

## อภิวัสดุ

### Metamaterials

นิวัต อังควิศิษฐ์พันธ์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อ.กันทรลักษย จ.มหาสารคาม 44150

Niwat Angkawisitpan

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Kantarawichai,  
Mahasarakham 44150

Tel : 0-4375-4316 E-mail: niwat.a@msu.ac.th

#### บทคัดย่อ

อภิวัสดุคือวัสดุชนิดใหม่ที่จัดอยู่ในกลุ่มของวัสดุผสม อภิวัสดุสามารถแสดงคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไม่ปกติ ซึ่งไม่สามารถพบได้ในวัสดุทั่ว ๆ ไปในธรรมชาติ เช่น ค่าดัชนีการหักเหของแสงเป็นลบ และค่าความชាបซึ่งได้ทางแม่เหล็กเป็นลบ งานวิจัยเกี่ยวกับอภิวัสดุจะแสดงถึงปรากฏการณ์พิเศษทางพิสิกส์ และเน้นการพัฒนาอภิวัสดุเพื่อประยุกต์ใช้งานได้จริงทางด้านไมโครเวฟและการสื่อสาร เช่น การพัฒนาสายอากาศ และวัสดุล่องหน บทความนี้จะแนะนำให้รู้จักอภิวัสดุ ประวัติความเป็นมา การจำแนกประเภท การออกแบบการประยุกต์ใช้งาน และปรากฏการณ์พิเศษทางพิสิกส์ คำเหล็ก อภิวัสดุ ดัชนีการหักเหของแสงเป็นลบ ค่าความชាបซึ่งได้ทางแม่เหล็กเป็นลบ

#### Abstract

Metamaterials are a new class of composite materials that exhibit unusual electromagnetic properties that are not found in conventional materials such as negative refractive index and negative magnetic permeability. The research of metamaterials has not only demonstrated interesting physical phenomena but has also led to the development of microwave and communication applications such as antennas and invisible objects. This article provides an introduction to metamaterials: history, classification, design,

applications, and extraordinary physical phenomena.

**Keywords:** Metamaterials, negative refractive index, negative magnetic permeability.

#### 1. บทนำ

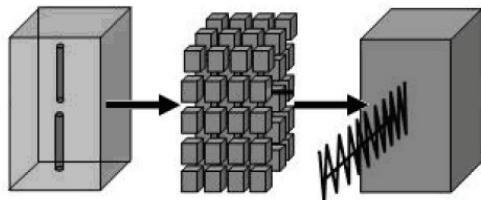
อภิวัสดุ (Metamaterials) คือวัสดุทางแม่เหล็กไฟฟ้านิยามนี้ที่คุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าถูกสังเคราะห์หรือออกแบบขึ้นอย่างเหมาะสมเพื่อให้สามารถไฟฟ้า (electric fields) และสนามแม่เหล็ก (magnetic fields) กระทำปฏิกิริยาร่วมกับอะตอมเทียม (artificial atoms) และเกิดคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าตามที่ต้องการได้ [1]

คุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้กล่าวไปแล้วนั้น คือ ค่าส่วนยอทางไฟฟ้า (electric permittivity,  $\epsilon$ ) ค่าความชាបซึ่งได้ทางแม่เหล็ก (magnetic permeability,  $\mu$ ) และค่าดัชนีการหักเหของแสง (refractive index,  $n$ ) โดยทั่วไปวัสดุในธรรมชาติจะมีค่าความชាបซึ่งได้ทางแม่เหล็ก และค่าดัชนีการหักเหของแสงเป็นบวก ซึ่งเกิดจากอะตอมของเนื้อวัสดุนั้น ๆ ทำปฏิกิริยาร่วมทางแม่เหล็กไฟฟ้ากับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

เมื่อเราทำการออกแบบอะตอมเทียมสำหรับอภิวัสดุให้มีลักษณะของโครงสร้างที่แตกต่างกันออกไป ทำให้เราสามารถออกแบบคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ต่างออกไปจากที่มีอยู่ในธรรมชาติ เช่น ค่าความชាបซึ่งได้ทางแม่เหล็กเป็นลบ และค่าดัชนีการหักเหของแสงเป็นลบ เป็นต้น ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่เราไม่สามารถหาได้ในวัสดุธรรมชาติ ด้วยเหตุผลนี้วัสดุทางแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดนี้

จึงถูกขนานนามอีกว่า “วัสดุเหนือธรรมชาติ” [2]

โครงสร้างของอะตอมเทียมที่ประกอบขึ้นเป็นอวิวัสดุจะถูกจัดเรียงเป็นลักษณะโครงสร้างคาด (periodic structures) และขนาดของโครงสร้างของอะตอมเทียมจะมีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ในช่วงทำงาน (operating wavelength) เพื่อที่จะทำให้อวิวัสดุนี้แสดงคุณสมบัติความเป็นเนื้อเดียวกัน (homogenous property) และโครงสร้างคาดของอะตอมเทียมนี้ จะประพฤติตัวเป็นเหมือนอะตอมที่จะมีปฏิกิริยากระทำร่วมกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 1 [3]



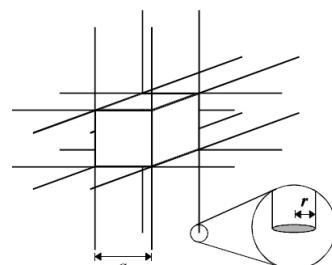
รูปที่ 1 โครงสร้างอวิวัสดุแบบรายคาดกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า [3]

