

กระบวนการแสดงผลคุณสมบัติของแสงในตัวกลางที่มี
ค่าดัชนีหักเหแสงเป็นลบ

SIMULATION OF LIGHT PROPAGATION IN NEGATIVE
INDEX MEDIUM



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการสงวนสิทธิ์ในบางประการโดยผู้จัดทำเอกสารและขอสงวนสิทธิ์ในเงื่อนไขการใช้งานเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาเอกสารหรือแจ้งผู้อื่นถึงเนื้อหาสาระของเอกสาร

ปีการศึกษา 2560

SIMULATION OF LIGHT PROPAGATION IN NEGATIVE
INDEX MEDIUM



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (APPLIED PHYSICS)
DEPARTMENT OF APPLIED PHYSICS, FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดลอกหรือเผยแพร่ข้อมูลของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ACADEMIC YEAR 2560

หัวข้อโครงการพิเศษ กระบวนการแสดงผลคุณสมบัติของแสงในตัวกลางที่มี
ค่าดัชนีหักเหแสงเป็นลบ
Simulation of Light propagation in Negative – Index
Medium

ชื่อนักศึกษา นางสาวฐิติญา สีสัน รหัสนักศึกษา 57050955
นายศิริชัย สาตรพันธุ์ รหัสนักศึกษา 57051036

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต ฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชา ฟิสิกส์
ปีการศึกษา 2560
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ประธาน บุรณศิริ

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์
ประยุกต์) ประจำปีการศึกษา 2560

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร.วิฑูรย์ ยินดีสุข ประธานกรรมการ	
อ.สุรชาติ กมลศิลป์ กรรมการ	
อ.ธรรมรัตน์ แต่งตั้ง กรรมการ	
ผศ.ดร.ประธาน บุรณศิริ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุญาตให้นำไปใช้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	กระบวนการแสดงผลคุณสมบัติของแสงในตัวกลางที่มี ค่าดัชนีหักเหแสงเป็นลบ
ชื่อนักศึกษา	นางสาวฐิติญา สีสัน รหัสนักศึกษา 57050955 นายศิริชัย สาตรพันธ์ รหัสนักศึกษา 57051036
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา	ฟิสิกส์
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2560
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ประธาน บุรณศิริ

บทคัดย่อ

งานวิจัยชิ้นนี้เป็นการสร้างแบบจำลองคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เคลื่อนเข้าไปในตัวกลางที่มีดัชนีหักเหติดลบหรืออภิวัดโดยใช้ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมในโดเมนเวลา (Finite Difference Time Domain : FDTD) แบบจำลองมี 1 มิติใช้โปรแกรม MATLAB ที่ทำการใส่ค่าความยาวคลื่น จำนวนเซลล์ ความถี่พลาสมา ความถี่เรโซแนนท์ โปรแกรมจะแสดงออกมาในรูปของกราฟ สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก พร้อมส่วนประสานผู้ใช้งาน (GUI) เพื่อความสะดวกต่อการศึกษานักศึกษาและภาษา C สร้างแบบจำลองอภิวัด โดยแบบจำลองจะแสดงให้เห็นคุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในตัวกลางที่มีดัชนีหักเหติดลบและเปลี่ยนค่าดัชนีหักเหเพื่อสังเกตปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในตัวกลางให้เข้าใจคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามากยิ่งขึ้น

คำสำคัญ : คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดัชนีหักเหติดลบ ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมในโดเมนเวลา อภิวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Simulation of Light Propagation in Negative – Index Medium		
Students	Miss Thitiya Seesan	Student ID	57050955
	Mr. Sirichai Sartpan	Student ID	57051036
Degree	Bachelor of Science (Applied Physics)		
Department	Applied Physics		
Faculty	Science		
University	King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)		
Academic Year	2560		
Advisor	Asst. Prof. Prathan Buranasisi		

Abstract

This research is a model of electromagnetic waves moving into a medium with negative refraction index or metamaterial using finite difference time domain (FDTD) model. MATLAB Enter the wavelength of the plasma cell number. Resonant frequency the program is shown in the graph. Electric field and magnetic field User Interface (GUI) for ease of study for students and C language. The model shows the properties of the electromagnetic waves moving through the medium with negative refractive index and changing the refractive index to observe the phenomenon occurring inside the medium to better understand the electromagnetic wave.

