

สายอากาศพื้นผิวอวกาศจัดเรียงกระแสเพื่อเก็บเกี่ยวพลังงานไร้สาย Metasurface Rectenna for Wireless Energy Harvesting

คมกฤษ บุญยั้ง¹ และ ทศพล ทิพย์โพธิ์²

¹สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ komkris.boon@rmutr.ac.th*

²สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ tossapol.tip@rmutr.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบสายอากาศพื้นผิวอวกาศจัดเรียงกระแสสำหรับการเก็บเกี่ยวพลังงานไร้สายจากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ โดยสายอากาศที่พัฒนาขึ้นมีโครงสร้างแบบไมโครสตริปชนิดขนานลอย พร้อมแผ่นแพร่กระจายคลื่นรูปวงกลมและรองรับโพลาริเซชันแบบคู่ ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการรับสัญญาณ โครงสร้างของชั้นวางซ้อนประกอบด้วยหน่วยเซลล์ในรูปแบบวงแหวนหกเหลี่ยมจำนวน 3×3 หน่วย ออกแบบมาเพื่อควบคุมทิศทางของการแพร่กระจายคลื่นได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้อัตราขยายของสายอากาศสูงกว่า 9 dBi สำหรับทั้งสองโพลาริเซชันที่ความถี่ 2.6 GHz ในส่วนของวงจรจัดเรียงกระแสเลือกใช้ไดโอดชอตต์กีรุ่น SMS7630 สามารถสร้างแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงได้สูงสุด 1.53 โวลต์ ที่ระดับกำลังงานขาเข้า 4 dBm โดยมีภาระโหลดเท่ากับ 3 k Ω จากการทดสอบสายอากาศภายใต้เงื่อนไขการโพลาริเซชันเส้นในแนวตั้งพบว่า ที่ระยะทาง 0.5 เมตร และมีระดับกำลังงาน EIRP เท่ากับ 16.4 dBm สายอากาศที่ได้นำเสนอสามารถผลิตแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงได้สูงสุด 0.289 โวลต์

คำสำคัญ: เก็บเกี่ยวพลังงานไร้สาย วงจรจัดเรียงกระแส และสายอากาศพื้นผิวอวกาศ

Abstract

This paper presents the design of a metasurface rectenna for wireless energy harvesting from mobile base stations. The proposed antenna features a suspended microstrip structure integrated with a circular radiation patch and supports dual linear polarization to enhance signal reception efficiency. The superstrate configuration incorporates a 3×3 of hexagonal ring-shaped unit cells, which are engineered to achieve directional radiation control effectively. As a result, the antenna achieves a gain exceeding 9 dBi for both polarizations at the operating frequency of 2.6 GHz. The rectifying circuit employs the SMS7630 Schottky diode, which provides a maximum direct current (DC) output voltage of 1.53 V under an input power level of 4 dBm with a load resistance of 3 k Ω . Experimental evaluation under vertically polarized excitation, at a distance of 0.5 meters and an equivalent isotropically radiated power (EIRP) of 16.4 dBm, shows that the proposed antenna is capable of generating a peak DC voltage of 0.289 V.

Keywords: wireless energy harvesting, rectifying circuit and metasurface antenna

1. บทนำ

สายอากาศจัดเรียงกระแส (Rectifying Antenna: Rectenna) ถือเป็นองค์ประกอบสำคัญของระบบเก็บเกี่ยวพลังงานไร้สาย (Wireless Energy Harvesting: WEH) ซึ่งมีบทบาทหลักในการแปลงพลังงานจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความถี่วิทยุ (Radio Frequency: RF) ให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current: DC) ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้โดยตรง ทั้งในด้านการชาร์จแบตเตอรี่และการจ่ายพลังงานให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กหรือระบบเซนเซอร์ที่ใช้พลังงานต่ำอย่างมีประสิทธิภาพ ([1]–[3]) เทคโนโลยีการเก็บเกี่ยวพลังงานไร้สายมีพื้นฐานจากแนวคิดของการส่งผ่านกำลังงานแบบไร้สาย (Wireless Power Transfer: WPT) ซึ่งมีจุดเริ่มต้นจากการค้นพบการแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดย ไฮน์ริช เฮิร์ตซ์ (Heinrich Hertz) เมื่อปี ค.ศ. 1888 และพัฒนาต่อยอดจนกระทั่ง นิโคลาส เทสลา (Nikola Tesla) สามารถสาธิตการแปลงพลังงานจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงได้สำเร็จเป็นครั้งแรกของโลกในปี ค.ศ. 1891 ([4]–[5]) ในปัจจุบัน เทคโนโลยีการส่งผ่านพลังงานไร้สายได้มีความก้าวหน้าอย่างต่อเนื่องและถูกนำไปประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในหลากหลายระบบ เช่น การส่งถ่ายพลังงานจากแหล่งพลังงานแสงอาทิตย์บนสถานีอวกาศมายังพื้นโลกผ่านคลื่นไมโครเวฟ ระบบชาร์จไฟแบบไร้สายสำหรับอุปกรณ์พกพา และระบบระบุตัวตนอัตโนมัติ (Radio Frequency Identification: RFID) ซึ่งต่างต้องอาศัยความสามารถของสายอากาศจัดเรียงกระแสในการแปลงคลื่นความถี่วิทยุให้กลายเป็นพลังงานไฟฟ้าที่พร้อมใช้งาน