คำว่า “Meta” เป็นภาษากรีก หมายความว่า “อภิ” “ยิ่ง” “ใหญ่” หรือ “เหนือ” และคำว่า “Materials” แปลว่า “วัสดุ” หรือ “วัตถุ” เราอาจกล่าวได้ว่า อวิวัสดุคือวัสดุที่มีคุณสมบัติเหนือวัสดุที่มีอยู่ในธรรมชาติ เพราะเราไม่สามารถหาวัสดุที่มีอยู่ในธรรมชาติที่มีค่าความซับซึมได้ทางแม่เหล็ก และค่าดัชนีการหักเหของแสงเป็นลบได้ แต่เราสามารถหาได้จากอวิวัสดุ

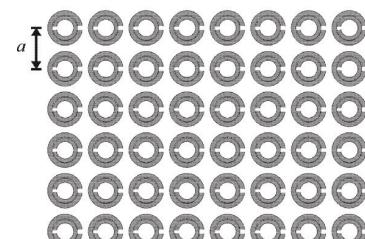
มีการศึกษาอวิวัสดุเริ่มแรกในปี ค.ศ. 1904 โดย A. Schuster [4] ซึ่งได้ศึกษาความเร็วไฟฟ้าที่เป็นลบในอวิวัสดุ (negative phase velocity) หลังจากนั้นได้มีการทิ้งช่วงการศึกษาอวิวัสดุไปกว่า 6 ทศวรรษ จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1968 V. G. Veselago นักวิทยาศาสตร์ชาวรัสเซีย ได้เผยแพร่ผลงานวิจัยเรื่องอวิวัสดุในวารสารวิชาการของประเทศรัสเซีย ในงานวิจัยชั้นนี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับวัสดุที่มีค่าดัชนีการหักเหของแสงเป็นลบเนื่องจาก วัสดุนั้นมีค่าความซับซึมได้ทางแม่เหล็ก และค่าสภาพย้อมทางไฟฟ้าเป็นลบในช่วงความยาวคลื่นเดียวกันของแสง ซึ่งไม่สามารถเกิดขึ้นได้ในวัสดุธรรมชาติ เขาได้แสดงปรากฏการณ์ทางแสงที่สามารถเกิดขึ้นได้ในอวิวัสดุชนิดนี้ ซึ่งเป็นเพียงการแสดงผลทางทฤษฎีเท่านั้น [5]

จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1996 J. B. Pendry และคณะ

ได้เผยแพร่ผลงานวิจัยจากการทดลองเกี่ยวกับอวิวัสดุชั้นใหม่ ในงานวิจัยชั้นนี้ เขายieldได้นำเสนอโครงสร้างอวิวัสดุที่ค่าสภาพย้อมทางไฟฟ้าเป็นลบจากโครงสร้างคาดสำหรับเส้นลวด (array of wires) [6] ดังแสดงในรูปที่ 2 จากนั้นอีก 3 ปีต่อมา เขายieldได้นำเสนอโครงสร้างของอวิวัสดุที่มีค่าความซับซึมได้ทางแม่เหล็กเป็นลบจากโครงสร้างตัวกำหนดแบบวงแหวนแยก (Split Ring Resonators, SRR) [7] ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 2 โครงสร้างคาดสำหรับเส้นลวดของ J.B.Pendry และคณะ [6]



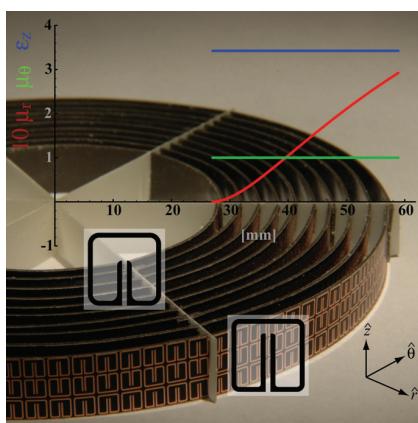
รูปที่ 3 โครงสร้างตัวกำหนดแบบวงแหวนแยกของ J.B.Pendry และคณะ [7]

จากนั้นในปี ค.ศ. 2000 D. R. Smith และคณะ [8] ได้สร้างอวิวัสดุประเภทที่มีค่าดัชนีการหักเหของแสงเป็นลบ จึงถือได้ว่าเป็นยุคเริ่มต้นของอวิวัสดุประเภทดัชนีการหักเหของแสงเป็นลบ (negative refractive index metamaterials) รูปที่ 4 แสดงอวิวัสดุประเภทค่าดัชนีการหักเหของแสงเป็นลบ

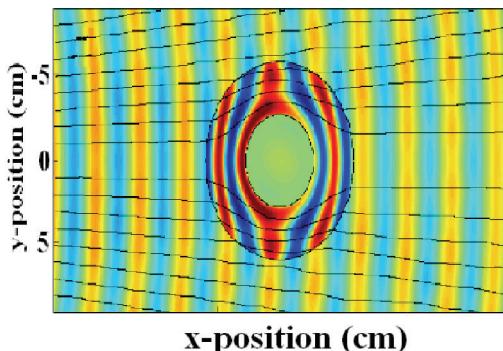


รูปที่ 4 อวิวัสดุประเภทค่าดัชนีการหักเหของแสงเป็นลบของ D.R.Smith และคณะ [8]

