การเพิ่มประสิทธิภาพระบบการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายด้วยอภิวัสดุ

EFFICIENCY ENHANCEMENT OF WIRELESS POWER TRANSFER SYSTEM WITH METAMATERIALS

ชัยยงค์ เสริมผล* และ นิวัตร์ อังควิศิษฐพันธ์

Chaiyong Soemphol* and Niwat Angkawisittpan

หน่วยวิจัยแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงคำนวณและระบบเชิงแสง สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Research Unit for Computational Electromagnetics and Optical Systems (CEMOS),

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Mahasarakham University

*corresponding author e-mail: chaiyong.sp@gmail.com

(Received: 05 June 2020; Revised: 10 September 2020; Accepted: 1 October 2020)

บทคัดย่อ

ระบบการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายถือว่าเป็นเทคโนโลยีใหม่ในอนาคตข้างหน้าที่จะช่วยอำนวยความสะดวกสบายในชีวิตประจำวันของมนุษย์ บทความนี้นำเสนอการศึกษาในการประยุกต์ใช้อภิวัสดุเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้ระบบการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สาย โดยนำเสนอหลักการพื้นฐานของระบบการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สาย อภิวัสดุและการประยุกต์ใช้งานกับระบบการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สาย ผลจากการทบทวนวรรณกรรมจะพบว่าอภิวัสดุมีความสามารถที่จะนำไปใช้เพิ่มประสิทธิภาพของระบบการส่งพลังงานไร้สายได้อย่างมีนัยสำคัญ

คำสำคัญ: การเพิ่มประสิทธิภาพ การส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สาย อภิวัสดุ

Abstract

The wireless power transfer system is considered to be a new technology in the future that will help facilitate for human daily life. This paper presents a study on the applications of metamaterials for enhancing the efficiency of wireless power transfer systems. The basic principles of wireless power transfer system, metamaterials and its applications for wireless power transfer system are proposed. The results of the literature review show that metamaterials can be used to significantly increase the efficiency of the wireless power transfer systems.

Keywords: Efficiency improvement, Wireless power transfer, Metamaterials

บทนำ

ในปัจจุบันระบบการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายกำลังกลายเป็นองค์ประกอบสำคัญในการประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ มากขึ้น ซึ่งพบว่าระบบนี้เริ่มถูกพัฒนามาใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์แล้ว เช่น การใช้การส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายสำหรับชาร์ตแบตเตอรี่มือถือแบบไร้สาย (Wireless power charger) (Lu et al., 2015; Zhang et al., 2018) การชาร์ตแบตเตอร์รี่รถยนต์ที่ขับเคลื่อนด้วยพลังงานไฟฟ้า (Electric vehicle) (Sun et al., 2018) การส่งพลังงานให้เครื่องอากาศยานไร้คนขับ (Nguyen et al., 2020) หรือแม้กระทั่งการประยุกต์ใช้ระบบส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายกับเครื่องมือทางการแพทย์ เช่น เครื่องช่วยควบคุมจังหวะการเต้นของหัวใจ (Cardiac Peacemaker) ที่เครื่องจะถูกฝังเข้าไปในร่างกายและทำการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายเข้าไปในร่างกายเพื่อให้เครื่องสามารถทำงานได้โดยไม่จำเป็นต้องผ่าตัดเพื่อนำแบตเตอรี่ออกมาชาร์ตประจุบ่อยๆ (Kara et al., 2017) เป็นต้น ดังนั้นเทคโนโลยีการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายจึงกำลังกลายเป็นเทคโนโลยีใหม่ในอนาคตข้างหน้าที่สามารถนำมาใช้เพื่ออำนวยความสะดวกในชีวิตประจำวันเราได้มาก อย่างไรก็ตามการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายยังมีข้อจำกัดหลายประการที่จำเป็นต้องได้รับการพัฒนา โดยข้อที่เด่นชัดมากที่สุด ก็คือ ประสิทธิภาพในการส่งพลังงานจากต้นทางไปปลายทางที่ยังต่ำมาก สามารถส่งได้เพียงในระยะทางที่ใกล้ๆ เท่านั้น ทำให้นักวิจัยจากหลายกลุ่มพยายามหาวิธีการในการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายให้สูงขึ้น เช่น การปรับปรุงวงจร (Feng et al., 2018) การปรับปรุงขดลวดที่ใช้สำหรับการรับส่งพลังงาน (Islam et al., 2013) เป็นต้น