Keywords : The Electromagnetic Wave, Negative Refraction Index, Finite Difference Time Domain (FDTD), Metamaterial.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยการสนับสนุนจาก ผศ.ดร.ประชาณ บุรณศิริ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัยฉบับนี้ ได้ให้คำปรึกษาเสนอแนะแนวทางการแก้ปัญหาให้ลุล่วงไปได้ด้วยดีจนทำให้งานฉบับนี้ครบถ้วนและสมบูรณ์

ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบเป็นอย่างสูงประกอบได้ด้วย ดร.วิฑูรย์ ยินดีสุข ที่ให้เกียรติมาเป็นประธานกรรมการคุมสอบ อาจารย์ สุรชาติ กมลติก และอาจารย์ธรรมรัตน์ แต่งตั้ง ที่มาเป็นกรรมการคุมสอบ อีกทั้งยังให้ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับงานวิจัยฉบับนี้ ขอขอบคุณพี่ๆ ในห้องปฏิบัติการ 314 และ 311 ที่คอยให้คอยให้ความช่วยเหลือให้คำปรึกษา ตลอดจนอาหารและขนมที่นำมาแจกจ่าย สุดท้ายนี้ขอขอบคุณบิดา มารดา และครอบครัวที่คอยเป็นกำลังใจและสนับสนุนในด้านต่างๆ และอมรมเลี้ยงดูให้เติบโตเป็นผู้ใหญ่ที่ดีในสังคม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5 ระยะเวลาดำเนินการวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	4
2.1.1 สมการคลื่นของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's equation).....	5
2.2 อภิวัด (Metamaterials).....	6
2.2.1 โครงสร้างพื้นฐานของอภิวัด.....	6
2.2.2 การแบ่งประเภทของวัสดุ.....	7
2.2.3 การสะท้อนและการหักเหในตัวกลางแบบ Double positive (DPS).....	8
2.2.4 การสะท้อนและการหักเหในตัวกลาง Double-negative (DNG).....	9
2.2.5 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในอภิวัด.....	10
2.2.6 ปรากฏการณ์คอปเปิลอร์แบบย้อนกลับ.....	12
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	13
3.1 บทนำ.....	13
3.2 ยี้อัลกอริทึม (The Yee Algorithm).....	14
3.3 กระบวนการสร้างสมการใน 1 มิติ.....	14
3.4 การกระจายตัวอย่างต่อเนื่อง.....	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับของวิทยานิพนธ์ที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ได้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.6 การจำลองคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดย MATLAB.....	22
3.7 โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับกระบวนการจำลองโดย MATLAB	23
3.7.1 การสร้างแบบจำลองของลวเรนซ์ (Lorentz medel).....	23
3.7.2 การสร้างเซลล์ยี่	24
3.7.3 การเคลื่อนที่ของคลื่น 1 มิติในตัวกลางที่มีดัชนีหักเหติดลบ.....	24
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....	27
4.1 แบบจำลองของลวเรนซ์ (Lorentz Model).....	27
4.2 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เดินทางผ่านตัวกลางที่มีดัชนีหักเหติดลบ).....	30
4.3 โปรแกรมส่วนต่อประสานกราฟิกกับผู้ใช้งาน (GUI).....	34
4.4 ผลการคำนวณด้วยวิธี FDTD แบบ 2 มิติ	38
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	45
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	45
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	45
5.3 ประโยชน์ที่ได้รับ	46
5.4 การดำเนินการวิจัยในอนาคต.....	46
เอกสารอ้างอิง	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ตารางแสดงค่าที่ใช้ในการคำนวณ	30



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงลักษณะและทิศทางของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	4
2.2 การแบ่งประเภทของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	5
2.3 ตัวอย่าง Split Ring Resonator (SRR).....	6
2.4 ลักษณะโครงสร้างของอภิวัดแบบโฮเลย์	7
2.5 แสดงการแบ่งประเภทของวัสดุตามความแตกต่างของค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า และสภาพซึมซาบทางแม่เหล็ก	8
2.6 ปรากฏการณ์การสะท้อนและการหักเหที่พื้นผิวไดอิเล็กตริก.....	8
2.7 ก.) การส่งผ่านของคลื่นในตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหแสงเป็นบวก ข.) การส่งผ่านของคลื่นในตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหแสงเป็นลบ	9
2.8 แสดงการสะท้อนและการหักเหแสงในตัวกลางแบบ Double-negative medium (DNG)	10
2.9 แสดงให้เห็นถึงเวกเตอร์บอกตำแหน่งและเวกเตอร์คลื่นในกฎมือซ้ายและกฎมือขวา.....	10
3.1 การกำหนดโหมดของสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก ใน 1 มิติ.....	16
3.2 แสดงโหมดของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กหลังจากการคำนวณ.....	17
3.3 กระบวนการ FDTD ใน 1 มิติ ที่แสดงผลต่างเชิงพื้นที่ระหว่างสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก	19
3.4 แสดงแผนผังการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่คำนวณด้วยวิธี FDTD	21
3.5 แสดงหน้าต่างของโปรแกรม Matlab2016a.....	22
3.6 แสดงหน้าต่างการสร้าง m file.....	22
3.7 แสดงแผนผังการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่คำนวณด้วย MATLAB.....	23
3.8 แสดงการสร้างแบบจำลองของลวดเร็นซ์.....	24
4.1 แสดงแบบจำลองของลวดเร็นซ์.....	27
4.2 แสดงแบบจำลองของลวดเร็นซ์ที่มีค่าดัชนีหักเห = -1.....	28
4.3 แสดงแบบจำลองของลวดเร็นซ์ที่มีค่าดัชนีหักเห = -2.....	28
4.4 แสดงแบบจำลองของลวดเร็นซ์ที่มีค่าดัชนีหักเห = -3.....	29
4.5 แสดงแบบจำลองของลวดเร็นซ์ที่มีค่าดัชนีหักเห = -4.....	29
4.6 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่มีดัชนีหักเหเท่ากับ -1	31
4.7 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่มีดัชนีหักเหเท่ากับ -2	31
4.8 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่มีดัชนีหักเหเท่ากับ -3	32
4.9 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่มีดัชนีหักเหเท่ากับ -4.....	32
4.10 สนามแม่เหล็กที่ผ่านเข้าตัวกลางที่มีดัชนีหักเหเท่ากับ -1.....	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง การนำเนื้อหาไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตให้ถือว่าผิดกฎหมาย