โครงสร้างพื้นฐานของสายอากาศจัดเรียงกระแสสามารถแบ่งออกได้เป็นสององค์ประกอบหลัก ได้แก่ 1) สายอากาศ (Antenna) มีหน้าที่รับคลื่น RF จากแหล่งกำเนิดภายนอก และ 2) วงจรจัดเรียงกระแส (Rectifying Circuit) ทำหน้าที่แปลงสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุที่รับได้ให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง สำหรับวงจรจัดเรียงกระแส ประกอบด้วยส่วนประกอบสำคัญ ได้แก่ ตัวเก็บประจุเชื่อมต่อ (Coupling Capacitor) ที่ทำหน้าที่แยกสัญญาณ RF ออกจากไฟ DC, ไดโอดจัดเรียงกระแส (Rectifying Diode) ที่ทำหน้าที่แปลงสัญญาณ RF แบบสลับให้เป็นแรงดันแบบทางเดียว, วงจรกรองความถี่ต่ำ (Low-Pass Filter) ที่ทำหน้าที่กรองความถี่สูงออกจากสัญญาณที่แปลงแล้ว และตัวต้านทานโหลด (Load Resistor) สำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพการแปลงกำลังงานสามารถทำได้หลากหลายเทคนิควิธี อาทิเช่น การออกแบบสายอากาศต่อลำดับแถว ([6] – [7]) การออกแบบวงจรจัดเรียงกระแสไฟฟ้าให้มีหลายวงจร หรือการเพิ่มกำลังงานความถี่วิทยุทางด้านขาเข้า ([8] – [9]) การแทรกวงจรตัดขามิกเซอร์ไปยังวงจรจัดเรียงกระแสไฟฟ้า [10] และการเลือกประเภไดโอดเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพและแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขาออกสูงสุด [11]

จากการศึกษาวรรณกรรมที่ผ่านมา พบว่ามีการวิจัยจำนวนหนึ่งที่น่าสนใจในการออกแบบสายอากาศร่วมกับวงจรจัดเรียงกระแสเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเก็บเกี่ยวกำลังงานจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ตัวอย่างเช่น

*ผู้ประพันธ์บรรณกิจ

งานวิจัยใน [12] ได้นำเสนอการออกแบบสายอากาศแบบสองชั้น โดยชั้นบนสุดเป็นสายอากาศลักษณะสามแขนและชั้นล่างออกแบบเป็นร่องว่างรูปทรงดอกจิก ซึ่งช่วยส่งเสริมการรับคลื่นจากทิศทางต่างๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในส่วนของวงจรจัดเรียงกระแส เลือกใช้ไดโอดชอตต์กักรุ่น SMS7630 โดยผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสามารถแปลงกำลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีประสิทธิภาพการแปลงกำลังงาน สูงถึง 43% และสามารถนำแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้ไปใช้งานกับอุปกรณ์เช่น เซอร์หรือหลอด LED ได้โดยตรง ในขณะที่เดียวกัน งานวิจัยใน [13] ได้พัฒนาโครงสร้างสายอากาศล็อกพีริโอดิกบนแผ่นวงจรพิมพ์ซึ่งสามารถรองรับการทำงานใน 4 ย่านความถี่ ได้แก่ FM (89 MHz), GSM900 (900 MHz), GSM1800 (1,800 MHz) และ WiFi (2,400 MHz) โดยใช้ไดโอดชอตต์กักรุ่นเดียวกันคือ SMS7630 ผลการทดสอบแสดงค่าประสิทธิภาพการแปลงกำลังงานที่แตกต่างกันตามย่านความถี่ โดยมีค่าเท่ากับ 70.28%, 41.7%, 33.37% และ 27.69% ตามลำดับ และเมื่อทดสอบที่ระดับกำลังงาน -6 dBm พบว่าค่าประสิทธิภาพการแปลงอยู่ที่ 31.3%