จากการค้นพบวัสดุที่มีคุณสมบัติพิเศษที่มีการตอบสนองต่อพฤติกรรมของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งไม่ปรากฏโดยทั่วไปในวัสดุตามธรรมชาติที่เรียกว่า อภิวัสดุ (Metamaterials) ซึ่งสามารถนำมาใช้งานชดเชยหรือทดแทนข้อจำกัดของวัสดุตามธรรมชาติก่อให้เกิดสิ่งประดิษฐ์และนวัตกรรมใหม่ๆ ที่เกี่ยวกับอุปกรณ์ไฟฟ้าและแม่เหล็กไฟฟ้ามากมายรวมไปถึงมีวิจัยที่นำเสนอแนวคิดที่จะประยุกต์ใช้อภิวัสดุเพื่อปรับปรุงคุณภาพของระบบการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สาย (Wang et al., 2010) ดังนั้นในบทความนี้จึงได้รวบรวมข้อมูลและนำเสนอความเป็นไปได้ในการนำอภิวัสดุมาประยุกต์ใช้สำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สาย โดยในบทความจะกล่าวถึงหลักการพื้นฐานของระบบส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สาย อภิวัสดุ และการประยุกต์ใช้งานในระบบส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สาย

หลักการพื้นฐานของระบบการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สาย

การส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สาย คือ การส่งกำลังไฟฟ้าโดยไม่ใช้สายตัวนำระหว่างภาคส่งและภาครับ การส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายเริ่มเป็นที่รู้จักในยุคของนิโคลา เทสลา (Nikola Tesla) ที่ได้ทำการทดลองส่งพลังงานโดยไม่ใช้สายส่ง แต่หลังจากนั้นเทคโนโลยีการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สาย

ก็ไม่ได้รับความสนใจในการพัฒนาเท่าที่ควร จนกระทั่งในปัจจุบันที่ความก้าวหน้าของเทคโนโลยีด้านต่างๆ สูงขึ้นมาก มีการใช้งานอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในชีวิตประจำวันมากขึ้น ทำให้ระบบการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายกลับมาได้รับความสนใจที่จะพัฒนาโดยกลุ่มนักวิจัยทั่วโลกอีกครั้ง ระบบการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการส่งพลังงานในกับอุปกรณ์ที่ต้องใช้พลังงานต่ำระดับมิลลิวัตต์ เช่น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางการแพทย์และอุปกรณ์ตรวจจับต่างๆ ไปจนอุปกรณ์ที่ต้องการพลังงานสูงในระดับกิโลวัตต์ เช่น รถยนต์ไฟฟ้า เป็นต้น (Sun et al., 2018)

ระบบการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายมีองค์ประกอบสำคัญอยู่ 3 ส่วน คือ ภาคส่ง (Transmitter) ภาครับ (Receiver) และอุปกรณ์ในการเชื่อมต่อ (Coupling devices) กระบวนการส่งพลังงาน ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน โดยขั้นแรก คือ การแปลงพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดให้เป็นพลังงานในรูปอื่น ได้แก่ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สนามไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็ก ขั้นตอนต่อไป คือ การส่งพลังงานดังกล่าวไปยังภาครับโดยไม่ต้องอาศัยตัวกลางที่เป็นสาย แต่จะใช้การแผ่พลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือการเหนี่ยวนำของสนามไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็ก (Zhang et al., 2018)

เทคโนโลยีการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สาย สามารถแบ่งได้หลายรูปแบบ โดยถ้าแบ่งตามลักษณะการแผ่พลังงาน (Radiation) สามารถแบ่งได้ 2 รูปแบบ คือ 1) การส่งแบบแผ่พลังงาน (Radiative) ซึ่งเป็นการส่งโดยใช้สนามระยะไกล (Far field) อาศัยการแผ่พลังงานจากภาคส่งไปยังภาครับ ตัวอย่างเช่น การส่งโดยคลื่นไมโครเวฟหรือเลเซอร์ การส่งพลังงานรูปแบบนี้จะสามารถส่งได้ไกลและมีประสิทธิภาพสูง แต่ก็มีข้อกังวลเรื่องความปลอดภัยและไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในชีวิตประจำวัน และ 2) การส่งแบบไม่แผ่พลังงาน (Non– Radiative) ซึ่งเป็นการส่งภายใต้สนามระยะใกล้ (Near field) จะอาศัยการเหนี่ยวนำ (Coupling) เพื่อทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าที่ภาครับ สามารถแบ่งได้ 3 ลักษณะ คือ การเหนี่ยวนำสนามไฟฟ้า (Capacitive coupling) การเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก (Inductive coupling) และการเรโซแนนซ์แม่เหล็ก (Magnetic resonance coupling) (Zhang et al., 2018)

การส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายโดยอาศัยการเหนี่ยวนำสนามไฟฟ้า มีข้อดี คือ มีสนามรั่วไหลน้อยและสามารถใช้ในบริเวณที่มีโลหะขวางกั้นได้ อย่างไรก็ตามการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายรูปแบบนี้ไม่ได้รับความนิยมและถูกพัฒนาต่อมากนัก เนื่องจากความเป็นฉนวนของวัตถุจะทำให้ประสิทธิภาพของระบบตกลงมาก และการส่งรูปแบบนี้เหมาะสำหรับงานที่ต้องการแรงดันต่ำถ้าใช้ที่แรงดันสูงมากๆ จะเกิดอันตรายได้ง่าย (ศราวุธ, 2015) การส่งพลังงานที่ได้รับความนิยมในปัจจุบัน คือ การส่งพลังงานไร้สายโดยใช้สนามแม่เหล็ก ซึ่งประกอบด้วย การส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายโดยอาศัยการคู่ควบแบบเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก และการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายโดยใช้การเหนี่ยวนำเรโซแนนซ์แม่เหล็ก โดยทั้งสองรูปแบบจะใช้สนามแม่เหล็กเป็นตัวกลาง

ในการทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าที่ภาครับ แต่จะมีส่วนที่แตกต่างกัน คือ การส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายโดยอาศัยการคู่ควบแบบเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กจะมีหลักการเหมือนกับการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า การส่งพลังงานรูปแบบนี้ต้องวางขดลวดในระยะที่ใกล้กันมากจึงจะสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไฟฟ้าได้ เมื่อระยะห่างระหว่างขดลวดทั้งสองมากขึ้น จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการส่งพลังงานลดลง เพราะสนามแม่เหล็กจะแผ่ไปทุกทิศทุกทางทำให้สูญเสียพลังงานมากไป (วัชระ และวันชัย, 2019) ขณะที่การส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายโดยใช้การเหนี่ยวนำเรโซแนนซ์แม่เหล็กจะเกิดขึ้นเมื่อภาคส่งและภาครับมีความถี่สั่นพ้องตรงกัน ตามทฤษฎีที่กล่าวว่า ขดลวดหนึ่งขดลวดสามารถส่งกระแสไฟฟ้าไปยังขดลวดอื่นได้ ตราบใดที่ขดลวดทั้งหมดมีความถี่สั่นพ้องที่ตรงกัน การส่งพลังงานโดยใช้การเหนี่ยวนำเรโซแนนซ์แม่เหล็กเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมสูงสุดเนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงและสามารถส่งได้ไกลกว่าการเหนี่ยวนำสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

จากที่ได้กล่าวมาจะพบว่า เทคนิคการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายนั้นมีหลายรูปแบบ แต่รูปแบบที่นิยมและถูกพัฒนาจนมีการนำมาใช้งานเชิงพาณิชย์ในปัจจุบัน คือ การส่งโดยใช้สนามแม่เหล็กทั้งสอง อย่างไรก็ตามก็ยังมีข้อจำกัดในด้านประสิทธิภาพของการส่ง ทำให้ยังมีการวิจัยปรับปรุงประสิทธิภาพและระยะทางของการส่งให้ดีขึ้น ซึ่งจากการศึกษาพบว่า ปัจจัยที่มีผลประสิทธิภาพของระบบ ได้แก่ ความถี่ที่ใช้งาน การออกแบบขดลวด การออกแบบวงจรรายรอบ รวมทั้งผลกระทบจากสิ่งแวดล้อมและวัสดุที่ใช้ (ศราวุธ, 2015) โดยจากการศึกษา พบว่า กลุ่มนักวิจัยที่ทำการศึกษาเกี่ยวกับระบบพลังงานไฟฟ้าไร้สายจะมุ่งเน้นงานวิจัยทางด้านการใช้เทคนิคการออกแบบวงจรรูปแบบต่างๆ เข้ามาเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ (Feng et al., 2018) การปรับปรุงค่าสัมประสิทธิการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก โดยการปรับปรุงลักษณะการแพร่กระจาย การตัดผ่านของสนามแม่เหล็ก (Xu et al., 2019) การออกแบบและปรับปรุงโครงสร้างขดลวดด้วยวิธีการต่างๆ (Mao et al., 2018) และอีกวิธีที่กำลังได้รับความนิยม คือ การเพิ่มประสิทธิภาพระบบการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายโดยใช้อภิวัสดุ (Wang et al., 2010)

การเพิ่มประสิทธิภาพการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายด้วยสนามแม่เหล็กด้วยอภิวัสดุ

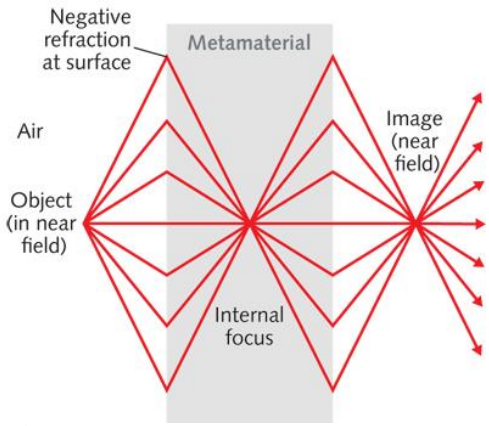
อภิวัสดุหรือวัสดุเหนือธรรมชาติหรือวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ (Metamaterials) ถูกสร้างขึ้นโดยมนุษย์เพื่อกำหนดและควบคุมคุณสมบัติพิเศษทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic) ที่ไม่สามารถพบได้ในวัสดุตามธรรมชาติ เช่น ค่าดัชนีหักเหของแสง (n) ที่ติดลบหรือเข้าใกล้ศูนย์ (Chaiyong, 2014) เป็นต้น โดยปกติคุณสมบัติของอภิวัสดุจะถูกกำหนดคุณสมบัติจากโครงสร้างที่ออกแบบ (มิได้มีคุณสมบัติตามเนื้อวัสดุของส่วนประกอบ) โดยลักษณะโครงสร้างจะเป็นแบบรวมรายคาบ (Periodic structures) ที่มีโครงสร้างย่อย (Individual structures) ขนาดเล็กประมาณ