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 สนามแม่เหล็กที่ผ่านเข้าตัวกลางที่มีดัชนีหักเหเท่ากับ -2.....	33
4.12 สนามแม่เหล็กที่ผ่านเข้าตัวกลางที่มีดัชนีหักเหเท่ากับ -3.....	34
4.13 สนามแม่เหล็กที่ผ่านเข้าตัวกลางที่มีดัชนีหักเหเท่ากับ -41.....	34
4.14 แสดงหน้าต่าง GUI ของโปรแกรมแบบจำลองคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	35
4.15 แสดงผลค่าพารามิเตอร์ความยาวคลื่นเมื่อใส่ค่าความถี่เข้าไป.....	35
4.16 แสดงผลคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผ่านตัวกลางที่มีดัชนีหักเหติดลบเท่ากับ -1 ผ่าน GUI.....	36
4.17 แสดงผลคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผ่านตัวกลางที่มีดัชนีหักเหติดลบเท่ากับ -2 ผ่าน GUI.....	37
4.18 แสดงผลคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผ่านตัวกลางที่มีดัชนีหักเหติดลบเท่ากับ -3 ผ่าน GUI.....	37
4.19 แสดงผลคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผ่านตัวกลางที่มีดัชนีหักเหติดลบเท่ากับ -4 ผ่าน GUI.....	38
4.20 รูปแบบจำลองของตัวกลางดัชนีหักเหลบ ขนาด 601 x 801 pixel.....	39
4.21 ผลการคำนวณด้วยวิธี FDTD ที่ time step = 0.....	40
4.22 ผลการคำนวณด้วยวิธี FDTD ที่ time step = 2000.....	41
4.23 ผลการคำนวณด้วยวิธี FDTD ที่ time step = 4000.....	42
4.24 ผลการคำนวณด้วยวิธี FDTD ที่ time step = 6000.....	43
4.25 ผลการคำนวณด้วยวิธี FDTD ที่ time step = 8000.....	44



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องด้วยในปัจจุบันวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมีความก้าวหน้าไปอย่างมาก อุตสาหกรรมต่าง ๆ ก็พัฒนาองค์ความรู้ใหม่ ๆ มาประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมของตนเอง ความต้องการของมนุษย์ในปัจจุบันก็ความต้องการใช้ทรัพยากรที่มากยิ่งขึ้นตามไปด้วย ในแวดวงวิทยาศาสตร์ได้มีการคิดค้นทรัพยากรมากมายขึ้นมาทดแทนทรัพยากรธรรมชาติที่สูญสิ้นไป หนึ่งในนั้นได้มีการพัฒนาวัสดุขึ้นมาซึ่งวัสดุสามารถแบ่งได้หลายประเภทไม่ว่าจะเป็น เซรามิกส์ วัสดุไดอิเล็กตริก วัสดุทางแม่เหล็ก โพลีเมอร์ เป็นต้น โดยมีวัสดุไดอิเล็กตริกชนิดหนึ่งที่ถูกสร้างขึ้น เรียกว่า อภิวัดดู หรือ Metamaterials (MTM) ในธรรมชาติไม่สามารถหาวัสดุชนิดนี้ได้ เนื่องจากคุณสมบัติของวัสดุนั้นไม่สามารถเกิดขึ้นเองได้ตามกระบวนการทางธรรมชาติ อภิวัดดูมีคุณสมบัติพิเศษกว่าชนิดอื่น ๆ ตรงที่มีดัชนีหักเหเป็นค่าลบ (Negative refractive index)