สำหรับอภิวัด (Metamaterials) เป็นวัสดุประดิษฐ์ที่ได้รับการออกแบบเชิงวิศวกรรมเพื่อสร้างคุณสมบัติทางกายภาพที่ไม่สามารถพบได้ตามธรรมชาติ คุณสมบัติเหล่านี้เกิดจากโครงสร้างจุลภาคที่ถูกจัดเรียงอย่างมีแบบแผน มากกว่าการพึ่งพารูปทรงของวัสดุโดยตรง วัสดุย่อยที่นำมาประกอบมักมีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และสามารถมีคุณสมบัติแตกต่างกัน การรวมกันในลักษณะนี้นำไปสู่สมบัติประสิทธิผลใหม่ในระดับมหภาค ที่เปิดโอกาสต่อการพัฒนาอุปกรณ์ทางแม่เหล็กไฟฟ้าและการสื่อสารที่ก้าวหน้า ในช่วงสองทศวรรษที่ผ่านมา อภิวัดได้รับการศึกษาอย่างกว้างขวางในหลายสาขา ไม่ว่าจะเป็นออปติก ฟิสิกส์ของของแข็ง วิทยาศาสตร์วัสดุ และนาโนเทคโนโลยี ตัวอย่างที่โดดเด่นได้แก่ เลนส์สมบูรณ์ (Perfect Lens) เสื้อคลุมล่องหน (Invisibility Cloak) และวัสดุสำหรับระบบยานยนต์อัตโนมัติ ล่าสุดงานวิจัยด้านการสื่อสารไร้สายได้หันมาให้ความสำคัญกับการประยุกต์ใช้อภิวัดในสายอากาศ (Metamaterial Antennas) อาทิเช่น 1) การลดขนาดโครงสร้างสายอากาศ (Miniaturization) 2) การเพิ่มค่าอัตราขยายสายอากาศ (Gain Enhancement) หรือ พื้นผิวอภิวัดที่ได้นำเสนอในบทความวิจัยนี้ 3) การออกแบบอภิวัดเพื่อการทำแมตชิ่งอิมพีแดนซ์ และ 4) การสร้างสายอากาศที่รวมความสามารถ เช่น frequency selective surface (FSS), beam steering และการปรับ reconfigurable properties เพื่อรองรับการใช้งานที่หลากหลาย เป็นต้น สำหรับงานวิจัยนี้ได้ออกแบบสายอากาศพื้นผิวอภิวัดและวงจรจัดเรียงกระแสได้เลือกใช้ไดโอดชอตต์กักรุ่น SMS7630 ผลการทดสอบสายอากาศที่ได้นำเสนอพบว่าที่ระยะห่าง 0.5 เมตร และมีระดับกำลังงาน EIRP เท่ากับ 16.4 dBm สายอากาศที่ได้นำเสนอสามารถผลิตแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงได้สูงสุด 0.289 โวลต์

2. สายอากาศพื้นผิวอภิวัดจัดเรียงกระแส

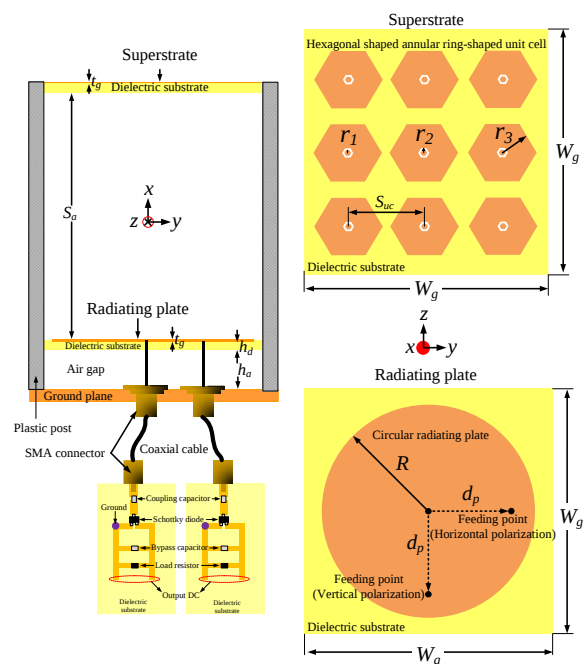
สายอากาศที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้ได้รับการจำลองด้วยซอฟต์แวร์ CST studio suit [14] โดยโครงสร้างที่ออกแบบเป็นสายอากาศชนิดแขวนลอย (Suspended) [15] มีการเว้นช่องว่างอากาศ (Air gap: h_a) ระหว่าง แผ่นแพร่กระจายคลื่น (Radiating plate) และระนาบกราวด์ (Ground plane) โดยโครงสร้างชนิดนี้มีอัตราขยายสูงกว่าโครงสร้างสายอากาศไมโครสตริปพื้นฐาน สำหรับแผ่นแพร่กระจายคลื่นออกแบบให้มีรูปร่างเป็นวงกลมพร้อมกระตุ้นสัญญาณโคแอกเซียล แบบโพลาไรซ์เชิงเส้น

