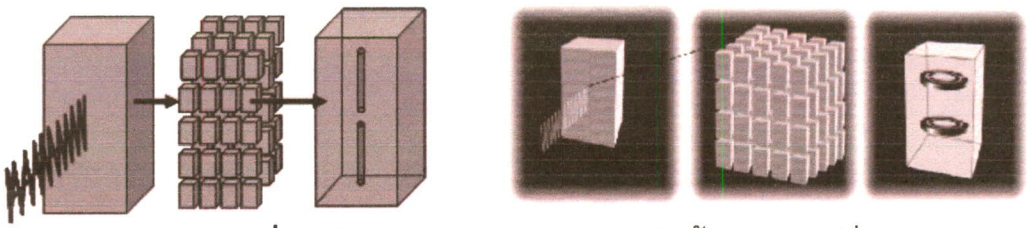
บทที่ 1
บทนำ: การกั้นและดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์

วัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ [1-2] (Metamaterials หรือ Artificial Electromagnetic Materials) ถูกสร้างขึ้นจากโครงสร้างเรโซแนนซ์ที่จัดเรียงเป็นแถวลำดับแบบคาบ เนื่องจากคาบและขนาดที่ใหญ่ที่สุดของโครงสร้าง มีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับความยาวคลื่นในช่วงที่ใช้งาน โครงสร้างสังเคราะห์ดังกล่าวจึงมีความเป็นเนื้อเดียว (Homogenous) โดยเมื่อคาบของโครงสร้างแถวลำดับ และความยาวคลื่นอยู่ในความสัมพันธ์ที่เหมาะสม คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและวัสดุโครงสร้างจะเกิดปฏิสัมพันธ์ที่ทั้งเสริมและหักล้างกัน ทำให้วัสดุเกิดพฤติกรรมแถบช่องว่างทางแม่เหล็กไฟฟ้า โดยปฏิสัมพันธ์ทั้งสองสามารถใช้เพื่อกำหนดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า (Permittivity) และค่าความซึมซาบได้ทางแม่เหล็ก (Permeability) ประสิทธิผลของวัสดุให้อยู่ในช่วงที่โดยปกติไม่สามารถทำได้ง่ายหรืออาจเป็นค่าที่ไม่มีอยู่ในวัสดุธรรมชาติได้ วัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างหลากหลาย นับตั้งแต่เรโซเนเตอร์จนถึงสายอากาศที่สามารถควบคุมทิศทางได้อย่างยอดเยี่ยม เช่น การพิมพ์นาโนด้วยแสง (Optical Nanolithography) วงจรไฟฟ้านาโน (Nano circuits) ตัวเคลือบเหนือธรรมชาติ (Meta-Coating) วัสดุล่องหน (Invisible Object) รวมถึงตัวบล็อกและดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า รูปที่ 1 แสดง โครงสร้างของวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ที่กระทำ และมีปฏิกิริยากับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

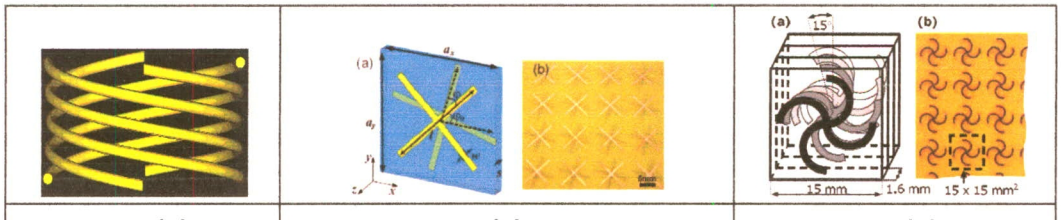


รูปที่ 1.1 โครงสร้างของวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ที่กระทำ
และมีปฏิกิริยากับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

เหตุที่วัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ถูกได้รับความสนใจจากนักวิทยาศาสตร์ และนักวิจัยเป็นอย่างมาก เพราะความสามารถในการควบคุมค่าทางไฟฟ้า (ในรูปของ Permittivity) และแม่เหล็ก (ในรูปของ Permeability) ได้ในช่วงความถี่เดียวกัน ซึ่งเชื่อมโยงไปสู่ค่าดัชนีการหักเห (Index of Refraction) โดยในยุคเริ่มแรก (ตั้งแต่ปี ค.ศ. 2000 เป็นต้นมา) การศึกษาวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์จะเน้นไปที่วัสดุที่มีค่าดัชนีการหักเหติดลบ ซึ่งไม่พบในวัสดุตามธรรมชาติ พฤติกรรมทางแม่เหล็กไฟฟ้าของวัสดุโครงสร้างในการพัฒนา Metamaterials ในช่วง

