedansi karakteristik tetap stabil. Untuk aplikasi frekuensi tinggi, digunakan struktur jalur khusus seperti mikrostrip *line*, yang dipengaruhi oleh parameter substrat seperti konstanta dielektrik, ketebalan lapisan tembaga, dan tinggi substrat.



Gambar 6. Perancangan layout PCB



Gambar 7. Perspektif rangkaian penyearah pertama



Gambar 8. Perspektif rangkaian penyearah kedua

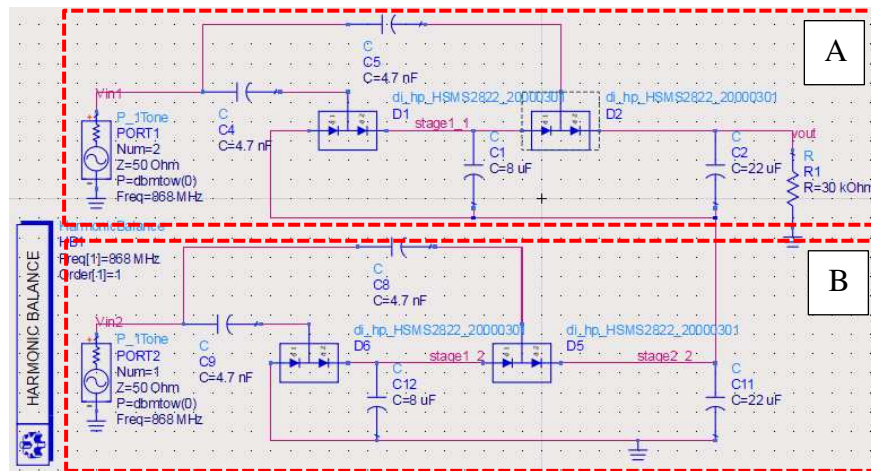
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil dan pembahasan mencakup pembahasan simulasi menggunakan pemodelan *software*, *impedance matching*, dan pengukuran *output DC* pada realisasi penyearah DC *Combiner*.

3.1 Simulasi menggunakan pemodelan *software*

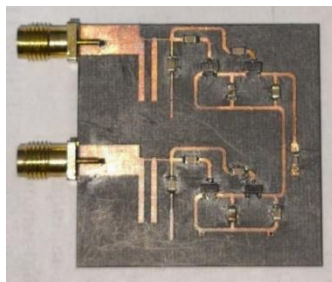
Pada tahap ini dilakukan simulasi terhadap rangkaian *Combiner/Combination Rectifier* berbasis topologi *Dickson Charge Pump* untuk aplikasi konversi energi frekuensi radio (RF) menjadi tegangan DC. Simulasi dilakukan untuk memverifikasi performa rangkaian dalam mengoptimalkan efisiensi penyearahan serta meningkatkan tegangan *output* melalui mekanisme penggabungan *input* dari beberapa sumber sinyal RF. Topologi *Dickson* dipilih karena kemampuannya dalam menggandakan tegangan secara bertingkat menggunakan elemen dioda dan kapasitor yang tersusun dalam konfigurasi berulang. Dalam simulasi ini, model dilakukan dengan memperhatikan parameter frekuensi kerja, amplitudo sinyal *input*, nilai elemen pasif (kapasitor dan dioda), serta beban keluaran.

Gambar 9 menunjukkan skema simulasi *Combination Rectifier* berbasis *Dickson Charge Pump* yang dirancang untuk aplikasi RF *Energy Harvesting* pada frekuensi kerja 868 MHz. Rangkaian ini menggunakan dua jalur *input* yang masing-masing diberi sinyal RF melalui port sumber *PORT 1* dan *PORT 2*, dengan impedansi masukan 50 ohm dan daya masukan 0 dBm, adapun rangkaian penyearah pertama dengan tanda garis terputus (A), sedangkan rangkaian penyearah kedua di tandai dengan garis terputus (B), dimana kedua rangkaian ini dengan sistem DC *Combiner*.