คู่ คือ โพลาไรซ์เชิงเส้นแนวตั้งและแนวนอน (Vertical and horizontal polarizations) โดยมีระยะจุดศูนย์กลางแผ่นแพร่กระจายคลื่นถึงจุดกระตุ้นสัญญาณ (d_p) ดังรูปที่ 1 สำหรับวัสดุแผ่นวงจรพิมพ์ที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศเป็นชนิดอีพอกซี (Epoxy) มีความสูงเป็น h_d มีความหนา (t_g) ของแผ่นทองแดงเท่ากับ 0.035 mm มีค่าไดอิเล็กตริกคงที่ (ϵ_r) เท่ากับ 3.2 และค่าการสูญเสียแทนเจนต์ เท่ากับ 0.003 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 ขนาดและพารามิเตอร์ของสายอากาศพื้นผิวอภิวัดที่ได้นำเสนอ

พารามิเตอร์	ขนาด (มม.)	พารามิเตอร์	ขนาด (มม.)
W_g	80	R	28.62
h_d	1.6	r_1	1.26
h_a	6	r_2	1.96
d_p	18	r_3	11.24
S_a	100	S_{uc}	24.6

สำหรับชั้นวางซ้อน (Superstrate) ถูกวางเหนือสายอากาศชนิดแขวนลอยที่ได้กล่าวมาข้างต้น ประกอบด้วย หน่วยเซลล์ (Unit cell) มีขนาด 3×3 จำนวน 9 หน่วยเซลล์ แต่ละหน่วยเซลล์ออกแบบให้มีรูปร่างเป็นวงแหวนหกเหลี่ยม (Hexagonal annular ring-shaped) โดยมีรัศมีวงแหวนหกเหลี่ยมด้านใน (r_1) รัศมีช่องว่างวงแหวนหกเหลี่ยม (r_2) และรัศมีหกเหลี่ยมด้านนอก (r_3) นอกจากนี้ยังมีระยะห่างแต่ละหน่วยเซลล์คือ S_{uc} และมีระยะห่างระหว่างสายอากาศชนิดแขวนลอยกับชั้นวางซ้อนเป็น S_a แสดงขนาดต่างๆ ดังตารางที่ 1



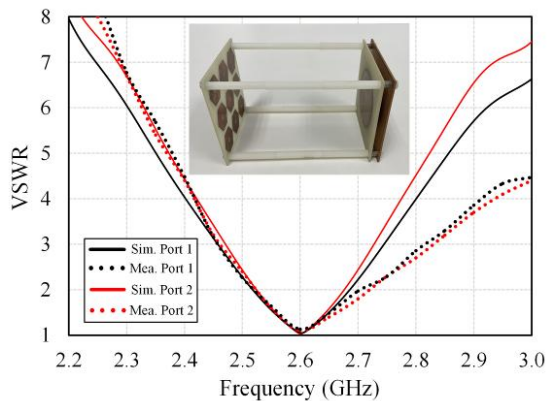
รูปที่ 1 โครงสร้างสายอากาศพื้นผิวอภิวัดจัดเรียงกระแสที่ได้นำเสนอ

3. การทดสอบสายอากาศพื้นผิวอภิวัดจัดเรียงกระแส

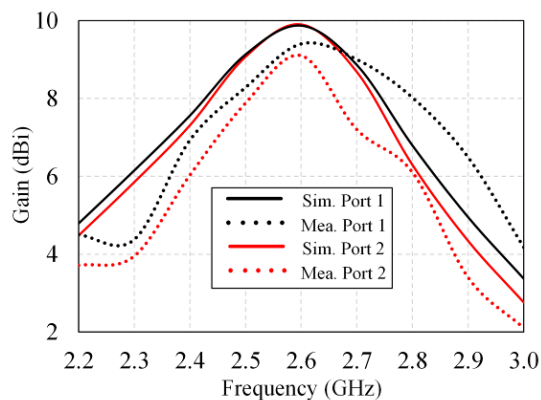
3.1 สายอากาศพื้นผิวอภิวัด

รูปที่ 2 แสดงผลการวิเคราะห์ทั้งจากการจำลองและการทดสอบจริงของอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Voltage Standing Wave Ratio: VSWR) สำหรับ

สายอากาศที่ได้ออกแบบขึ้นมา จากผลการจำลองพอร์ตที่ 1 ซึ่งทำงานในโพลาไรซ์เชิงเส้นแนวตั้ง มีแถบความถี่ที่ตอบสนองค่ามากที่สุดระหว่าง 2.524–2.676 GHz ในขณะที่พอร์ตที่ 2 ซึ่งรองรับโพลาไรซ์เชิงเส้นแนวนอน สามารถทำงานได้ในช่วงความถี่ 2.518–2.686 GHz โดยทั้งสองพอร์ตมีค่าคลื่นนิ่งไม่เกิน 2 ($VSWR \leq 2$)

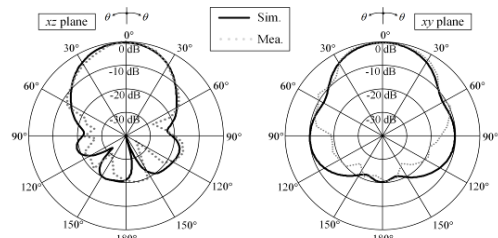


รูปที่ 2 ผลจำลองและผลทดสอบค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศพื้นผิวอภิวัดสุดท้าย