แรก (ค.ศ. 2000-ปัจจุบัน) ได้เปิดโลกทางวิทยาศาสตร์ และวิศวกรรมศาสตร์ จากการนำเอาหลักการออกแบบวัสดุโครงสร้างที่สามารถควบคุมค่า Permittivity (จากโครงสร้าง Wires [2]) และ Permeability (จากโครงสร้าง Split Ring Resonator, SRR [2]) ให้มีค่าติดลบหรือมีค่าสูงมากๆ ในช่วงความถี่ที่ต้องการได้

วัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ประเภทไคแรล (Chiral) เป็น Metamaterials ประเภทหนึ่งที่กำลังได้รับความสนใจมาก เนื่องจากสามารถแยกแสง [3] ควบคุมโพลาไรเซชัน และกรองสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าแบบควบคุมได้ [4-5] คุณสมบัติพิเศษทางแม่เหล็กไฟฟ้าของวัสดุไคแรลคือ ค่ากัมมันตภาพทางแสง (Optical Activity หรือ Optical Rotary Dispersion, ORD) และ Circular Dichroism (CD) คุณสมบัติ ORD ทำให้คลื่นที่มีโพลาไรเซชันใดๆ แยกเป็นสองคลื่นที่มีความเร็วเฟส (Phase Velocity) ที่ต่างกัน ในขณะที่คุณสมบัติ CD มีผลกับการดูดกลืนคลื่นที่เคลื่อนที่ผ่าน ทำให้เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเปลี่ยนโพลาไรเซชันเป็นแบบวงรีเมื่อเคลื่อนที่ออกจากวัสดุไคแรล คลื่นที่แยกออกและเคลื่อนที่ในวัสดุไคแรลเป็นคลื่นแบบโพลาไรเซชันแบบวงกลม (Circular Polarization) แบบหมุนซ้าย (Left Circular Polarization, LCP) และแบบหมุนขวา (Right Circular Polarization, RCP) [3] ตัวอย่างโครงสร้างของวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสามมิติ (3D-Chiral Structure) ที่มีคุณสมบัติไคแรล เช่น โครงสร้างแบบเกลียว (Helix) [4-6] ซึ่งวัสดุที่มีโครงสร้างแบบสามมิติเป็นโครงสร้างที่ทำได้ยากในการสร้างจริง ในปี ค.ศ. 2009-2010 จึงได้มีการพัฒนาโครงสร้างวัสดุประเภทไคแรลแบบสองมิติ (Planar Chiral Structures) [7] ซึ่งมีรูปร่างแบบ Cross-Wire [8] และ แบบ Rosetts [9] เป็นต้น รูปที่ 2 แสดงโครงสร้าง Helix, Cross-Wire และ Rosetts ตามลำดับ



(ก) (ข) (ค)

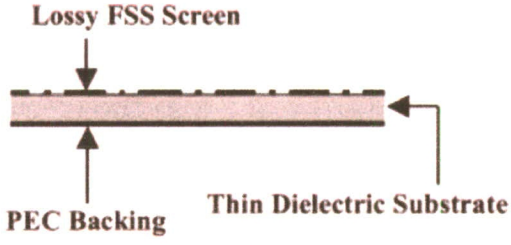
รูปที่ 1.2 โครงสร้าง (ก) Helix (ข) Cross-Wire และ (ค) Rosetts

ทั้งนี้หัวหน้าโครงการวิจัยได้ศึกษาและออกแบบวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ รูปแบบ C_n [10] เมื่อปี ค.ศ. 2009 ซึ่งมีความเป็น Isotropy สูง ทั้งยังสามารถควบคุมค่าดัชนีการหักเหได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ในส่วนหนึ่งของงานวิจัยปี ค.ศ. 2010 หัวหน้าโครงการวิจัยได้ออกแบบโครงสร้างเกลียวหลายสาย [4-5] และได้ค้นพบว่าโครงสร้างดังกล่าว เมื่อมีจำนวนเกลียวเพิ่มขึ้น จะมีผลทำให้วัสดุที่ได้ออกแบบมีค่าไคแรลสูงขึ้น ทำให้สามารถควบคุมการกรองคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ ซึ่งองค์ความรู้ดังกล่าวจะถูกนำมาประยุกต์ในการออกแบบวัสดุเกราะป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ทั้งนี้ดังที่ได้กล่าวในข้างต้น การสร้างวัสดุเกราะป้องกันจาก