5–10 เท่าของความยาวคลื่นในย่านที่ใช้งาน (Operating wavelength) ซึ่งส่งผลให้อภิวัสดุแสดงคุณสมบัติเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenous properties) (นิวัตร์, 2010)

คุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าของอภิวัสดุสามารถอธิบายได้ด้วยค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า (Permittivity, ε) และค่าความซึมซาบได้ทางแม่เหล็ก (Permeability, μ) โดยเมื่อพิจารณาจากค่าทั้งสองทำให้สามารถจัดประเภทของอภิวัสดุได้ 5 ประเภท คือ 1) วัสดุที่มีค่า ε และเป็นบวก (Double positive medium: DPS) 2) วัสดุที่มีค่า ε เป็นลบ (Epsilon–negative medium: ENG) 3) วัสดุที่มีค่า μ เป็นลบ (Mu negative–medium: MNG) 4) วัสดุที่มีค่า ε และ μ เป็นลบ (Double negative medium: DNG) และ 5) วัสดุที่มีค่าดัชนีหักเหเป็นศูนย์หรือเข้าใกล้ศูนย์ (Zero refractive index: ZRI) (ศราวุธ และประยุทธ, 2011)

ด้วยคุณสมบัติพิเศษของอภิวัสดุที่สามารถถูกออกแบบให้มีคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าตามที่ต้องการและสามารถเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้ ทำให้เกิดการประยุกต์ใช้งานของอภิวัสดุที่สำคัญและได้รับความสนใจในศาสตร์ต่างๆ อย่างแพร่หลาย รวมทั้งทำให้มีนักวิจัยหลายกลุ่มได้นำเสนอการใช้อภิวัสดุเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบส่งพลังงานไร้สาย โดยในบทความนี้จะกล่าวถึงการใช้อภิวัสดุร่วมกับระบบการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายสนามระยะใกล้ด้วยสนามแม่เหล็ก

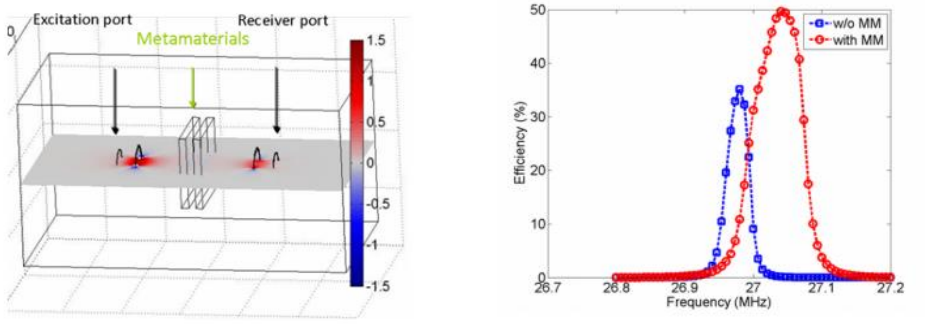
วัสดุทั่วไปตามธรรมชาติจะมีค่าดัชนีหักเหเป็นบวก เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตกกระทบกับวัสดุจะทำให้คลื่นนั้นมีทิศทางกระจายออก (Diverging) แต่เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตกกระทบกับอภิวัสดุที่ออกแบบให้มีค่าดัชนีหักเหติดลบ จะทำให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหักเหเข้ามารวมกัน (Focusing) ดังภาพที่ 1 ทำให้อภิวัสดุที่มีค่าดัชนีหักเหติดลบกลายเป็นที่รู้จักในชื่อของเลนส์สมบูรณ์แบบ (Perfect lens) (Pendry et al., 2000)



ภาพที่ 1 การหักเหของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตกกระทบกับอภิวัสดุ (Hecht, 2014)