ด้วยคุณสมบัติพิเศษจากอวิสสูตที่สามารถซุกออกแบบให้มีค่าคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าตามที่ต้องการ ซึ่งต่างจากอวิสสูตในธรรมชาติ ทำให้ D. Schurig และคณะ ได้ทำการออกแบบและสร้างวัสดุล่องหนจากอวิสสูตในช่วงความถี่ไมโครเวฟ (cloaking device) ดังแสดงในรูปที่ 5 และ 6 ผลงานวิจัยชั้นนี้ได้ถูกเผยแพร่ในปี ค.ศ. 2006 [9] ผลงานชั้นนี้เป็นที่ก่อถ่วงกันอย่างมากในวงการวิจัยของสหรัฐอเมริกา



รูปที่ 5 วัสดุล่องหนในช่วงความถี่ไมโครเวฟที่ทำจากอวิสสูตของ D.Schurig และคณะ [9]

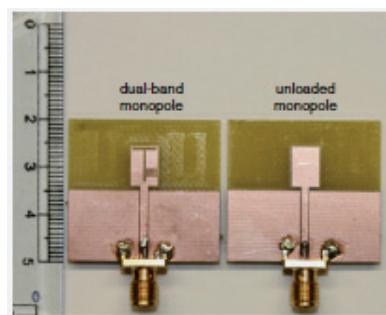


รูปที่ 6 ผลการจำลองของคลื่นไมโครเวฟที่ถูกแพร่ผ่านวัสดุล่องหน ในรูปที่ 5 [9]

## 2. การประยุกต์ใช้งาน

นอกจากวัสดุล่องหนแล้วยังมีผลงานวิจัยที่ได้จากการพัฒนาอวิสสูตอีก เช่น สายอากาศแบบทำงาน 2 ช่วง ความถี่สำหรับระบบเครือข่ายห้องถีนแบบไร้สาย (WLAN antenna) ถูกพัฒนาโดย J. Zhu และคณะ ดังรูปที่ 7 โดยใช้สายอากาศข้าวเดียวแบบระนาบ (planar monopole antenna) เพื่อให้ช่วงความถี่ทำงานที่ความถี่ 5.2 GHz และใช้อวิสสูตเป็นตัวกำเนิดกำทอน เพื่อให้เกิดช่วง

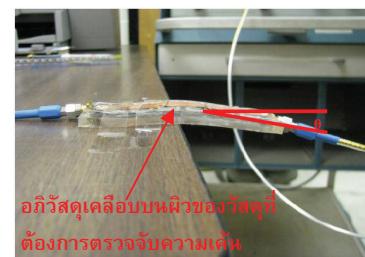
ความถี่ทำงานที่ความถี่ 2.4 GHz ซึ่งไม่จำเป็นต้องขยายขนาดของสายอากาศ [10] การลดขนาดของสายอากาศด้วยอวิสสูตถูกพัฒนาโดย N. Angkawisitpan ดังรูปที่ 8 โดยอาศัยการเกิดกำทอนจากโครงสร้างกำทอนแบบวงแหวนแยกที่ความถี่ทำงานที่ต้องการ [3] และการใช้อวิสสูตในการตรวจจับความเค้นหรือรอยแตกของอวิสสูตทั่วไป ถูกพัฒนาโดย N. Angkawisitpan และคณะ ดังรูปที่ 9 โดยอาศัยการเลื่อนของความถี่กำทอน (resonant frequency) เมื่อผิวของวัสดุมีความเค้นเกิดขึ้น [11]



รูปที่ 7 สายอากาศแบบทำงาน 2 ช่วงความถี่ด้วยอวิสสูต [10]



รูปที่ 8 การลดขนาดสายอากาศด้วยอวิสสูต [3]



รูปที่ 9 การตรวจจับความเค้นหรือรอยแตกของวัสดุด้วยอวิสสูต [11]

จากคุณสมบัติพิเศษที่ไม่มีในวัสดุธรรมชาติและความสามารถของอวิสสูตที่สามารถถูกนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านฟิสิกส์ วิศวกรรมไมโครเวฟ วิศวกรรมแสง

วิศวกรรมสื่อสาร และด้านอื่น ๆ ทำให้อภิวัสดุถูกจัดให้เป็นหนึ่งในสิบของสิ่งประดิษฐ์หรือสิ่งที่ค้นพบแห่งปีจากวารสารวิทยาศาสตร์ (science journal) ในปี ค.ศ. 2003 [12]

### 3. การออกแบบอภิวัสดุ

จากคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าของอภิวัสดุ เราสามารถแบ่งประเภท และออกแบบอภิวัสดุประเภทต่าง ๆ ได้ดังนี้

#### 3.1 อภิวัสดุประเภทค่าสภายอมทางไฟฟ้าเป็นลบ

ในการออกแบบโครงสร้างของอะตอมเทียมในอภิวัสดุให้มีค่าสภายอมทางไฟฟ้าเป็นลบ จะใช้หลักการการเกิดพลาสมอน (plasmon) หรือหลักการที่กลุ่มของอิเลคตรอน (electrons) ในโลหะมีตระกูล (noble metals) เกิดการสั่น (oscillation) เนื่องจากมันถูกกระตุ้นด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูง ๆ ในย่านความถี่แสง ความถี่ที่ใช้ในการกระตุ้นจะต้องมีความถี่ที่ต่ำกว่าความถี่พลาสม่า (plasma frequency,  $\omega_p$ ) ของโลหะมีตระกูลนั้น ๆ เพื่อให้เกิดค่าสภายอมทางไฟฟ้าเป็นลบ ซึ่งมีรูปโครงแบบดูรูด (Drude model) ดังสมการที่ (1) [1]

$$\epsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\gamma)} \quad (1)$$

เมื่อ  $\omega_p$  คือความถี่พลาสม่าของโลหะมีตระกูลใด ๆ (มีหน่วยเป็น เรเดียนต่อวินาที) และ  $\gamma$  คือความถี่ของการหน่วง (damping frequency) ซึ่งเป็นส่วนของการสูญเสียของการแพร่กระจายของพลังงานเข้าไปในโลหะ ตัวอย่างของค่าความถี่พลาสม่า และความถี่ของการหน่วงของโลหะมีตระกูลบางชนิดแสดงในตารางที่ 1 [13]