Gambar 9. Skematik rangkaian penyearah *Dickson* dengan DC combiner

Rangkaian terdiri dari elemen-elemen seperti jalur transmisi mikrostrip, kapasitor *pad*, sambungan T-Junction mikrostrip, dua buah *input* RF yaitu Antena 868Mhz, serta dioda schottky tipe HSMS-2822 yang berfungsi sebagai penyearah utama untuk mengubah sinyal RF menjadi energi listrik DC. Substrat yang digunakan memiliki konstanta dielektrik sebesar 2,2 dengan ketebalan 1,575 mm, yang menunjukkan penggunaan material berkarakteristik rugi rendah dan cocok untuk frekuensi tinggi. Desain ini dioptimalkan agar sinyal RF yang masuk dapat diterima secara maksimal melalui proses pencocokan impedansi (*impedance matching*), sehingga energi yang ditangkap tidak banyak terbuang akibat refleksi.

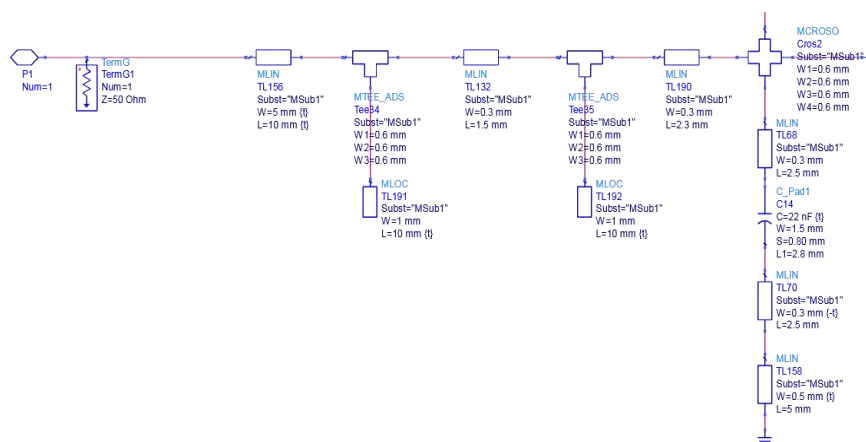


Gambar 10. Hasil realisasi elektronik

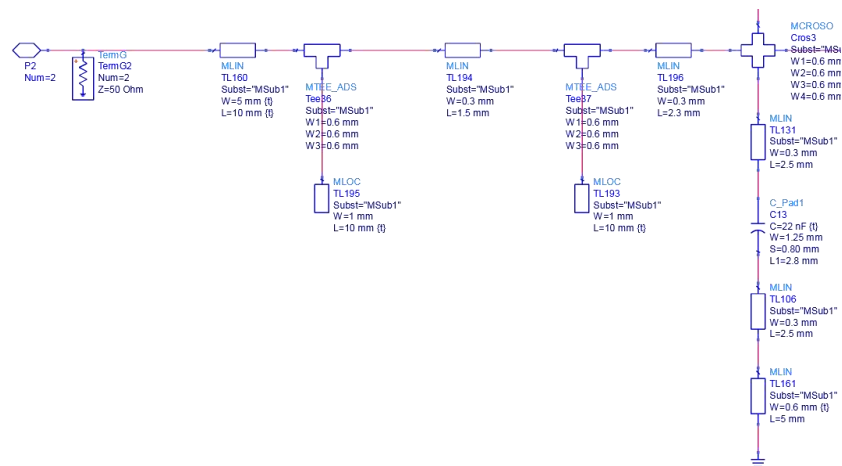


Gambar 11. Hasil realisasi elektronik keseluruhan

3.2 Impedance Matching



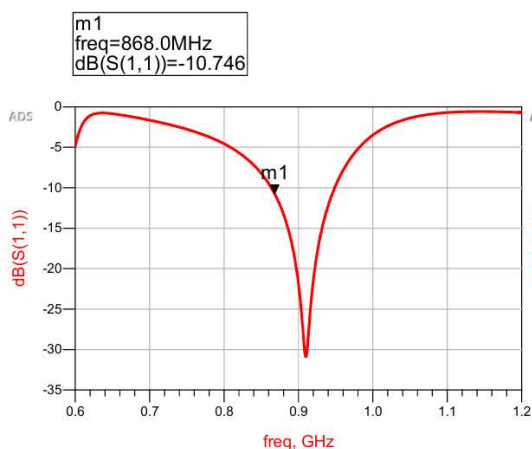
Gambar 12. Skematik jalur mikrostrip untuk *input port 1 impedance matching*