อภิวัดดูเป็นวัสดุทางวิศวกรรมชนิดหนึ่งที่ไม่สามารถหาได้ในธรรมชาติ ประกอบขึ้นจากส่วนประกอบหลาย ๆ อย่างเข้าด้วยกันไม่ว่าจะเป็นโลหะหรือพลาสติก โดยส่วนใหญ่วัสดุ MTM มีการจัดเรียงตัวของวัสดุแบบซ้ำ ๆ กันเป็นคาบมีรูปแบบที่เหมือนกัน มีรูปร่าง ขนาดและการจัดเรียงตัวที่แน่นอนแบบเรขาคณิตเพื่อให้เกิดอันตรกิริยากับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave : EM wave) ที่ผ่านเข้ามาในวัสดุ และเกิดการดูดกลืน (Absorption) ส่งผ่านขึ้นในตัวกลาง (Transmission) ในปี 1967 Victor Veselago ได้อธิบายทฤษฎีของวัสดุที่มีค่าดัชนีหักเหเป็นลบ (Negative-index materials) และยังสามารถพิสูจน์ด้วยอีกว่าแสงสามารถเดินทางผ่านตัวกลางชนิดนี้ได้ โดยการแสดงให้เห็นถึงความเร็วเฟส (Phase velocity) ซึ่งมีทิศทางตรงกันข้ามกับเวกเตอร์บอกทิศทาง (Pointing vector) โดยมีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า และค่าสภาพซึมซาบทางแม่เหล็กมีค่าเป็นลบ ส่งผลให้ค่าดัชนีหักเหแสงของวัสดุเป็นลบ เรียกวัสดุชนิดนี้ว่า Left-handed medium ต่อจากนั้นในปี 1996 John Pendry เป็นคนแรกที่สามารถสร้างวัสดุ MTM ขึ้นมาโดยแนวคิดของเขาได้นำลวดโลหะจัดเรียงตัวตามแนวทิศทางของคลื่น

ในปัจจุบันอภิวัดดูได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการศึกษา การวิจัย หรือสร้างเครื่องมือต่าง ๆ ได้หลายรูปแบบ ยกตัวอย่างเช่น สร้างตัวกรองทางแสง (Optical filter) วัสดุในการสร้างเครื่องบิน สร้างระบบเซ็นเซอร์ รวมถึงการสร้างวัสดุขนาดเล็ก ๆ เพื่อใช้งานในระบบทางแสง เช่น สร้างเลนส์สมบูรณ์แบบ หรือเรียกว่า Perfect lens เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาคุณสมบัติของอภิวัดที่มีค่าดัชนีหักเหแสงติดลบ และลักษณะการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในวัสดุชนิดนี้
- 2) สร้างแบบจำลองคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยการใช้วิธีผลต่างในโดเมนเวลา (Fourier Differential Time Domain: FDTD)
- 3) ประยุกต์ใช้แบบจำลองเพื่อสร้างเป็นสื่อการเรียนการสอนโดยแสดงผลในรูปแบบ (Graphic User Interface: GUI)

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ศึกษาการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในอภิวัดที่มีดัชนีหักเหติดลบ จากนั้นสังเกตลักษณะเฟส แอมพลิจูด และทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นในตัวกลาง และลักษณะของคลื่นที่ผ่านออกมาจากวัสดุ
- 2) เปรียบเทียบลักษณะการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหแสงติดลบที่แตกต่างกัน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) มีความเข้าใจคุณสมบัติของอภิวัด และลักษณะการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในวัสดุชนิดนี้ได้มากยิ่งขึ้น
- 2) สามารถนำแบบจำลองที่สร้างขึ้นไปประยุกต์ใช้ในการสร้างสื่อการเรียนการสอนให้ผู้สนใจเข้าใจได้มากยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ระยะเวลาดำเนินงานวิจัย

รายละเอียด	ส.ค. 2017	ก.ย. 2017	ต.ค. 2017	พ.ย. 2017	ธ.ค. 2017	ม.ค. 2018	ก.พ. 2018	มี.ค. 2018	เม.ย. 2018
1. ค้นคว้าข้อมูล	←→								
2. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง			←→						
3. วางแผนการดำเนินงานวิจัย				←→					
4. ดำเนินงานวิจัยและวิเคราะห์ผลการวิจัย						←→			