ตารางที่ 1 ความถี่พลาสม่า และความถี่ของการหน่วงของโลหะมีตระกูลบางชนิด [13]

โลหะมีตระกูล	ความถี่พลาสม่า (เรเดียนต่อวินาที)	ความถี่การหน่วง (เรเดียนต่อวินาที)
เงิน	$1.37 \times 10^{16}$	$2.73 \times 10^{13}$
ทองคำ	$1.37 \times 10^{16}$	$4.07 \times 10^{13}$
ทองแดง	$1.20 \times 10^{16}$	$5.24 \times 10^{13}$

จากการออกแบบตามสมการที่ (1) J.B. Pendry และคณะได้ทำการสร้างอภิวัสดุชนิดนี้โดยการนำเส้นลวดอลูมิเนียมมาจัดเรียงให้เป็นโครงสร้างคاب และมีความยาวอันนั้น

ดังรูปที่ 2 [6] จากนั้นเข้าทำการทดลองโดยการปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแบบรบกวน (electromagnetic planewave) กระแทกับอภิวัสดุชนิดนี้ เพื่อทำการวัดและคำนวณหาค่าสภายอมทางไฟฟ้ายังผล (effective electric permittivity,  $\epsilon_{eff}$ ) ผลการทดลองพบว่า ค่าความถี่พลาสม่าของโครงสร้างลักษณะนี้มีค่าดังสมการที่ (2)

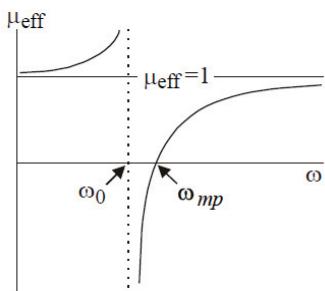
$$\omega_p = \frac{2\pi c_0^2}{a^2 \ln(\frac{a}{r})} \quad (2)$$

เมื่อ  $a$  คือ ระยะห่างระหว่างเส้นลวด (เมตร)  $r$  คือ รัศมีของเส้นลวด (เมตร) และ  $c_0$  คือ ความเร็วแสงขนาด  $3 \times 10^8$  เมตรต่อวินาที ดังนั้นค่าสภายอมทางไฟฟ้ายังผลของอภิวัสดุชนิดนี้ ทุกความถี่ที่ต่ำกว่าความถี่พลาสม่าจะมีค่าเป็นลบ

#### 3.2 อภิวัสดุประเภทค่าความซับซึมได้ทางแม่เหล็กเป็นลบ

ในการออกแบบโครงสร้างของอะตอมเทียมในอภิวัสดุให้มีค่าความซับซึมได้ทางแม่เหล็กเป็นลบ จะใช้หลักการการเกิดกำทอน (resonance) ในโครงสร้างของตัวกำทอนแบบวงแหวนแยก (Split Ring Resonators, SRR) ดังรูปที่ 3 [7] เมื่อ J.B. Pendry และคณะได้ทำการทดลองโดยการปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแบบรบกวน กระแทกับอภิวัสดุชนิดนี้ เพื่อทำการวัดและคำนวณหาค่าความซับซึมได้ทางแม่เหล็กยังผล (effective magnetic permeability,  $\mu_{eff}$ ) ผลการทดลองพบว่า ค่าความซับซึมได้ทางแม่เหล็กยังผลมีค่าเป็นลบในช่วงระหว่างความถี่กำทอนทางแม่เหล็ก (magnetic resonant frequency,  $\omega_0$ ) และความถี่พลาสม่าทางแม่เหล็ก (magnetic plasma frequency,  $\omega_{mp}$ ) ดังแสดงในรูปที่ 10 ค่าความซับซึมได้ทางแม่เหล็กจะมีรูปโฉมแบบล้อเรนท์ซ (Lorentz model) และสามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ (3)

$$\mu_{eff} = 1 - \frac{\frac{\pi r^2}{a^2}}{1 + \frac{i2\sigma}{\omega\mu_0 r} - \frac{3dc_0^2}{\pi^2\omega^2 r^3}} \quad (3)$$



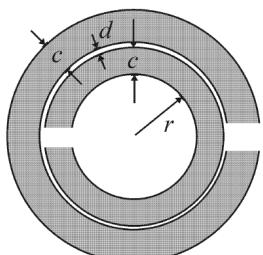
รูปที่ 10 ค่าความชื้นที่ได้ทางแม่เหล็กยังผลของอภิวัสดุชนิดตัว กำหนดแบบวงแหวนแยก [7]

จากรูปที่ 10 ความถี่กำหนดทางแม่เหล็ก ( $\omega_0$ ) และ ความถี่พลาสมาทางแม่เหล็ก ( $\omega_{mp}$ ) สามารถคำนวณได้ จากรูปที่ (4) และ (5) ตามลำดับ

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{3dc_0^2}{\pi^2 r^3}} \quad (4)$$

$$\omega_{mp} = \sqrt{\frac{3dc_0^2}{\pi^2 r^3 (1 - \frac{\pi r^2}{a^2})}} \quad (5)$$