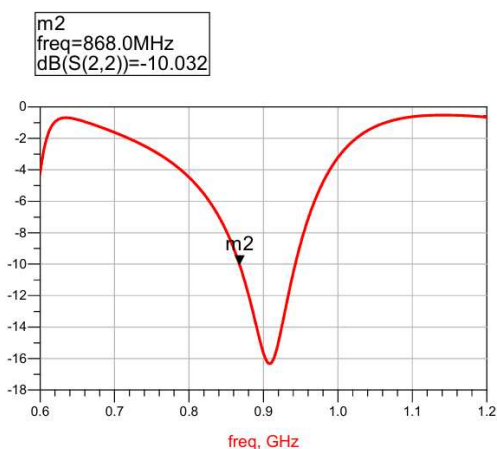
Gambar 13. Skematik jalur mikrostrip untuk *input port 2* impedance matching

Rangkaian pada Gambar 12 dan Gambar 13 merupakan hasil desain menggunakan perangkat lunak simulasi, dan belum direalisasikan secara fisik pada PCB. Tujuannya adalah untuk memastikan bahwa semua komponen termasuk *stub*, MLIN (*microstrip line*), MTEE (*junction*), dan komponen diskrit seperti kapasitor telah memiliki karakteristik impedansi yang sesuai.

Sebagai validasi dari pencocokan impedansi tersebut, dilakukan analisis terhadap parameter S , yaitu S_{11} dan S_{22} , yang menggambarkan besarnya pantulan sinyal dari *input* dan *output*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pada frekuensi kerja 868 MHz, nilai S_{11} berada pada -10,746 dB pada Gambar 14, sementara S_{22} tercatat sebesar -10,032 dB Pada Gambar 15. Nilai ini menandakan bahwa sebagian besar energi RF yang diterima berhasil diserap oleh rangkaian, karena nilai S_{11} yang lebih rendah dari -10 dB menunjukkan tingkat refleksi yang kecil pada sisi *input*, hal serupa juga terlihat dari nilai S_{22} .



Gambar 14. Hasil S_{11} sebagai *port 1*



Gambar 15. Hasil S_{22} sebagai *port 2*

3.3 Pengukuran *Output DC* pada Realisasi Penyearah DC Combiner

Data pengukuran pada rangkaian penyearah DC Combiner ini diperoleh melalui dua skenario pengujian utama. Pengujian pertama dilakukan pada kondisi *Line of Sight* (LOS) dengan menggunakan beban sebesar 30 k Ω dan daya *input* RF (P_{in}) sebesar 0 dBm. Sementara itu, pengujian kedua dilakukan pada kondisi *Non Line of Sight* (NLOS) dengan beban sebesar 100 k Ω dan daya *input* sebesar 2 dBm. Masing-masing pengujian mencatat nilai tegangan dan arus *output* pada beban menggunakan alat ukur *digital*, sehingga diperoleh gambaran kinerja dan efisiensi konversi daya dari rangkaian dalam dua kondisi yang berbeda.

Berdasarkan hasil pengukuran pada Gambar 16 yang telah dibuat berisi data tegangan *output* yang dihasilkan oleh rangkaian penyearah DC Combiner pada berbagai variasi daya *input* RF (P_{in}) 2dBm dan nilai beban 30K Ω pada kondisi LOS (*Line of Sight*).



Gambar 16. Hasil grafik penyearah DC combiner pada kondisi LOS

Pada daya *input* 2 dBm dan beban 30k Ohm, tegangan *output* tertinggi tercapai saat jarak 5 cm dengan posisi antenna lurus (2,22 mV). Seiring bertambahnya jarak, tegangan *output* menurun drastis dan menjadi negatif di semua posisi pada jarak di atas 10 cm. Posisi lurus memberikan hasil terbaik pada jarak dekat, namun pengaruh posisi menjadi tidak signifikan pada jarak lebih jauh. Hal ini menunjukkan efisiensi *energy harvesting* sangat dipengaruhi oleh jarak dan orientasi antenna dengan performa optimal hanya pada jarak sangat dekat.

Kemudian hasil pengukuran pada Gambar 17 yang telah dibuat berisi data tegangan *output* yang dihasilkan oleh rangkaian *energy harvesting* pada berbagai variasi daya *input* RF (P_{in}) 2dBm dan nilai beban 100K Ω pada kondisi NLOS (*None Line of Sight*).