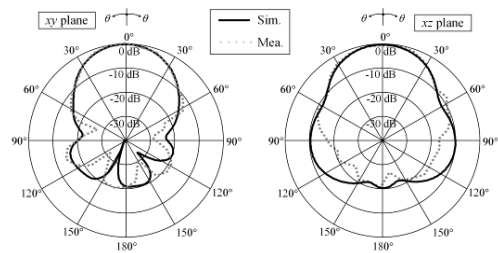


รูปที่ 3 ผลจำลองและผลทดสอบอัตราขยายของสายอากาศพื้นผิวอภิวัดสุดท้าย

จากผลการทดสอบพบว่า พอร์ตที่ 1 สามารถรองรับย่านความถี่ได้ในช่วง 2.57–2.72 GHz ขณะที่พอร์ตที่ 2 รองรับช่วงความถี่ระหว่าง 2.56–2.71 GHz โดยทั้งสองพอร์ตแสดงค่าการแมตช์อิมพีแดนซ์ที่ดีที่ความถี่กลาง 2.6 GHz ซึ่งมีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง ($VSWR$) เท่ากับ 1.100 และ 1.135 ตามลำดับ รูปที่ 3 แสดงผลการวิเคราะห์อัตราขยาย (Gain) ของสายอากาศพื้นผิวอภิวัดสุดท้ายในเชิงการจำลองและการทดสอบ โดยผลการจำลองพบว่า ค่าอัตราขยายเฉลี่ยในย่านความถี่ทำงานของพอร์ตที่ 1 และพอร์ตที่ 2 อยู่ที่ 9.29 และ 9.22 dBi ตามลำดับ ที่ความถี่กลาง 2.6 GHz สายอากาศมีค่าอัตราขยายสูงสุดเท่ากับ 9.90 dBi สำหรับพอร์ตที่ 1 และ 9.85 dBi สำหรับพอร์ตที่ 2 และรูปที่ 4 เป็นผลจำลองและผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสายอากาศที่ได้นำเสนอทั้งพอร์ตที่ 1 และพอร์ตที่ 2 บนระนาบ xz และ xy จากการวิเคราะห์พบว่า ทั้งผลจำลองและผลทดสอบสายอากาศที่ได้นำเสนอนี้มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นชนิดเจาะจงทิศทาง (Uni-directional radiation) ทั้งสองระนาบและทั้งโพลาไรซ์เชิงเส้นแนวตั้งและแนวนอน



(ก) พอร์ตที่ 1 (โพลาไรซ์เชิงเส้นแนวตั้ง)

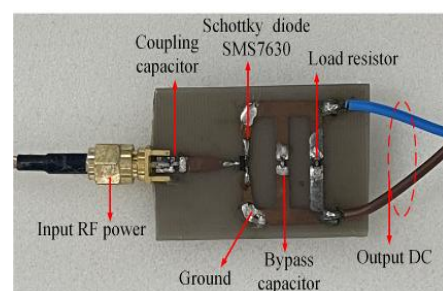


(ข) พอร์ตที่ 2 (โพลาไรซ์เชิงเส้นแนวนอน)

รูปที่ 4 ผลจำลองและผลทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ได้นำเสนอ

3.2 วงจรจัดเรียงกระแส

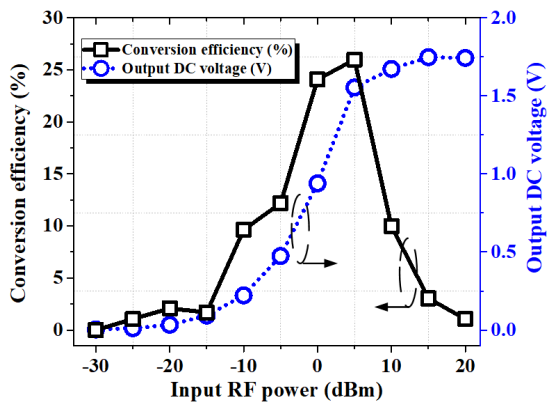
รูปที่ 5 แสดงโครงสร้างของวงจรจัดเรียงกระแสที่ได้นำเสนอ ซึ่งประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก 4 ส่วน โดยเริ่มจาก 1) ตัวเก็บประจุเชื่อมต่อ ที่ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้เกิดแรงดันย้อนกลับไปยังพอร์ตขาเข้าหรือขาออกซึ่งความถี่ใช้ค่าเท่ากับ 100 pF ถัดมาเป็น 2) ตัวเก็บประจุบายพาส (Bypass Capacitor) หรือวงจรกรองความถี่ต่ำที่มีหน้าที่ลดสัญญาณรบกวนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (Ripple) ทำให้แรงดันมีความเรียบมากยิ่งขึ้น อีกทั้งยังช่วยลดการเกิดฮาร์โมนิกในระดับสูง โดยเลือกใช้ค่าเท่ากับ 100 pF เช่นเดียวกัน องค์ประกอบที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือ 3) ไดโอด肖ตตี้เบอร์ SMS7630 ซึ่งใช้ในลักษณะอนุกรมคู่ โดยติดตั้งอยู่ในแพ็คเกจแบบ SOT-23 มีคุณสมบัตินำไฟฟ้าได้รวดเร็วและมีแรงดันเริ่มนำต่ำ เหมาะสำหรับการแปลงคลื่นความถี่วิทยุให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงอย่างมีประสิทธิภาพ และส่วนสุดท้ายคือ ตัวต้านทานโหลดของวงจรถูกกำหนดค่าความต้านทานไว้ที่ 3 กิโลโห์ม