เมื่อ  $a$   $d$   $r$  และ  $c$  คุณระบุไว้ในรูปที่ 3 และ 11 และค่าคงที่ อื่น ๆ มีค่าดังต่อไปนี้ ค่า  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  เอ็นรีต่อเมตร  $c_0 = 3 \times 10^8$  เมตรต่อวินาที  $i = \sqrt{-1}$  และค่า  $\sigma = 200$  ถึง 2,000



รูปที่ 11 ลักษณะของอะตอมเทียมเพียงอะตอมเดียวของอภิวัสดุ ชนิดตัวกำหนดแบบวงแหวนแยก [7]

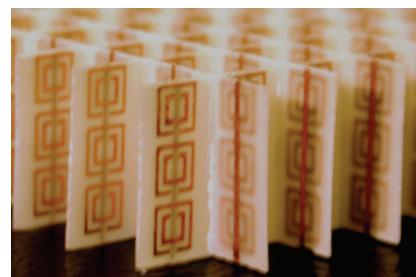
**3.3 อภิวัสดุประเภทค่าดัชนีการหักเหของแสงเป็นลบ**  
ในการออกแบบโครงสร้างของอะตอมเทียมในอภิวัสดุให้มีค่าดัชนีการหักเหของแสงยังผล (effective refractive index,  $n_{eff}$ ) เป็นลบ มีหลายหลักการที่จะได้

กล่าวต่อไปนี้

3.3.1 R.A. Shelby และ คณะ [14] ได้ใช้หลักการพื้นฐาน ตามสมการที่ (6)

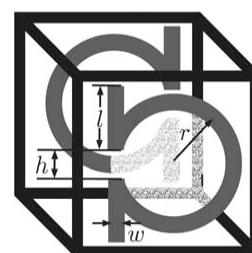
$$n_{eff}(\omega) = -\sqrt{|\mu_{eff}(\omega)| \cdot |\epsilon_{eff}(\omega)|} \quad (6)$$

ซึ่งก็คือการนำเอาโครงสร้างของแก้วลำดับของเส้นลวดที่ มีค่าสภาพย้อมทางไฟฟ้าเป็นลบมาอยู่ร่วมกันกับ โครงสร้างตัวกำหนดแบบวงแหวนแยกที่มีค่าความชื้นที่ได้ทางแม่เหล็กเป็นลบ เพื่อให้มีค่าดัชนีการหักเหของ แสงยังผลเป็นลบ โครงสร้างดังกล่าวแสดงในรูปที่ 12



รูปที่ 12 ลักษณะของอภิวัสดุที่เกิดจากนำโครงสร้างแก้วลำดับของ เส้นลวดมาร่วมกับโครงสร้างของตัวกำหนดแบบวงแหวนแยกของ R.A. Shelby และ คณะ [14]

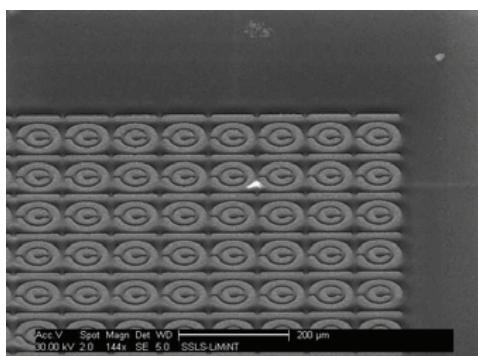
3.3.2 C.R. Simovski และ คณะ [15] ได้ออกแบบ โครงสร้างของอภิวัสดุใหม่เพื่อให้มีค่าดัชนีการหักเหของ แสงยังผลเป็นลบโดยการดัดแปลงโครงสร้างของตัวกำหนดแบบวงแหวนแยกให้มีเส้นลวดยาวขึ้นที่ต่ำแห่งนี้แยก ทำให้โครงสร้างนี้มีลักษณะคล้ายกับตัวอักษรกรีกที่เรียกว่า โอมega (Omega, Ω) ทำให้มีค่าสภาพย้อมทางไฟฟ้าและค่าความชื้นที่ได้ทางแม่เหล็กเป็นลบใน โครงสร้างเดียวกัน โครงสร้างโอมega ดูได้จากรูปที่ 13



รูปที่ 13 ลักษณะของอะตอมเทียมของอภิวัสดุที่มีค่าดัชนีการหักเห ของแสงยังผลเป็นลบของ C.R. Simovski และ คณะ [15]

นอกเหนือจากการออกแบบและสร้างอภิวัสดุ ในช่วงความถี่ไมโครเฟลล์ส กลุ่มนักวิจัยหลายกลุ่มได้ทำการขยายขอบเขตของการศึกษาอภิวัสดุไปในระดับความถี่แสง การที่จะให้อภิวัสดุทำงานในระดับความถี่แสง ซึ่งมีความยาวคลื่นที่สั้นในระดับนาโนเมตร (400-800 นาโนเมตร) จะต้องสร้างอะตอมเทียมของอภิวัสดุให้ได้ขนาดระดับนาโนเมตรเช่นกัน นับว่าเป็นโชคดี เพราะในปัจจุบันนี้เทคโนโลยีทางด้านนาโน (nanotechnology) ของโลกได้พัฒนาอย่างต่อเนื่องและรวดเร็ว ทำให้มีเป็นปัญหาและอุปสรรคต่องานวิจัยทางด้านอภิวัสดุในระดับความถี่แสง