การใช้เลนส์สมบูรณ์แบบจากอภิวัสดุ (Metamaterials perfect lens) เป็นวิธีหนึ่งที่ถูกนำเสนอสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายสนามระยะใกล้ด้วยสนามแม่เหล็ก (Wang et al., 2010) ปกติแล้วการออกแบบเลนส์สมบูรณ์แบบจากอภิวัสดุที่มีค่า n ติดลบ จะต้องออกแบบให้ทั้งค่า ε และค่า μ เป็นลบทั้งคู่ ซึ่งจะมีความซับซ้อนในการสร้างไปใช้งานจริง อย่างไรก็ตามในระบบการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายนั้นสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กถูกแยกออกจากกัน ทำให้สามารถออกแบบอภิวัสดุให้ค่าใดค่าหนึ่งเป็นลบก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่ารูปแบบการส่งนั้นอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็กเป็นตัวกลางในการคู่ควบ (Coupling) และในปัจจุบันจะพบว่า การส่งโดยใช้สนามแม่เหล็กเป็นที่นิยมมากกว่าการส่งโดยใช้สนามไฟฟ้า ดังนั้นการประยุกต์ใช้อภิวัสดุกับระบบการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายจึงนิยมออกแบบอภิวัสดุให้มีค่า μ เป็นลบเพียงค่าเดียวก็สามารถนำไปเพิ่มประสิทธิภาพของระบบได้

แนวคิดการใช้เลนส์สมบูรณ์แบบที่มีค่าติดลบกับระบบการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายถูกนำเสนอโดยกลุ่มวิจัยของ Wang et al. (2010) และมีการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์โดย Urzhumov & Smith (2011) หลังจากนั้นได้มีการทดสอบแนวคิดดังกล่าวด้วยการจำลองทางคอมพิวเตอร์โดยออกแบบระบบการส่งให้ขดลวดภาคส่งและภาครับมีความถี่เรโซแนนซ์ตรงกัน และมีการนำอภิวัสดุที่มีค่า ε =1 และค่า μ =−1+0.05 มาวางคั่นระหว่างขดลวดทั้งสอง ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ขดลวดภาครับมีค่ามากกว่าระบบที่ไม่มีอภิวัสดุ ดังภาพที่ 2 จะพบว่า ระบบการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายแบบปกติจะมีประสิทธิภาพ 35.8% ขณะที่ระบบที่ใช้ร่วมกับอภิวัสดุมีประสิทธิภาพ 50% ซึ่งสูงกว่าระบบปกติประมาณ 14.2% ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าระบบที่มีการใช้อภิวัสดุมาวางกั้นระหว่างขดลวดภาคส่งและภาครับสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบการส่งได้เมื่อเทียบกับระบบการส่งที่มีแค่ขดลวดภาคส่งและภาครับ (Wang et al., 2011)

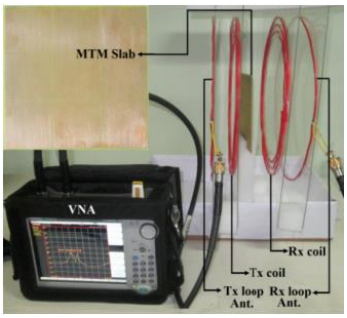


(a) (b)

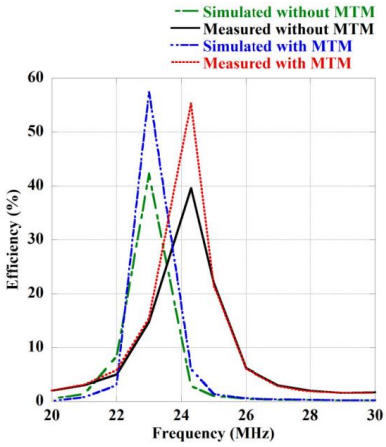
ภาพที่ 2 การทดสอบการใช้อภิวัสดุประเภท MNG กับระบบการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สาย (a) ผลการจำลองการวัดความเข้มสนามแม่เหล็ก และ (b) การวัดประสิทธิภาพการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายของระบบที่มีและไม่มีอภิวัสดุ (Wang et al., 2011)

ผลจากการศึกษาและวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าอภิวัสดุที่มีค่า μ ติดลบสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายได้ จึงทำให้มีกลุ่มนักวิจัยทำการทดลองสร้างและวัดประสิทธิภาพของระบบการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายร่วมกับอภิวัสดุ (Chen et al., 2017; Huang et al., 2012; Lipworth et al., 2014; Rajagopalan et al., 2014; Wang et al., 2011; Wang et al., 2013) ซึ่งแต่ละงานวิจัยจะได้ผลไปในทางเดียวกัน คือ การใช้เลนส์สมบูรณ์แบบสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบได้ เนื่องจากเลนส์ที่ใช้จะช่วยขยายอัตราของคลื่นจางหายได้ (Evanescent wave) นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้เทคนิคดังกล่าวสามารถเพิ่มระยะทางการส่งได้ด้วย (Park et al., 2015) ลดผลกระทบจากการวางไม่ตรงกัน (Misalignment) ของขดลวดภาคส่งและภาครับได้ Ranaweera et al., 2015; Yan et al., 2018) รวมทั้งสามารถลดการบิดเบือนของรูปคลื่น (Wave distortion) ในระบบการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายแบบสองขดลวดได้ (Zhang et al., 2015)