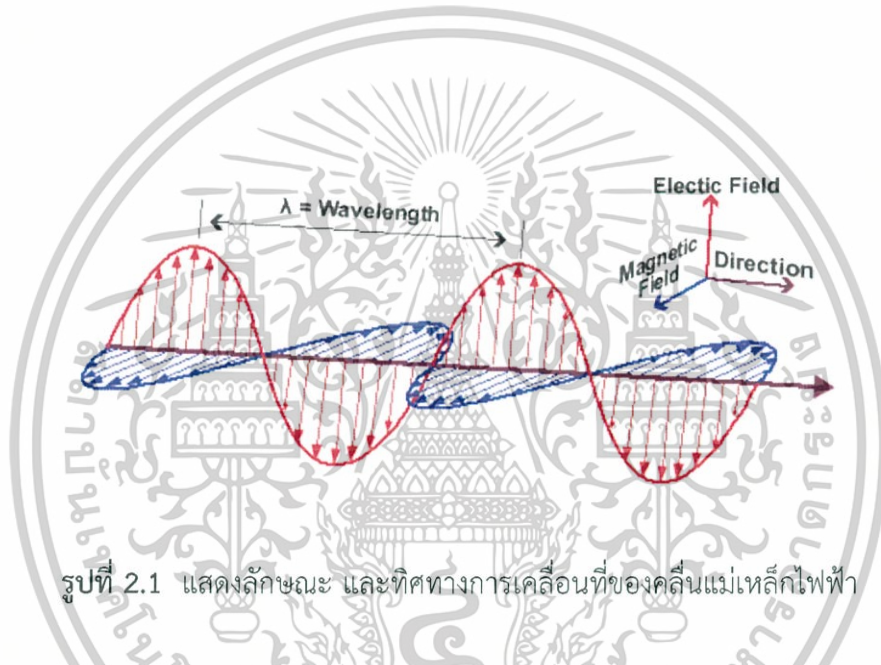


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave)

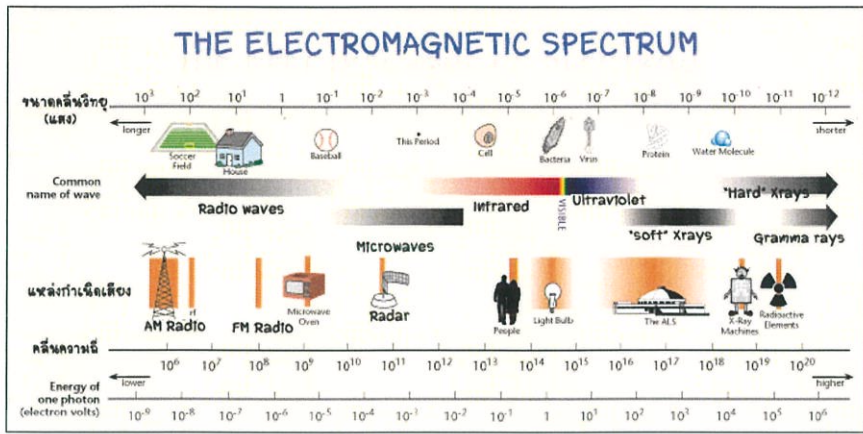
คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นคลื่นที่เคลื่อนที่ได้โดยไม่ต้องอาศัยตัวกลาง ประกอบด้วยสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าที่ตั้งฉากกัน และเคลื่อนที่ไปในอากาศหรือตัวกลางต่าง ๆ อาทิเช่น คลื่นแสง ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะ และทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเป็นปริมาณเวกเตอร์ ซึ่งทิศทางตั้งฉากกันเสมอ และตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น โดยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นสนามที่มีลักษณะสลับ กล่าวคือจะมีค่าคงที่เสมอไม่ขึ้นอยู่กัเวลา ขนาดของสนามจะแปรผันไปตามระยะทางจากแหล่งกำเนิดสนามไปยังตำแหน่งที่ต้องการหาสนามนั้น ในยุคก่อนนั้นเชื่อกันว่าปรากฏการณ์ไฟฟ้าและแม่เหล็กเป็นปรากฏการณ์แยกจากกันอย่างเด็ดขาด จนถึง ค.ศ. 1865 เจมส์ เคลิร์ก แมกซ์เวลล์ (James Clerk Maxwell) ได้ทำการเสนอสมการเกี่ยวกับทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้า 4 สมการ และยังทำนายด้วยว่าสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าสามารถเดินทางได้ในสภาวะสุญญากาศ โดยประเภทของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถแบ่งออกได้หลายประเภทแสดงดังรูปที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 การแบ่งประเภทของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตามความยาวคลื่นและความถี่

จากรูปที่ 2.2 การจำแนกคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถแบ่งตามความยาวคลื่นและความถี่ออกเป็นหลายชนิด เช่น คลื่นวิทยุ (Radio wave) คลื่นไมโครเวฟ (Microwaves) คลื่นอินฟราเรด (Infrared wave) คลื่นที่สายตามองเห็น (Visible light) คลื่นอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet) เป็นต้น

2.1.1 สมการคลื่นของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's equation)

แสงมีคุณสมบัติเป็นทั้งคลื่นและอนุภาค ซึ่งถ้าหากแสงมีคุณสมบัติเป็นคลื่น สมการแมกซ์เวลล์จะเป็นตัวที่อธิบายพฤติกรรมต่าง ๆ ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยแสงมีคุณสมบัติเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สามารถอธิบายได้โดยใช้สมการแม่เหล็กไฟฟ้าแสดงได้ดังสมการ