Gambar 17. Hasil grafik rangkaian *energy harvesting* pada kondisi NLOS

Pada kondisi *NLOS* dengan beban 100k Ohm dan *input* 2 dBm, tegangan *output* tertinggi tercapai pada posisi serong kiri dengan jarak 5 cm (4,5 mV). Tegangan *output* menurun tajam seiring bertambahnya jarak di semua posisi. Pada posisi lurus dan serong kanan, tegangan *output* menjadi negatif pada jarak di atas 15 cm, sedangkan pada serong kiri meskipun menurun, nilai *output* tetap positif hingga jarak 25 cm. Hal ini menunjukkan bahwa pada kondisi *NLOS* posisi antenna sangat mempengaruhi hasil, dan pantulan sinyal di lingkungan sekitar.

Kemudian, hasil pengujian terhadap konfigurasi jarak dan orientasi antenna, diperoleh bahwa posisi antenna dalam orientasi lurus menunjukkan performa paling konsisten dalam menghasilkan tegangan *output*. Pada jarak 5 cm tegangan yang dihasilkan mencapai 2,22 mV, Seiring dengan bertambahnya jarak antara antenna pemancar dan penerima terjadi penurunan tegangan *output* secara bertahap. Meskipun demikian, pada jarak maksimum 25 cm tegangan masih terdeteksi sebesar -0,17mV. Hasil ini menunjukkan bahwa meskipun terjadi kenaikan daya *output* seiring dengan bertambahnya daya *input* atau perubahan posisi serta nilai beban, efisiensi penerapan penyearah pada implementasi *energy harvesting* secara umum masih sangat terbatas. Sebagian besar energi RF yang masuk ke rangkaian tidak dapat dikonversikan menjadi daya listrik pada beban akibat adanya berbagai rugi-rugi, seperti redaman sinyal, serta karakteristik komponen penyearah.

4. KESIMPULAN

Hasil pengujian dan analisis pada rangkaian penyearah dengan metode DC *combiner* diperoleh beberapa kesimpulan utama. Tegangan dan daya *output* yang dihasilkan sangat dipengaruhi oleh besar daya RF yang masuk, nilai beban yang digunakan, serta konfigurasi posisi dan jarak antena. Tegangan *output* tertinggi tercapai saat antena diposisikan lurus dengan jarak terdekat antara pemancar dan penerima, yaitu sebesar 2,22 mV pada jarak 5 cm. Meskipun terjadi penurunan tegangan seiring bertambahnya jarak, *output* masih dapat terukur, seperti pada jarak 25 cm yang menghasilkan tegangan -0,17 mV. Sistem ini menggunakan konfigurasi penyearahan DC *combiner*, yang menggabungkan dua jalur penyearah untuk meningkatkan performa pengumpulan daya. Penggabungan ini *output* daya menunjang lebih stabil dan optimal dibandingkan penggunaan satu jalur penyearah saja.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Laboratorium Telekomunikasi, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Bandung, atas dukungan dan bantuan fasilitas yang telah diberikan selama kegiatan penelitian ini berlangsung.