อภิวัสดุประเภทต่อมาที่ถูกกล่าวถึงในการนำมาประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์ทางไฟฟ้าและแม่เหล็กคืออภิวัสดุที่มีค่าความซึมซาบได้ทางแม่เหล็กใกล้ศูนย์ (Mu-near zero: MNZ) โดยคุณสมบัติเด่นของอภิวัสดุประเภทนี้สามารถนำไปใช้ในการควบคุมทิศทางของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าให้เคลื่อนที่ในทิศทางที่ต้องการ ส่งผลให้สามารถควบคุมความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้ (Kim & Seo, 2014; Park et al., 2014) ตัวอย่างเช่นในงานวิจัยของ Shaw et al. (2016) นำเสนอการใช้อภิวัสดุประเภท MNZ ดังภาพที่ 3 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายที่ความถี่ระหว่าง 20–30 MHz ผลการทดสอบพบว่าระบบที่ใช้ร่วมกับอภิวัสดุมีประสิทธิภาพ 55.3% หรือเพิ่มขึ้นจากระบบปกติ 15.7%



(a)



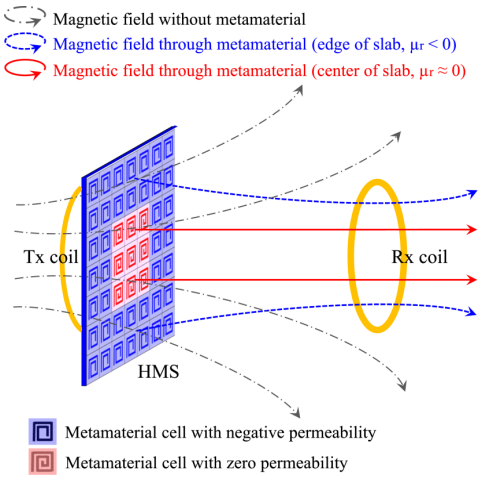
(b)

ภาพที่ 3 การทดสอบการใช้อภิวัสดุประเภท MNZ กับระบบการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สาย (a) รูปแบบการทดลองเพื่อวัดประสิทธิภาพและ (b) ผลการวัดประสิทธิภาพของระบบการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายกับอภิวัสดุประเภท MNZ (Shaw et al., 2016)

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่นำเสนอแนวคิดการพัฒนาอภิวัสดุแบบผสม (Hybrid etamaterials) (Cho et al., 2016) ที่อาศัยคุณสมบัติการหักเหของอภิวัสดุที่มีค่า μ เป็นลบร่วมกับผลของการเพิ่มความเข้มของสนามแม่เหล็กของอภิวัสดุที่มีค่า μ เป็นศูนย์ ดังภาพที่ 4 แสดงทิศทางของสนามแม่เหล็กที่ผ่านอภิวัสดุแบบผสมวางอยู่ระหว่างขดลวดตัวส่งและตัวรับ โดยจะมีอภิวัสดุที่มีค่า μ เข้าใกล้ศูนย์อยู่ตรงกลางขนาบด้วยอภิวัสดุที่มีค่า μ เป็นลบทั้งสองด้าน จากรูปจะพบว่าคลื่นที่ตกกระทบวัสดุช่วงกึ่งกลางจะมีทิศทางการหักเหในแนวตั้งฉากกับวัสดุ (เส้นประสีน้ำเงิน) ซึ่งจะเสมือนเป็นการเพิ่มความเข้มของสนามแม่เหล็กในช่วงดังกล่าว ส่วนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตกกระทบด้านข้างซึ่งเป็นส่วนอภิวัสดุที่มีค่า μ เป็นลบ จะทำให้คลื่นหักเหมาทางด้านซ้าย (เส้นประสีแดง) ซึ่งเสมือนคลื่นเกิดการหักเหเข้ามารวมกัน ส่งผลให้ขดลวดตัวรับสามารถรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้มากกว่าการไม่มีวัสดุใดๆ มาวางกั้นเลย (เส้นทึบสีดำ) (Lee et al., 2019)

จากแนวคิดดังกล่าวกลุ่มวิจัยของ Cho et al., (2018) ได้ทำการสร้างและทดสอบผลการใช้วัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าแบบผสมมาปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายที่ความถี่ 6.78 MHz โดยผลการทดสอบ พบว่า การใช้อภิวัสดุแบบผสมสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบจากเดิมร้อยละ 34.5 เป็นร้อยละ 41.8 และนอกจากนี้ยังพบว่า วัสดุดังกล่าวสามารถลดอัตราการรั่วไหลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากเดิม −19.21 dBm เป็น −26.03 dBm

ผลที่ได้จากการศึกษาจะพบว่าอภิวัสดุที่ออกแบบได้เหมาะสมจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายได้ ซึ่งมีงานวิจัยที่สนับสนุนทั้งผลที่แสดงการจำลองจากคอมพิวเตอร์และผลจากการทดสอบคุณสมบัติของอภิวัสดุกับระบบการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สาย ซึ่งแสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติพิเศษของอภิวัสดุไว้อย่างชัดเจน