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \tag{2.1}$$

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \tag{2.2}$$

และ

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \tag{2.3}$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \tag{2.4}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการแม่เหล็กไฟฟ้าทั้ง 4 สมการ ซึ่งเป็นสมการพื้นฐานในการอธิบายทฤษฎีสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาในรูปของเวลา โดยการเขียนสมการเพื่อแสดงการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทำได้โดยใช้สมการแมกซ์เวลล์เริ่มต้นจากการนำสมการคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในรูปของเคิร์ลดังแสดงในสมการที่ 2.5

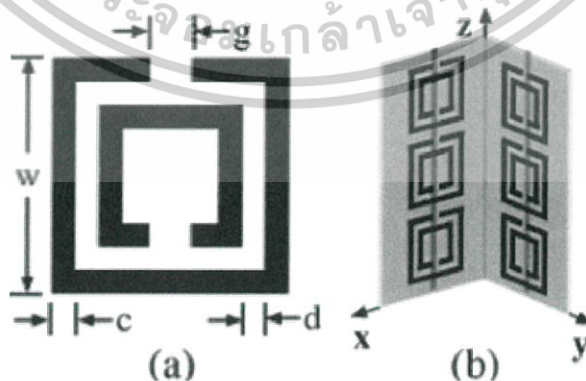
$$\nabla \times \vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{E}) = -\frac{\partial(\vec{\nabla} \times \vec{B})}{\partial t} \quad (2.5)$$

2.2 อภิวัตต (Metamaterials)

อภิวัตต หรือ Metamaterials เป็นวัสดุชนิดพิเศษที่มีคุณสมบัติค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า (Permittivity of the material : ϵ) และค่าสภาพซึมซาบทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Permeability of the material : μ) มีค่าเป็นลบ จึงส่งผลให้ค่าดัชนีหักเหแสงภายในวัสดุมีค่าเป็นลบตามไปด้วย หรือเรียกว่าวัสดุ Double negative (DNG) หรือ วัสดุที่มีค่าหักดัชนีเหแสงติดลบ (Negative index material: NIMs)

2.2.1 โครงสร้างพื้นฐานของอภิวัตต

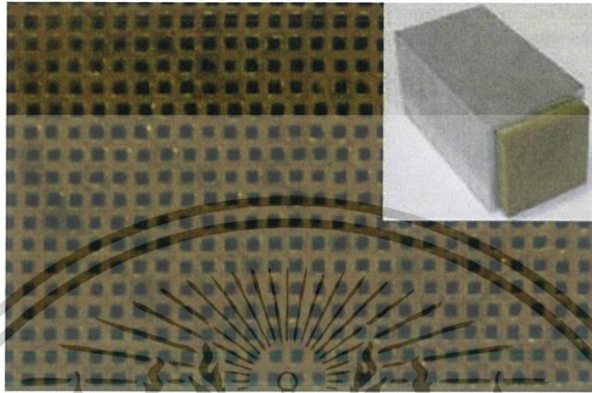
อภิวัตตมีอยู่ด้วยกันหลายประเภท เช่น วัสดุเทราเฮิร์ตซ์ (Terahertz material) วัสดุโฟโตนิกส์ (Photonic material) วัสดุที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear material) เป็นต้น โดยปกติลักษณะการจัดเรียงตัวโครงสร้างภายในของวัสดุจะมีลักษณะการเรียงตัวแบบเป็นคาบ โดยในตอนแรกสามารถสร้างอภิวัตตที่เกิดดัชนีหักเหแสงติดลบได้เพื่อใช้กับคลื่นไมโครเวฟเป็นอันดับแรก โดยลักษณะของโครงสร้างเรียกว่า Split Ring Resonator (SRR) ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ตัวอย่าง Split Ring Resonator (SRR) รูปทรงสี่เหลี่ยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งวัสดุ SRR ถูกสร้างขึ้นจากทองแดง และออกแบบเป็นรูปสี่เหลี่ยมจตุรัส วงกลม ขึ้นอยู่กับความต้องการในการใช้งาน ต่อมาไม่นานได้เริ่มมีการพัฒนาวัสดุขึ้นมาใหม่เป็น Perfect-lens คือเลนส์ที่สามารถแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ในเลนส์แบบปกติได้ นอกจากลักษณะของวัสดุที่ได้กล่าวไปแล้วนั้น นักวิจัยยังสามารถพัฒนาลักษณะโครงสร้างของวัสดุให้เป็นรูหรือช่อง (Holey) ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ลักษณะโครงสร้างของอภิวัดแบบโฮลีย์