Metamaterials ให้มีประสิทธิภาพที่ดี จะต้องการความหนาประมาณ 5-10 เท่าของความยาวคลื่น นั่นคือ **ความหนาของชั้นวัสดุที่ใช้เคลือบจะลดลงมากกว่าวัสดุปัจจุบัน** ซึ่งจะเป็นจุดเด่นในการสร้างวัสดุเกราะป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจาก Metamaterials

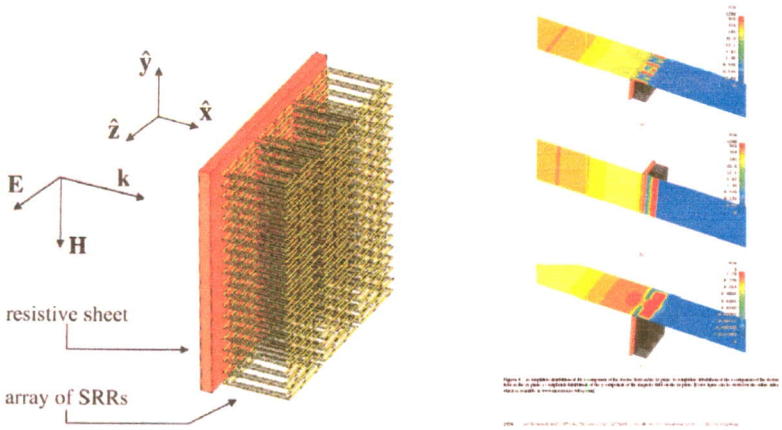
การออกแบบวัสดุโครงสร้างแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ เพื่อการเป็นเกราะป้องกันและดูดกลืนคลื่นสัญญาณที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพ จะต้องคำนึงถึงการปรับค่า Permittivity และ Permeability เพื่อให้ค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance) ของวัสดุตัวเกราะป้องกัน Match กับ Free Space และควรจะต้องมีค่าส่วนจินตภาพของดัชนีการหักเหที่สูง ซึ่งจะเป็นการทำให้ค่าอัตราการการสูญเสียสูง เป็นผลให้สามารถดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้สูงที่สุด นอกจากนี้การนำเอาความรู้ด้านพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือแสง เมื่อเคลื่อนที่ตกกระทบหรือแพร่ผ่านวัสดุโครงสร้างแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ จะสามารถช่วยพัฒนาการออกแบบวัสดุโครงสร้างแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ เพื่อเป็นเกราะป้องกันและดูดกลืนคลื่นสัญญาณได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ตัวอย่างเช่น ข้อจำกัดในการเกิดคลื่นเลือนหาย (Evanescent Wave) ในวัสดุโครงสร้างแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ประเภทไดแรล

วัสดุเกราะป้องกันสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแบบมาตรฐานทั่วไปจะหนา ทั้งยังไม่สามารถออกแบบให้บางลงได้อีก เนื่องจากข้อจำกัดของการเลี้ยวเบน (Diffraction) นอกจากนี้โครงสร้างตัวดูดกลืนคลื่นแบบมาตรฐานดังกล่าวยังจำเป็นต้องมีแผ่นโลหะ (Metallic Plates หรือ PEC Backing) ที่อยู่ใต้แผ่น Dielectric Substrate เพื่อหลีกเลี่ยงการส่งผ่านกำลังไฟฟ้า ดังแสดงที่รูปที่ 3 ในส่วนของ PEC Backing นำไปสู่ข้อจำกัดในการนำไปประยุกต์ใช้งาน ประกอบด้วย 1) การเคลือบอุปกรณ์ที่มีความเว้า โค้ง ตามรูปทรงของอุปกรณ์ หรือในกรณีที่ต้องการวัสดุที่มีความยืดหยุ่นเพื่อเคลือบอุปกรณ์ให้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ 2) การสร้างวัสดุเกราะป้องกันสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีโปร่งใส และ 3) การสร้างวัสดุโครงสร้างเกราะป้องกันสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความถี่สูง