รูปที่ 5 โครงสร้างวงจรต้นแบบ

การทดสอบประสิทธิภาพของวงจรจัดเรียงกระแสต้นแบบดำเนินการโดยใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่วิทยุหือ Rohde & Schwarz รุ่น SMC100A ในการทดสอบกำหนดความถี่ที่ 2.6 GHz และปรับระดับกำลังงานขาเข้าในช่วงตั้งแต่ -30 dBm ถึง 20 dBm เพื่อประเมินการตอบสนองของวงจรภายใต้เงื่อนไขที่หลากหลาย สำหรับการวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ขา

ออกของวงจร ได้ใช้มัลติมิเตอร์ยี่ห้อ Fluke รุ่น 115 เป็นเครื่องมือวัดตั้งรูปที่ 6 จากผลการทดสอบ พบว่า วงจรสามารถสร้างแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสูงสุดได้เท่ากับ 1.75 V เมื่อระดับกำลังงานขาเข้าเท่ากับ 15 dBm และให้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงต่ำสุด 0.01 V ที่ระดับกำลังงานขาเข้า -30 dBm สำหรับระดับกำลังงานขาเข้าที่ระดับกำลังงาน 0 dBm วงจรสามารถผลิตแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเท่ากับ 0.94 V ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการแปลงกำลังงานพบว่า วงจรที่พัฒนาขึ้นสามารถให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดอยู่ที่ 26.7% ที่ระดับกำลังงาน 4 dBm และยังคงมีประสิทธิภาพอยู่ที่ 10% เมื่ออินพุตลดลงเหลือ -10 dBm

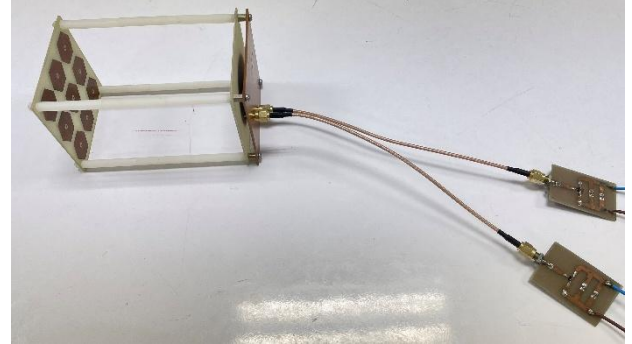


รูปที่ 6 วงจรจัดเรียงกระแสต้นแบบที่ได้นำเสนอ

3.3 สายอากาศอภิวัดวงจรจัดเรียงกระแสต้นแบบ

สายอากาศพื้นผิวอภิวัดได้ถูกเชื่อมต่อกับวงจรจัดเรียงกระแสตามที่แสดงในรูปที่ 1 และรูปที่ 7 สายนำสัญญาณได้เลือกใช้ชนิด RG316 มม. มีการสูญเสียต่ำ เหมาะกับความถี่สูง และมีอิมพีแดนซ์ 50 Ω โดยมีความยาวสายนำสัญญาณเท่ากับ 150 มม. สำหรับการติดตั้งระบบทดสอบแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ประกอบด้วย 1) ภาคส่ง ประกอบด้วยสายอากาศมาตรฐานแบบบล็อกพีริโอดิก (Log-Periodic Antenna) ยี่ห้อ AARONIA AG รุ่น HyperLOG 30250 เชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่วิทยุ Rohde & Schwarz รุ่น SMC100A เพื่อทำหน้าที่เป็นต้นกำเนิดสัญญาณความถี่วิทยุ และ 2) ภาครับ ใช้สายอากาศพื้นผิวอภิวัดที่ออกแบบขึ้นร่วมกับวงจรจัดเรียงกระแสต้นแบบ โดยวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ขาออกของวงจรด้วย มัลติมิเตอร์ยี่ห้อ FLUKE รุ่น 115 การทดสอบดำเนินการที่ความถี่ 2.6 GHz โดยมีการปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับในช่วง 0.5 ถึง 2.5 เมตร พร้อมทั้งควบคุมระดับกำลังงานไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกมาจากสายอากาศที่เทียบกับสายอากาศไอโซโทรปิก (Effective Isotropically Radiated Power: EIRP) อยู่ในช่วง -18.6 dBm ถึง 16.4 dBm ดังรูปที่ 8 สำหรับรูปที่ 9 แสดงผลการทดสอบเชิงเปรียบเทียบระหว่างค่าความหนาแน่นของกำลังงาน (Power Density) กับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ขาออกของสายอากาศพื้นผิวอภิวัดแบบจัดเรียงกระแสซึ่งได้พัฒนาขึ้น โดยใช้เครื่องวิเคราะห์คลื่นความถี่วิทยุ Anritsu รุ่น MS2090 แสดงผลลัพธ์หน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ การทดสอบดำเนินการภายใต้ความถี่ 2.6 GHz และมีระยะทางต่าง ๆ โดยที่ระยะ 0.5 เมตร เมื่อปรับระดับกำลังงาน EIRP ที่ 6.4, 11.4 และ 16.4 dBm พบว่าเครื่องวิเคราะห์ MS2090 สามารถตรวจวัดค่าความหนาแน่นของกำลังงานได้เท่ากับ 0.01%, 0.40% และ 0.36% ตามลำดับ ในขณะที่ระยะทาง 1.0 เมตร ภายใต้เงื่อนไข EIRP