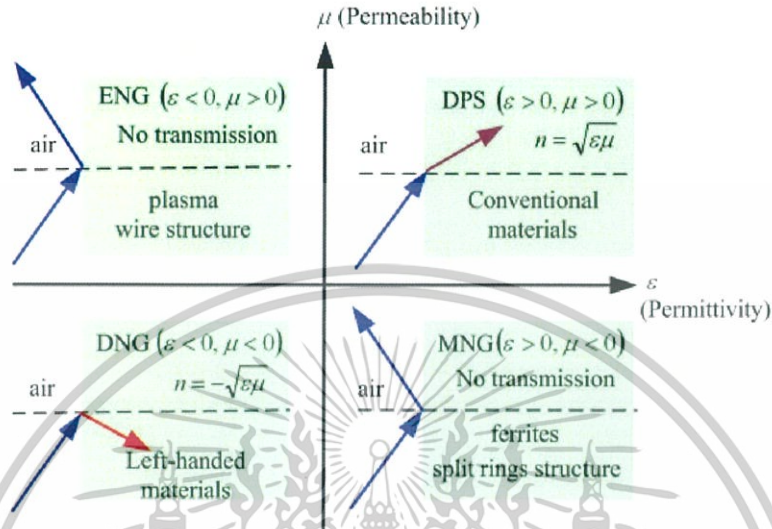
สำหรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านในสภาวะสุญญากาศนั้นจะมีค่าการดูดกลืนทางแม่เหล็กไฟฟ้า และค่าการดูดกลืนของสนามไฟฟ้าแบบคงที่ สำหรับการสร้างอภิวัด เราสามารถออกแบบค่าคงที่ทางไฟฟ้า และทางแม่เหล็กได้ทั้งสองค่า ซึ่งตัวแปรทั้งสองตัวนั้นยังขึ้นอยู่กับค่าความถี่ของคลื่น โดย Drude โมเดล เป็นแบบจำลองที่ถูกใช้กันอย่างแพร่หลายเพื่ออธิบายปรากฏการณ์การเคลื่อนที่ของคลื่นในอภิวัด สำหรับการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในวัสดุแบบ DNGs (Double Negative Materials) ค่าการดูดกลืนทางไฟฟ้าและแม่เหล็กขึ้นอยู่กับช่วงความถี่ของคลื่นเพียงอย่างเดียว

2.2.2 การแบ่งประเภทของวัสดุ

จากรูปที่ 2.3 แสดงการแบ่งประเภทของวัสดุ โดยพิจารณาจากค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า (Permittivity of the material: ϵ) และสภาพซึมซาบทางแม่เหล็ก (Permeability of the material: μ) โดยสามารถแบ่งประเภทของวัสดุได้ดังนี้ จากภาพควอทแดรนซ์ที่ 1 แสดงให้เห็นว่าค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าและค่าสภาพซึมซาบได้ทางแม่เหล็กของวัสดุ ซึ่งพารามิเตอร์ทั้งสองมีค่ามากกว่า 0 ($\epsilon > 0, \mu > 0$) เรียกว่า Double Positive Medium (DPS) ควอทแดรนซ์ที่ 2 เป็นตัวกลางที่มีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าน้อยกว่า 0 และมีค่าสภาพซึมซาบได้ทางแม่เหล็กมีค่ามากกว่า 0

($\epsilon < 0, \mu < 0$) เรียกว่าตัวกลางแบบนี้ว่า Epsilon-Negative Mediums (ENG) ควอทแดรนซ์ที่ 3 ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าและสภาพซึมซาบทางแม่เหล็กมีค่าน้อยกว่า 0 ทั้งคู่ ($\epsilon < 0, \mu < 0$) เรียกว่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Double Negative Mediums (DNG) และควอทแดนซ์สุดท้าย เป็นตัวกลางที่มีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้ามากกว่า 0 และมีค่าสภาพซึมซาบทางแม่เหล็กน้อยกว่า 0 เรียกว่า Mu-Negative Mediums (MNG)



รูปที่ 2.5 แสดงการแบ่งประเภทของวัสดุตามความแตกต่างของค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า และสภาพซึมซาบทางแม่เหล็ก

2.2.3 การสะท้อนและการหักเหแสงในตัวกลางแบบ Double Positive Medium (DPS)

เมื่อคลื่นแสงเคลื่อนที่จากตัวกลางหนึ่งสู่อีกตัวกลางหนึ่งที่มีค่าดัชนีหักเหแสงแตกต่างกัน แสงจะเกิดปรากฏการณ์ 2 อย่างคือ การสะท้อนและการหักเห ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ปรากฏการณ์การสะท้อนและการหักเหแสงที่พื้นผิวของวัสดุไดอิเล็กตริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวกลางแรกมีพารามิเตอร์ ϵ_1 และ μ_1 เมื่อระนาบคลื่นแสงเคลื่อนที่เข้าไปในตัวกลางจะเกิดการตกกระทบที่พื้นผิวตัวกลาง จากนั้นมีแสงส่วนหนึ่งสะท้อนออกไปโดยมีมุมการสะท้อนเท่ากับมุมตกกระทบ และที่ระนาบคลื่นตกกระทบระนาบคลื่นก็เดินทางเข้าสู่ตัวกลางที่สองแล้วหักเหเป็นมุมค่าหนึ่ง ซึ่งมีพารามิเตอร์เป็น ϵ_2 และ μ_2 โดยสามารถหาความสัมพันธ์จากกฎของสเนลล์