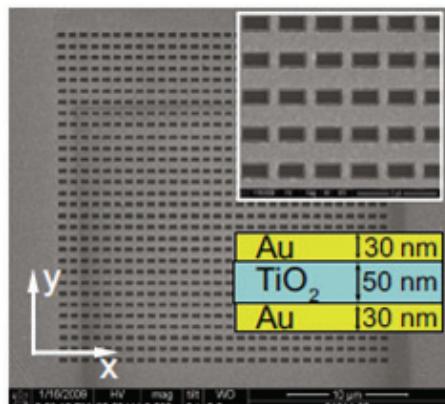
3.3.3 B.D.F. Casse และ คณะ [16] ได้นำโครงสร้างของอภิวัสดุของ R.A.Shelby และคณะ ไปสร้างในระดับนาโนเมตร เพื่อให้อภิวัสดุนี้ให้ค่าดัชนีการหักเหของแสงยังผลเป็นลบในช่วงไก้ความถี่แสง รูปที่ 14 แสดงโครงสร้างระดับนาโนเมตรของอะตอมเทียมจากห้องคำนวนเฟอร์ซิลิคอน (Silicon wafer)



รูปที่ 14 อภิวัสดุที่มีค่าดัชนีการหักเหของแสงยังผลในช่วงไก้ความถี่แสงเป็นลบที่มีขนาดในระดับนาโนเมตรของ B.D.F. Casse และคณะ [16]

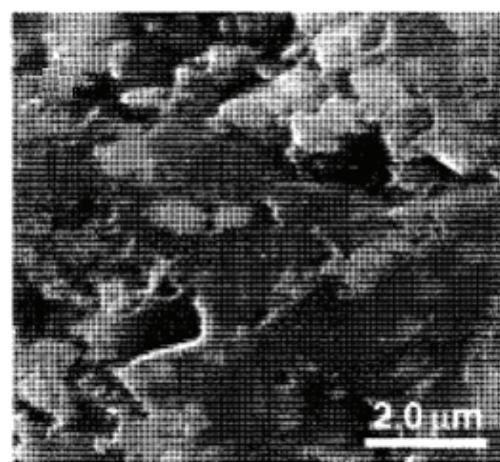
3.3.4 A. Minovich และ คณะ [17] ได้ออกแบบโครงสร้างของอภิวัสดุในรูปแบบตาข่ายปลา (fishnet) ซึ่งโครงสร้างตาข่ายปลานี้จะมีด้วยกัน 3 ชั้นคือ ทองคำ(Au)-ไทเทเนียมไดออกไซด์( $TiO_2$ )-ทองคำ(Au) การสาแกนของตาข่ายนี้จะทำให้ได้รับค่าความชับซึ่งได้ทางแม่เหล็กเป็นลบจากวงจรวนรอบ (loop circuit) ของทั้ง 3 ชั้น และแก้ไขสำหรับรายค่าของเส้นลวดทองคำจะให้ค่าสภากยมองทางไฟฟ้าเป็นลบ โดยอาศัยหลักการเดียวกับงานวิจัยของ J.B.Pendy และคณะ ในปี ค.ศ.1996 [6] ด้วยเหตุนี้ทำให้เราได้อภิวัสดุประเภทดัชนีการหักเหของ

แสงยังผลเป็นลบในช่วงความถี่แสงที่มีรูปร่างเป็นแบบตาข่ายปลา ดังแสดงในรูปที่ 15



รูปที่ 15 อภิวัสดุแบบตาข่ายปลาที่มีค่าดัชนีการหักเหของแสงยังผลในช่วงความถี่แสงเป็นลบ ของ A. Minovich และคณะ [17]

3.3.5 A. Kussow และ คณะ [18] ซึ่งผู้เขียนเป็นหนึ่งในสมาชิกของกลุ่มวิจัยนี้ได้ออกแบบ และสร้างอภิวัสดุในลักษณะของวัสดุผสม (composite material) อภิวัสดุนิดนี้เกิดจากการผสมระหว่าง แมกนีเซียมไดบอริด (Magnesium Diboride,  $MgB_2$ ) และ ซิลิคอนคาร์บไบเด (Silicon Carbide,  $SiC$ ) ในอัตราส่วนหนึ่งตามทฤษฎีของเลวิน (Lewin Theory) และทฤษฎีของแมกน์เวลการ์เนตต์ (Maxwell Garnett Theory) ทำให้ได้รับค่าดัชนีการหักเหของแสงยังผลเป็นลบในช่วงความถี่แสง และมีค่าการสูญเสียที่ต่ำอีกด้วย รูปที่ 16 แสดงภาพถ่ายของอภิวัสดุแบบวัสดุผสมที่ได้ [19]



รูปที่ 16 ภาพถ่ายของอภิวัสดุแบบวัสดุผสมที่มีค่าดัชนีการหักเหของแสงยังผลในช่วงความถี่แสงเป็นลบ [19]

#### 4. ปรากฏการณ์พิเศษทางฟิสิกส์ของอภิวัสดุ

นอกเหนือจากเทคนิคต่าง ๆ ในการออกแบบอภิวัสดุที่เราได้ทราบมาแล้ว อภิวัสดุยังมีคุณสมบัติพิเศษทางฟิสิกส์อีกด้วย เช่น