REFERENSI

- [1] X. Lu, P. Wang, D. Niyato, D. I. Kim, and Z. Han, "Wireless networks with rf energy harvesting: A contemporary survey," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 17, no. 2, pp. 757–789, Apr. 2015, doi: 10.1109/COMST.2014.2368999.
- [2] A. Mouapi, "Radiofrequency Energy Harvesting Systems for Internet of Things Applications: A Comprehensive Overview of Design Issues," Nov. 01, 2022, *MDPI*. doi: 10.3390/s22218088.
- [3] X. Liu, M. Li, X. Chen, Y. Zhao, L. Xiao, and Y. Zhang, "A Compact RF Energy Harvesting Wireless Sensor Node with an Energy Intensity Adaptive Management Algorithm," *Sensors (Basel)*, vol. 23, no. 20, Oct. 2023, doi: 10.3390/s23208641.
- [4] L. xi Liu, J. chao Mu, N. Ma, W. Tu, Z. ming Zhu, and Y. tang Yang, "An Ultra-Low-Power Integrated RF Energy Harvesting System in 65-nm CMOS Process," *Circuits Syst Signal Process*, vol. 35, no. 2, pp. 421–441, Feb. 2016, doi: 10.1007/s00034-015-0092-7.
- [5] S. K. Divakaran, D. Das Krishna, and Nasimuddin, "RF energy harvesting systems: An overview and design issues," Jan. 01, 2019, *John Wiley and Sons Inc.* doi: 10.1002/mmce.21633.
- [6] N. U. Khan, F. U. Khan, M. Farina, and A. Merla, "RF energy harvesters for wireless sensors, state of the art, future prospects and challenges: a review," Jun. 01, 2024, *Springer Science and Business Media Deutschland GmbH*. doi: 10.1007/s13246-024-01382-4.
- [7] S. Roy, R. J. J. Tiang, M. Bin Roslee, M. T. Ahmed, and M. A. P. Mahmud, "Quad-Band Multiport Rectenna for RF Energy Harvesting in Ambient Environment," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 77464–77481, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3082914.
- [8] C. Merz, G. Kupris, and M. Niedernhuber, "Design and Optimization of a Radio Frequency Energy Harvesting System for Energizing Low Power Devices."
- [9] A. Nimo, T. Beckedahl, T. Ostertag, and L. Reindl, "Analysis of Passive RF-DC Power Rectification and Harvesting Wireless RF Energy for Micro-watt Sensors," *AIMS Energy*, vol. 3, no. 2, pp. 184–200, 2015, doi: 10.3934/energy.2015.2.184.
- [10] E. Mousa Ali, N. Z. Yahaya, P. Nallagownden, and M. A. Zakariya, "A novel rectifying circuit for microwave power harvesting system," *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, vol. 27, no. 4, May 2017, doi: 10.1002/mmce.21083.
- [11] S. D. Assimonis, V. Fusco, A. Georgiadis, and T. Samaras, "Efficient and Sensitive Electrically Small Rectenna for Ultra-Low Power RF Energy Harvesting," *Sci Rep*, vol. 8, no. 1, Dec. 2018, doi: 10.1038/s41598-018-33388-w.
- [12] A. Karampatea and K. Siakavara, "Synthesis of rectenna for powering micro-watt sensors by harvesting ambient RF signals' power," *Electronics (Switzerland)*, vol. 8, no. 10, Oct. 2019, doi: 10.3390/electronics8101108.
- [13] A. Jolly, M. Peer, V. A. Bohara, and S. Verma, "Design and Development of Dual-Band Multi-Stage RF Energy Harvesting Circuit for Low Power Applications."
- [14] D. Elsheakh, M. Farouk, H. Elsadek, and H. Ghali, "Quad-Band Rectenna for RF Energy Harvesting System," *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, vol. 12, no. 05, pp. 57–70, 2020, doi: 10.4236/jemaa.2020.125006.
- [15] S. D. Assimonis, S. N. Daskalakis, and A. Bletsas, "Sensitive and Efficient RF Harvesting Supply for Batteryless Backscatter Sensor Networks," *IEEE Trans Microw Theory Tech*, vol. 64, no. 4, pp. 1327–1338, Apr. 2016, doi: 10.1109/TMTT.2016.2533619.

-
- [16] Z. Liu, Z. Zhong, and Y. X. Guo, "Enhanced dual-band ambient RF energy harvesting with ultra-wide power range," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 25, no. 9, pp. 630–632, Sep. 2015, doi: 10.1109/LMWC.2015.2451397.
 - [17] A. Khemar, A. Kacha, H. Takhedmit, and G. Abib, "Design and experiments of a dual-band rectenna for ambient RF energy harvesting in urban environments," *IET Microwaves, Antennas and Propagation*, vol. 12, no. 1, pp. 49–55, Jan. 2018, doi: 10.1049/iet-map.2016.1040.
 - [18] Robert L. Boylestad and Louis Nashelsky, *Electronic Devices and Circuit Theory*, 11th Edition. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 2013.
 - [19] A. Söderström and L. Tunberg, "High-Power Microstrip Directional Couplers: Design and Challenges for Miniaturization," 2024.
 - [20] A. J. Burkhardt, C. S. Gregg, and A. Staniforth, "Calculation of PCB Track Impedance."