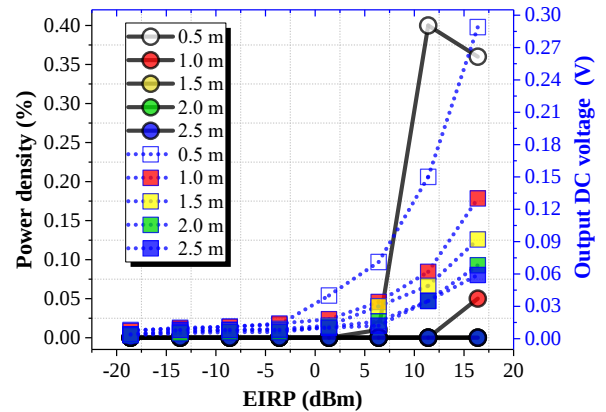
เดียวกัน พบว่า ที่ระดับ 6.4 และ 11.4 dBm เครื่องมือไม่สามารถตรวจวัดค่าความหนาแน่นของกำลังงานได้ เนื่องจากระดับพลังงานต่ำกว่าขีดจำกัดของการวัด (อ่านค่าได้เท่ากับ 0.00%) ส่วนที่ระดับ 16.4 dBm ตรวจวัดได้ที่ 0.05%



รูปที่ 7 สายอากาศพื้นผิวอภิวัดต้นแบบ



รูปที่ 8 การติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ในการทดสอบ



รูปที่ 9 ผลการทดสอบสายอากาศพื้นผิวอภิวัดจัดเรียงกระแสที่ความถี่ 2.6 GHz (โพลาริซเซชันแนวตั้ง)

สำหรับการทดสอบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ขาออกของสายอากาศพื้นผิวอภิวัดจัดเรียงกระแสที่ได้นำเสนออยู่ภายใต้การกระตุ้นด้วยสัญญาณโพลาริซเซชันแนวตั้งที่ความถี่ 2.6 GHz โดยได้ทำการกำหนดระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับในช่วง 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 2.5 เมตร สำหรับประเมินผลกระทบของระยะทางต่อแรงดันที่ผลิตได้ โดยมีเงื่อนไขภายใต้ระดับกำลังงาน EIRP ที่แตกต่างกัน และเมื่อกำหนดระดับกำลังงาน EIRP เท่ากับ -18.6 dBm พบว่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ขาออกของวงจรมี

ค่าเท่ากับ 0.008, 0.007, 0.004, 0.003 และ 0.004 โวลต์ ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการลดระดับกำลังงานและเพิ่มระยะทางส่งผลต่อประสิทธิภาพในการเก็บเกี่ยวพลังงานอย่างมีนัยสำคัญ ในกรณีที่ปรับระดับ EIRP เป็น -3.6 dBm วัดแรงดันที่ได้เท่ากับ 0.013, 0.014, 0.009, 0.006 และ 0.008 โวลต์ ตามลำดับ ซึ่งยังคงแสดงพฤติกรรมการลดลงของแรงดันตามระยะทาง ขณะที่เพิ่มระดับกำลังงานเป็น 16.4 dBm ซึ่งเป็นค่าสูงสุดในการทดสอบ พบว่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้เท่ากับ 0.289, 0.130, 0.092, 0.068 และ 0.059 โวลต์ ตามระยะทางที่กำหนด

4. สรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการออกแบบและพัฒนาสายอากาศพื้นผิวอวิวัสดุแบบจัดเรียงกระแส สำหรับการเก็บเกี่ยวพลังงานไร้สายจากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ สายอากาศที่พัฒนาขึ้นมีลักษณะเป็นโครงสร้างไม่โครงสร้างชนิดแบนลอย พร้อมแผ่นแพร่กระจายคลื่นรูปวงกลม และรองรับโพลาริซิงเส้นแบบคู่ รวมทั้งเพิ่มชั้นวางซ้อนที่ประกอบด้วย หน่วยเซลล์อวิวัสดุในรูปแบบวงแหวนหกเหลี่ยมขนาด 3×3 หน่วยเซลล์ ซึ่งส่งผลให้สายอากาศมีอัตราขยายสูงกว่า 9 dBi สำหรับทั้งสองโพลาริซิงที่มีความถี่ 2.6 GHz ในส่วนของวงจรจัดเรียงกระแส ได้เลือกใช้ไดโอดชอตต์กั๊กรุ่น SMS7630 ซึ่งมีคุณสมบัติเหมาะสมสำหรับการแปลงระดับกำลังงานต่ำ โดยสามารถผลิตแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงได้สูงสุด 1.53 โวลต์ ภายใต้ระดับพลังงานขาเข้า 4 dBm ที่โหลดความต้านทาน 3 กิโลโอห์ม จากการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของสายอากาศที่ระยะห่าง 0.5 เมตร ภายใต้เงื่อนไขโพลาริซิงเส้นแนวตั้ง และกำลังงาน EIRP เท่ากับ 16.4 dBm พบว่าสามารถผลิตแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงได้สูงสุดที่ 0.289 โวลต์ แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของสายอากาศและวงจรที่ออกแบบในการประยุกต์ใช้สำหรับระบบเก็บเกี่ยวพลังงานไร้สาย โดยเฉพาะในสภาพแวดล้อมที่ต้องการใช้งานอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์พลังงานต่ำในเครือข่ายการสื่อสารไร้สายยุคใหม่

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ในการสนับสนุนงบประมาณสำหรับการนำเสนอผลงานวิจัยในการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 48

เอกสารอ้างอิง

- [1] N. Shinohara, "Development of rectenna with wireless communication system," *Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation*, 2011, pp. 3970-3973.
- [2] Z. Popvic, S. Korhummel, S. Dunbar, R. Scheeler, A. Dolgov, R. Zane, E. Falkenstein, and J. Hagerty, "Scalable RF energy harvesting," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2014, pp. 1046-1056.
- [3] S. Tsukamoto, N. Iizasa, K. Yoshitomi, R. Pokharel, K. Yoshida, R. Hattori, H. Kanaya, and D. Kanemoto, "Development of a rectenna for batteryless electronic paper," *Proceedings of the IEEE Region 10 Conference*, 2013, pp. 1-4.
- [4] A. S. Marincic, "Nikola tesla and the wireless transmission of energy", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1982, pp. 4064-4068.
- [5] W. C. Brown, "The history of power transmission by radio wave", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1984, pp. 1230-1242.
- [6] N. Shinohara, and H. Matsumoto, "Experimental study of large rectenna array for microwave energy transmission", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Technique*, 1998, pp. 261-268.
- [7] J. A. Hagerty, and Z. Popovic, "An experimental and theoretical characterization of broadband arbitrarily polarized rectenna array", *IEEE International Microwave Symposium Digest*, 2001, pp. 1855-1858.
- [8] Y. -H. Suh, and K. Chang, "A high-efficiency dual-frequency rectenna for 2.45 and 5.8-GHz wireless power transmission", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2002, pp. 1784-1789.
- [9] A. Slavova, and A. S. Omar, "Wideband rectenna for energy recycling", *IEEE Antenna and Propagation Society International Symposium*, 2003, pp.954-957.
- [10] J. -H. Chou, D. -B. Lin, K. -L. Weng, and H. -J. Li, "All polarization receiving rectenna with harmonic rejection property for wireless power transmission", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2014, pp. 5242-5249.
- [11] Ch. Phongcharoenpanich, and K. Boonying, "A 2.4-GHz dual polarized suspended square plate rectenna with inserted annular rectangular ring slot", *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 2015, pp. 164-173.
- [12] D. H. Sadek, H. A. Shawkey, and Ab. A. Zekry, "Compact and high-efficiency rectenna for wireless power-harvesting applications", *International Journal of Antennas and Propagation*, 2021, pp. 1-8.
- [13] F. Khalid, W. Saeed, N. Shoaib, M. U. Khan, and H. M. Cheema, "Quad-band 3D rectenna array for ambient RF energy harvesting", *International Journal of Antennas and Propagation*, 2020, pp. 1-23.
- [14] CST® Microwave Studio, Research Base, 2020.
- [15] K. Boonying, and Ch. Phongcharoenpanich, "Analysis and design of circularly polarized capacitively-fed planar suspended antenna for universal UHF RFID applications", *Przegląd Elektrotechniczny*, 2020, pp. 100-107.