##### 4.1 ปรากฏการณ์ดอปเพลอร์แบบทวนกลับ

ปรากฏการณ์ดอปเพลอร์ (Doppler Effect) คือปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ที่ความถี่และความยาวคลื่นของสัญญาณจากผู้ส่ง (transmitter) มาถึงผู้รับ (receiver) ได้ถูกเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากความเร็วสัมพัทธ์ (relative velocity) ระหว่างผู้ส่งเทียบกับผู้รับ สมการที่ (7) แสดงความสัมพันธ์ดังกล่าว

$$\omega = \omega_0 \left(1 - n \frac{v}{c_0}\right) \quad (7)$$

เมื่อ  $\omega_0$  คือ ความถี่ของสัญญาณจากผู้ส่ง  $v$  คือ ความเร็วสัมพัทธ์ของผู้ส่งเทียบกับผู้รับ  $c_0$  คือ ความเร็วแสง  $3 \times 10^8$  เมตรต่อวินาที  $n$  คือดัชนีการหักเหของแสงของตัวกลาง (medium) และ  $\omega$  คือความถี่ของสัญญาณที่ปรากฏต่อผู้รับ

โดยปกติ เมื่อความเร็วสัมพัทธ์ของผู้ส่งเทียบกับผู้รับเป็นบวก และค่าดัชนีการหักเหของแสงของตัวกลางเป็นบวก จะทำให้ความถี่ของสัญญาณที่ปรากฏต่อผู้รับมีค่าต่ำกว่าความถี่ของสัญญาณจากผู้ส่ง ดังสมการที่ (7) อย่างไรก็ตาม เมื่อความเร็วสัมพัทธ์ของผู้ส่งเทียบกับผู้รับบังคับเป็นบวก แต่ค่าดัชนีการหักเหของแสงของตัวกลางเป็นลบ (เช่น ตัวกลางอภิวัสดุประเภทดัชนีการหักเหของแสงเป็นลบ) จะทำให้ความถี่ของสัญญาณที่ปรากฏต่อผู้รับมีค่าสูงกว่าความถี่ของสัญญาณจากผู้ส่ง ปรากฏการณ์แบบพิเศษนี้เรียกว่า “ปรากฏการณ์ดอปเพลอร์แบบทวนกลับ (Reversal of Doppler Effect)”

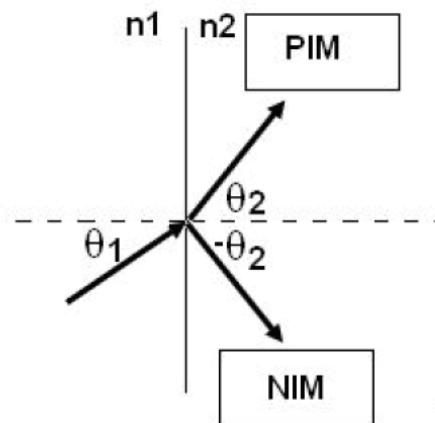
##### 4.2 กฎของสเนลล์แบบทวนกลับ

กฎของสเนลล์ (Snell's Law) คือกฎที่ว่าด้วยความสัมพันธ์ของมุมที่ตกลง (incident angle,  $\theta_1$ ) มุมที่หักเห (refraction angle,  $\theta_2$ ) และค่าดัชนีการหักเหของแสงของตัวกลาง 2 ชนิด ( $n_1$  และ  $n_2$ ) ดังสมการที่ (8)

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (8)$$

เมื่อได้ก็ตามที่ตัวกลาง  $n_2$  มีค่าเป็นลบ จะทำให้  $\theta_2$  มีค่าเป็นลบด้วย เพื่อรักษาไว้ซึ่งกฎของสเนลล์ ด้วยเหตุนี้จึง

ทำให้มุมของการหักเหของแสงในตัวกลาง  $n_2$  มีค่าเป็นลบ นั่นก็คือมุมการหักเหก็จะเป็นไปในทิศทางมุมลบ ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า “ปรากฏการณ์ของสเนลล์แบบทวนกลับ (Reversal of Snell's Law)” รูปที่ 17 แสดงปรากฏการณ์ของสเนลล์และปรากฏการณ์ของสเนลล์แบบทวนกลับ เมื่อ PIM คือ ตัวกลาง  $n_2$  มีค่าเป็นบวก และ NIM คือ ตัวกลาง  $n_2$  มีค่าเป็นลบ



รูปที่ 17 แสดงปรากฏการณ์ของสเนลล์และปรากฏการณ์ของสเนลล์แบบทวนกลับ [3]

#### 4. บทวิเคราะห์

จากการปริทัศน์วรรณกรรมของอภิวัสดุ ผู้เขียนได้กล่าวถึงคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าของอภิวัสดุที่ไม่สามารถพดได้ในอัสดุธรรมชาติทั่ว ๆ ไป เช่น ค่าดัชนีการหักเหของแสงเป็นลบ และค่าความซับซึมได้ทางแม่เหล็กเป็นลบ ในบทความนี้ ผู้เขียนได้จำแนกอภิวัสดุออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ ๆ ตามคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้า และยังได้กล่าวถึงวิธีการออกแบบในแต่ละกลุ่มด้วย นอกจากคุณสมบัติพื้นฐานของอภิวัสดุที่ผู้เขียนได้กล่าวไปแล้วนั้น ผู้เขียนยังได้แนะนำการประยุกต์ใช้งานจริง เช่น การรวมເອอภิวัสดุเข้ากับอุปกรณ์ทางด้านโทรคมนาคมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ทางด้านโทรคมนาคม และการตรวจจับความเคลื่อนไหวของอัสดุทั่วไป ผู้เขียนเห็นว่า งานวิจัยทางด้านอภิวัสดุในระยะเริ่มต้นจะเน้นที่เทคนิคในการออกแบบ และสร้างอภิวัสดุเพื่องานวิจัยทางด้านอภิวัสดุยังเป็นงานวิจัยในระยะเริ่มต้น ในขณะที่งานวิจัยทางด้านอภิวัสดุในปัจจุบันจะเน้นให้อภิวัสดุมีส่วนเกี่ยวข้องในการพัฒนาอุปกรณ์