รูปที่ 1.3 ส่วนประกอบของโครงสร้างดูดกลืนคลื่นแบบมาตรฐานประเภท Resistive Absorber ที่ความถี่ 6 GHz [11]

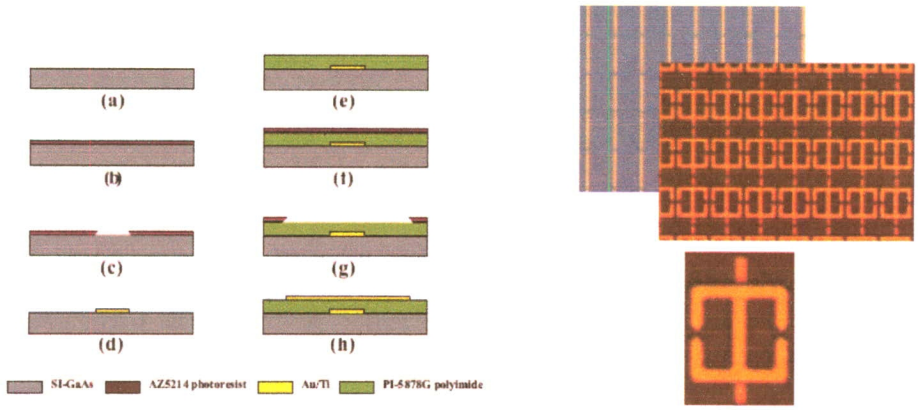
D. J. Kern และคณะ [11] และ Chakravarty และคณะ [12] จากมหาวิทยาลัย Pennsylvania State สหรัฐอเมริกา ได้ออกแบบวัสดุดูดกลืนคลื่นที่บางมาก (Ultra Thin) โดยใช้เทคนิค Frequency Selective Surface หรือ FSS แต่โครงสร้างดังกล่าวยังมีส่วนแผ่นโลหะอยู่ ในปี 2006 Bilotti และคณะ [13] ได้จัดวางโครงสร้าง Split Ring Resonators ในลักษณะแถวลำดับ (Array) ใต้ชั้นแผ่นต้านทาน (Resistive Sheet) ดังแสดงในรูปที่ 4 ทำให้ไม่จำเป็นต้องมีส่วน PEC Backing แต่ยังต้องมีส่วนของแผ่นต้านทานอยู่ ซึ่งมีข้อด้อยคือจะต้องมีการ Match ค่าอิมพีแดนซ์ ระหว่างแผ่นต้านทานดังกล่าวกับ Free Space



(ก) (ข)

รูปที่ 1.4 (ก) ส่วนประกอบของโครงสร้างดูดกลืนคลื่นออกแบบด้วย SRR และ (ข) ผลแสดงการดูดกลืนคลื่นของวัสดุเมื่อคลื่นที่ความถี่ 2 GHz เคลื่อนที่ผ่านวัสดุดังกล่าว [13]

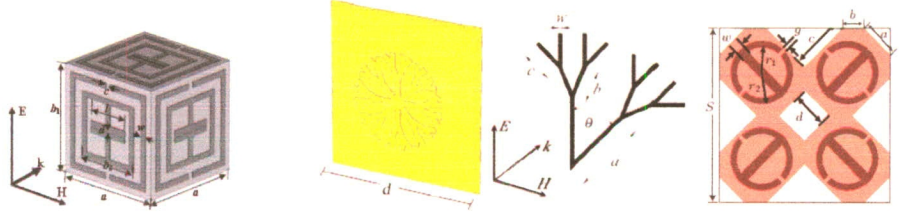
เมื่อปี 2008 กลุ่มคณะวิจัยของ Boston College (N. I. Landry และคณะ [14] และ H. Tao และคณะ [15]) ได้เสนอวัสดุเกราะป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ออกแบบด้วยวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์แบบ 1 มิติ โครงสร้างดังกล่าวประกอบด้วยส่วนโครงสร้างเรโซแนนซ์ทางไฟฟ้าและแม่เหล็ก (Electric and Magnetic Resonators) ตัวป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าดังกล่าวไม่มีส่วนแผ่น Resistive และ PEC Backing ดังแสดงในรูปที่ 5 การออกแบบดังกล่าวช่วยลดปัญหา Impedance Matching ทั้งยังแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการลดขนาดของวัสดุป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าให้มีขนาดเล็กลง และสามารถทำงานในช่วงความถี่ที่สูงขึ้นได้อีกด้วย