ภาพที่ 4 ทิศทางการหักเหของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อคลื่นตกกระทบอภิวัสดุแบบผสม (Cho et al., 2018)

สรุปผลการวิจัย

บทความนี้นำเสนอการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้งานอภิวัสดุระบบการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายด้วยสนามแม่เหล็ก จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่าอภิวัสดุสามารถเพิ่มประสิทธิภาพและระยะทางการส่งพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สายระยะใกล้ด้วยสนามแม่เหล็กได้ โดยอภิวัสดุที่เหมาะสมในการนำมาใช้ได้แก่วัสดุที่มีค่า μ เป็นลบ เป็นศูนย์หรือเข้าใกล้ศูนย์และอภิวัสดุแบบผสม จึงอาจกล่าวได้ว่าในอนาคตอภิวัสดุจึงมีแนวโน้มที่จะถูกนำมาใช้งานกับระบบการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายมากยิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนงานวิจัยจากโครงการทุนวิจัย คปก. ต่อยอด รุ่นที่ 3 ตามสัญญารับทุนเลขที่ RAP61K0003 และขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ได้ให้การสนับสนุนเครื่องมือและสถานที่ในการศึกษางานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

นิวัตร์ อังควิศิษฐพันธ์. (2010). อภิวัสดุ. **วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ., 3**(2), 52–60.

วัชระ อมศิริ และวันชัย ไพจิตโรจนา. (2019). อภิวัสดุสำหรับเพิ่มประสิทธิภาพการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สาย. **วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 27**(2), 360 – 379.

ศราวุธ ชัยมูล. (2015). ข้อพิจารณาในการออกแบบระบบส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายสมัยใหม่: อินดักทีฟคัปปลิ้งและเรโซแนนซ์แม่เหล็ก. ใน **การประชุมวิชาการงานวิจัยและพัฒนาเชิงประยุกต์ ครั้งที่ 7**. (น.426–430). ตรัง: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตตรัง และสมาคมวิชาการไฟฟ้าอิเลคทรอนิคส์ โทรคมนาคม และสารสนเทศ ประเทศไทย.

ศราวุธ ชัยมูล และประยุทธ อัครเอกฒาลิน. (2011). อภิวัสดุสำหรับประยุกต์ใช้ด้านสายอากาศ. **วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ**, **21**(2), 472–482.

Chen, J.–F., Ding, Z., Hu, Z., Wang, S., Cheng, Y., Liu, M., Wei, B., & Wang, S. (2017). Metamaterial–Based High–Efficiency Wireless Power Transfer System at 13.56 MHz for Low Power Applications. **Progress In Electromagnetics Research B, 72**, 17–30.

Cho, Y., Lee, S., Jeong, S., Kim, H., Song, C., Yoon, K., Song, J., Kong, S., Yun, Y. & Kim, J. (2016). Hybrid Metamaterial with Zero and Negative Permeability to Enhance Efficiency in Wireless Power Transfer System. **Proceeding of 2016 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC)** (pp. 1–3). Portugal: Aveiro.

Cho, Y., Kim, J.J., Kim, D. Lee, S., Kim, H., Song, C., Kong, S. Kim, H., Seo, C., Ahn, S. & Kim, J. (2016). Thin PCB–type Metamaterials for Improved Efficiency and Reduced EMF Leakage in Wireless Power Transfer Systems," **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 64**(2), 353–364.

Cho, Y., .Lee, S., Kim, D.H., Kim, H., Song, C., Kong, S., Park, J., Seo, C. & Kim, J. (2018). Thin Hybrid Metamaterial Slab With Negative and Zero Permeability for High Efficiency and Low Electromagnetic Field in Wireless Power Transfer Systems. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 60**(4), 1001–1009.

Feng, J., Li, Q., & Lee, F.C. (2018). Coil and Circuit Design of Omnidirectional Wireless Power Transfer System for Portable Device Application. **Proceeding of 2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)** (pp.914–920). Portland: OR.

Hecht, J. (2014). **SUPER–RESOLUTION MICROSCOPY: New twists on superlenses improve subwavelength microscopy**. Retrieved June, 24, 2020, from https://www.bioopticsworld.com/bioimaging/article/16429609

Huang, D., Urzhumov, Y., Smith, D.R., Teo, K.H. & Zhang, J. (2012). Magnetic Superlens–enhanced Inductive Coupling for Wireless Power Transfer. **Journal of Applied Physics, 111**, 64902.

Islam, A., Islam S., & Tulip, F. (2013). Design and Optimization of Printed Circuit Board Inductors for Wireless Power Transfer System," **Circuits and Systems, 4**(2), 237–244.

Kara N. B., Marlin H.M., Ervin S. (2017). Multi–Disciplinary Challenges in Tissue Modeling for Wireless Electromagnetic Powering: A Review. **IEEE Sensors Journal, 17**(20), 6498–6509.