ทางด้านวิศวกรรมสื่อสาร วิศวกรรมแสง และวิศวกรรมไมโครเวฟ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานได้จริง จุดนี้เป็นจุดสำคัญที่จะทำให้วิจัย และกลุ่มนับสนุนการวิจัย เช่น กองทุนวิจัยต่าง ๆ และรัฐบาลประเทศต่าง ๆ ได้หันมาให้ความสนใจที่จะสนับสนุนและพัฒนาต่อยอด และผลิตนวัตกรรมใหม่ ๆ ที่ใช้อิเล็กทรอนิกส์เข้าไปเกี่ยวข้องในการออกแบบ

## 5. สรุป

ในบทความฉบับนี้ ผู้เขียนได้ทำการปริทัศน์ วรรณกรรมเกี่ยวกับอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งได้กล่าวถึง ความหมาย ประวัติ การแยกประเภท การออกแบบ และปรากฏการณ์ พิเศษทางฟิสิกส์ของอิเล็กทรอนิกส์ นอกจากนี้บทความนี้ยังได้กล่าวถึงการประยุกต์ใช้งาน ซึ่งจะมีประโยชน์ในการพัฒนาอุปกรณ์ทางด้านไมโครเวฟและการสื่อสาร

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย มหาสารคามที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Engheta, N. and Ziolkowski, R.W. 2006. Metamaterials: physics and engineering explorations. John Wiley & Sons, Inc: USA.
- [2] นันทกานต์ วงศ์เกษม และ คณิศร์ มาตรฐาน. 2552. วัสดุเหนือธรรมชาติ. วารสารวิจัย มข. 14(2): 133-149
- [3] Angkawisitpan, N. 2009. Novel technique for 3D isotropic metamaterial fabrication. Ph.D. Dissertation, University of Massachusetts Lowell. Lowell, MA, USA.
- [4] Schuster, A. 1904. An introduction to the theory of optics. Arnold: London.
- [5] Veselago, V.G. 1968. Electrodynamics of substances with simultaneously negative values of  $\epsilon$  and  $\mu$ . Soviet Physics Uspekhi. 10(4): 509-514.
- [6] Pendry, J.B., Holden, A.J., Stewart, W.J. and Youngs, I. 1996. Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures. Physical Review Letters. 76: 4773-4776.
- [7] Pendry, J.B., Holden, A.J., Robbins, D.J. and Stewart, W.J. 1999. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 47(11): 2075-2084.
- [8] Smith, D.R., Padilla, W.J., Vier, D.C., Nemat-Nasser S.C. and Schultz, S. 2000. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity. Physical Review Letters. 84(18): 4184-4187.
- [9] Schurig, D., Mock, J.J., Justice, B.J., Cummer S.A., Pendry J.B., Starr, A.F. and Smith, D.R. 2006. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies. Science. 314(5801): 977-980.
- [10] Zhu, J., and Eleftheriades, G.V. 2009. Dual-band Metamaterial-inspired small monopole antenna for wifi applications. Electronics Letters. 45(22): 1104-1106.
- [11] Angkawisitpan, N., and Akyurtlu, A. 2008. Strain sensors based on metamaterials. 2008 International Conference on Material Research Society Fall Meeting. Boston, Massachusetts, USA.
- [12] The News and Editorial Staffs 2003. Breakthrough of the year: the runners-up. Science. 302(5653): 2039-2045
- [13] Ordal, M.A., Long L.L., Bell, R.J., Bell, S.E., Bell, R.R., Alexander, Jr., R.W. and Ward, C.A. 1983. Optical properties of the metals Al, Co, Cu, Au, Fe, Pb, Ni, Pd, Pt, Ag, Ti, and W in the infrared and far infrared. Applied Optics. 22(7): 1099-1120.
- [14] Shelby, R.A., Smith, D.R., and Schultz, S. 2001. Experimental verification of a negative index of

- refraction. *Science*. 292(5514): 77-79.
- [15] Simovski, C.R., and He, S. 2003. Frequency range and explicit expressions for negative permittivity and permeability for an isotropic medium formed by a lattice of perfectly conducting  $\Omega$  particles. *Physics Letters A*. 311(3): 254-263.
- [16] Casse, B.D.F., Moser, H.O., Wilhelmi, O., and Saw, B.T. 2005. Micro- and nano-fabrication of electromagnetic metamaterials for the terahertz range. *Proceedings of 3<sup>rd</sup> International Conference on Materials for Advanced Technologies*. July 3-8, 2005: 55-58.
- [17] Minovich, A., Neshev, D.N., Powell, D.A., Shadrivov, I.V., Lapine, M., McKerracher, I., Hattori, H.T., Tan, H.H., Jagadish, C., and Kivsharz, Y. 2010. Tilted response of fishnet metamaterials at near-infrared optical wavelengths. *Physical Review B*. 81(11): 115109-1-115109-6.
- [18] Kussow, A., Akyurtlu, A., Semichaevsky, A., and Angkawisitpan, N. 2007.  $MgB_2$ -based negative refraction index metamaterial at visible frequencies: theoretical analysis. *Physical Review B*. 76(19): 195123-1-195123-7.
- [19] Limberopoulos, N., Akyurtlu, A., Higginson, K., Kussow, A., and Merritt, C.D. 2009. Negative refractive index metamaterials in the visible spectrum based on  $MgB_2/SiC$  composites. *Applied Physics Letters*. 95(2): 023306-1-195123-3.