(ก) (ข)

รูปที่ 1.5 (ก) ขั้นตอนการสร้างโครงสร้างป้องกันคลื่นที่ทำงานในย่านความถี่ Terahertz และ (ข) โครงสร้างป้องกันคลื่นที่ออกแบบด้วย SRR และ Wire โดย H. Tao และคณะ [15]

วัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบตัวป้องกันและดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง ไม่ว่าจะเป็นการออกแบบให้โครงสร้าง 3 มิติ โดย J. F. Wang และคณะ [16] ในช่วงความถี่ x Band และในช่วงความถี่ที่สูงขึ้นในย่าน Infrared ด้วยโครงสร้าง Dendritic Cells โดย W. Zhu และคณะ [17] และการออกแบบให้ตัวป้องกันและดูดกลืนคลื่นทำงานสำหรับทุกลักษณะของการโพลาไรเซชันของคลื่น (Wave Polarizations) โดย Z. Bo และคณะ [18] ดังแสดงในรูปที่ 6



(ก) (ข) (ค)

รูปที่ 1.6 โครงสร้างดูดกลืนคลื่นออกแบบโดย (ก) J. F. Wang และคณะ [16] (ข) W. Zhu และคณะ [17] และ (ค) Z. Bo และคณะ [18]

ในส่วนของสิทธิบัตรที่เกี่ยวข้องกับการป้องกัน และดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จะแบ่งเป็น 2 แนวทางคือ 1) วัสดุที่ถูกสร้างเพื่อป้องกันและดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า [19-35] และ 2) ระบบโดยรวมเพื่อป้องกันและดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า [36-39] **ทั้งนี้ยังไม่มีสิทธิบัตรใด ที่ใช้ Metamaterials ในการออกแบบตัวเกราะป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า**

การสร้างวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ เพื่อเป็นเกราะป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถวางแผนและต่อยอด สำหรับพัฒนาต่อในเชิงพาณิชย์ต่อไปได้ ทั้งนี้การสร้างวัสดุ

โครงสร้างแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ ให้มีความสามารถในการกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความถี่ที่ต้องการ ทั้งยังควรจะมีการกระเจิงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อตกกระทบบนตัววัสดุน้อยที่สุดหรือไม่มีเลย โดยไม่ขึ้นกับทิศทางของคลื่นสัญญาณที่ตกกระทบ และเนื่องจากเป็นอุปกรณ์ประเภท Passive ไม่จำเป็นต้องใช้แหล่งพลังงานจากภายนอก และไม่สร้างสนามไฟฟ้าที่สูง จึงไม่มีผลกระทบร่างกายมนุษย์ จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์การแพทย์ ที่ต้องการป้องกันรังสีเอกซ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ พร้อมทั้งถ้ามีโปร่งใส มีน้ำหนักเบา บาง จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ในวัสดุอุปกรณ์ที่หลากหลาย

โครงการวิจัยนี้ ได้นำเสนอการออกแบบวัสดุโครงสร้างแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ เพื่อการเป็นเกราะป้องกันและดูดกลืนคลื่นสัญญาณที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพ โดยได้แบ่งเป็น 4 ส่วน คือ 1) การออกแบบโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ที่ค่าดัชนีหักเหมีค่าสูง ติดลบ และมีค่า Chirality ประกอบด้วยโครงสร้างเกลียวสองสายและเกลียวสามสาย ซึ่งเป็นโครงสร้างแบบ 3 มิติ และโครงสร้าง Bi-layer Conjugated C_n ซึ่งเป็นโครงสร้างแบบระนาบ 2) การออกแบบโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าสังเคราะห์ที่ค่าดัชนีหักเหเข้าใกล้ศูนย์ โดยใช้โครงสร้างร่างแห 3) การออกแบบวัสดุปิดกั้นคลื่นสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ Bandwidth แคบ ที่สามารถปรับช่วงความถี่ได้ และ 4) การออกแบบวัสดุป้องกันคลื่นสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านรังสีเอ็กซ์