Kim, H., & Seo, C. (2014). Highly Efficient Wireless Power Transfer Using Metamaterial Slab with Zero Refractive Property. **Electronics Letters, 50**(16), 1158–1160.

Lee, S., Cho, Y., Jeong, S., Hong, S., Sim, B., Kim, H. & Kim, J. (2019). High Efficiency Wireless Power Transfer System using a Two–stack Hybrid Metamaterial Slab. **Proceeding of 2019 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC)** (pp.616–619). London: United Kingdom.

Lipworth, G., Ensworth, J., Seetharam, K., Huang, D., Lee, J.S., Schmalenberg, P., Nomura, T., Reynolds, M.S., Smith, D.R., & Urzhumov, Y. (2014). Magnetic metamaterial superlens for increased range wireless power transfer. **Science Reports, 4**, 3642.

Lu, X., Wang, P., Niyato, D., Kim, D.I. & Han, Z. (2016). Wireless Charging Technologies: Fundamentals, Standards, and Network Applications. **IEEE Communications Surveys & Tutorials, 18**(2), 1413–1452.

Mao, S., Wang, H., Mao, Z.–H. & Sun, M. (2018). A polygonal double–layer coil design for high–efficiency wireless power transfer. **AIP Advances, 8**(5), 056631.

Park, J., Park, B., Ryu, Y., Park, E. & Lee, J. (2014) .Modified mu–zero Resonator for Efficient Wireless Power Transfer. **IET Microwaves, Antennas & Propagation, 8**(12), 912–920.

Park, C., Lee, S., Cho, G.H. & Rim, C.T. (2015). Innovative 5–m–offdistance Inductive Power Transfer Systems with Optimally Shaped Dipole Coils. **IEEE Transaction of Power Electronics, 30**(2), 817–827.

Pendry, J.B. (2000). Negative Refraction Makes a Perfect Lens. **Physical Review Letters, 85**(18), 3966–3969.

Rajagopalan, A., RamRakhyani, A.K., Schurig, D., Lazzi, G. (2014). Improving Power Transfer Efficiency of a Short–range Telemetry System using Compact Metamaterials. **IEEE Transaction of Microwave Theory Technology, 62**, 947–955.

Ranaweera, A.L.A.K., Moscoso, C.A., Lee & J.–W. (2015). Anisotropic Metamaterial for Efficiency Enhancement of mid–range Wireless Power Transfer under Coil Misalignment. **Journal of Physics D: Applied Physics, 48**, 455104.

Shaw, T., Roy, A. & Mitra, D. (2016). Efficiency Enhancement of Wireless Power Transfer System Using MNZ Metamaterials. **Progress In Electromagnetics Research C, 68**, 11–19.

Soemphol, C., Sonsilphong, A. & Wongkasem, N. (2014). Metamaterials with Near–zero Refractive Index Produced using Fishnet Structures. **Journal of Optics, 16**, 015104.

Sun, L., Ma, D. & Tang, H. (2018). A review of Recent Trends in Wireless Power Transfer Technology and Its Applications in Electric Vehicle Wireless Charging. **Renewable and Sustainable Energy Reviews, 91**, 490–503.

Urzhumov, Y. & Smith, D.R. (2011). Metamaterial–enhanced Coupling between Magnetic Dipoles for Efficient Wireless Power Transfer. **Physical Review B, 83**, 205114.

Wang, B., Nishino, T. & Teo, K.H. (2010). Wireless Power Transmission Efficiency Enhancement with Metamaterials. **Proceedings of the IEEE International Conference on Wireless Information Technology and Systems (ICWITS'10)** (pp. 1–4). USA.: Honululu.

Wang, B., Teo, K.H., Nishino, T., Yerazunis, W., Barnwell, J. & Zhang, J. (2011). Wireless Power Transfer with Metamaterials. **Proceedings of European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2011)** (pp. 3905–3908.). Italy: Rome.

Wang, B., Teo, K.H., Tamotsu, N., Yerazunis, W., Barnwell, J. & Zhang, J. (2011). Experiments on Wireless Power Transfer with Metamaterials. **Apply Physics Letters, 98**, 254101.

Wang, B., Yerazunis, W. & Teo, K.H. (2013). Wireless Power Transfer: Metamaterials and Array of Coupled Resonators. **Proceeding of IEEE, 101**(6) 1359–1368.

Yan, Z., Song, B., Zhang, K., Wen, H., Mao, Z. & Hu. Y. (2018). Eddy Current Loss Analysis of Underwater Wireless Power Transfer Systems with Misalignments. **AIP Advances, 8**(10), 101421.

Zhang, Y., Tang, H., Yao, C., Li, Y. & Xiao, S. (2015). Experiments on Adjustable Magnetic Metamaterials Applied in Megahertz Wireless Power Transmission. **AIP Advance, 5**, 017142.

Zhang, Z., Zhang, B., Deng, B., Wei, X., & Wang, J. (2018). Opportunities and Challenges of Metamaterial–based Wireless Power Transfer for Electric Vehicles. **Wireless Power Transfer, 5**(1), 9–19.