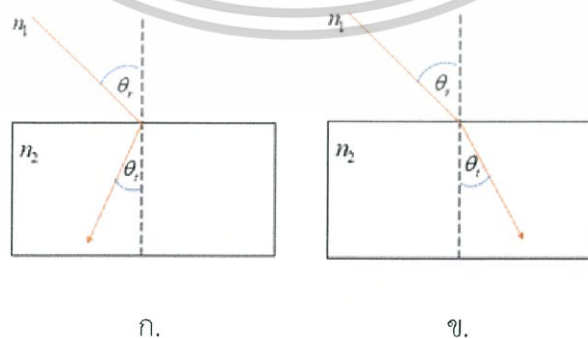
$$n_1 \sin \theta_r = n_2 \sin \theta_t \quad (2.6)$$

โดยค่าดัชนีหักเหแสงในตัวกลางใด ๆ สามารถหาได้จาก

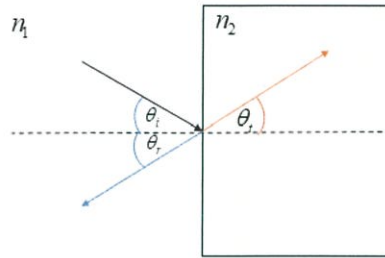
$$n_i = \sqrt{\frac{\epsilon_i}{\epsilon_0}} \sqrt{\frac{\mu_i}{\mu_0}} = \sqrt{\epsilon_r} \sqrt{\mu_r} \quad (2.7)$$

2.2.4 การสะท้อนและการหักเหในตัวกลาง Double-Negative Medium (DNG)

อภิวัดสามารถออกแบบให้มีค่า ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าและสภาพซึมซาบทางแม่เหล็กเป็นค่าลบได้ โดยในปี 1967 นักวิทยาศาสตร์ชื่อว่า Veselago แสดงให้เห็นว่าถ้าค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าและค่าสภาพซึมซาบทางแม่เหล็กเป็นลบจะส่งผลกับค่าดัชนีหักเหแสงเป็นลบไปด้วย เรียกตัวกลางชนิดนี้ว่า Double-Negative Medium (DNG) รูปที่ 2.7 แสดงให้เห็นการเปรียบเทียบการส่งผ่านของคลื่นในตัวกลางระหว่างตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหแสงเป็นบวก กับตัวกลางที่มีดัชนีหักเหแสงเป็นลบ จากกฎของสเนลล์ ดังสมการที่ 2.6 เมื่อ n_2 มีค่าเป็นลบ ดังนั้นระนาบคลื่นที่ผ่านเข้ามาในตัวกลางจะสะท้อนกลับแนวเดิม แต่ระนาบคลื่นที่ส่งผ่านตัวกลางแสดงได้ดังรูปที่ 2.8 ซึ่งระนาบคลื่นที่ตกกระทบตัวกลางที่ 2 จะมีแนวการสะท้อนในแนวเดิมแต่การหักเหของคลื่นในตัวกลางนั้นจะมีแนวหักเหที่มุมตรงกันข้ามกับตัวกลางที่มีดัชนีหักเหเป็นบวก



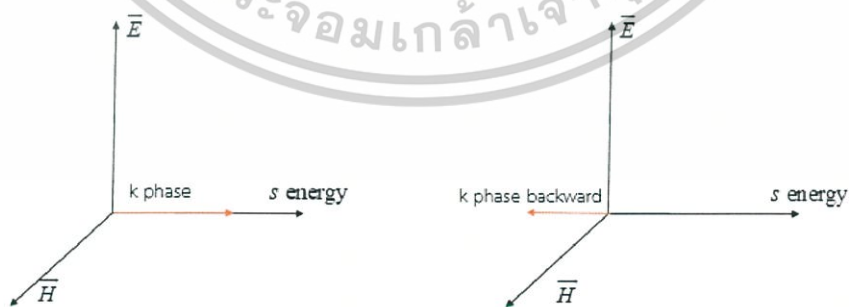
เอกสารรูปที่ 2.7 ภาพแสดงการส่งผ่านของแสงในตัวกลาง (ก.) การส่งผ่านของคลื่นในตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหเป็นบวก (ข.) การส่งผ่านของคลื่นในตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหเป็นลบไปใช้



รูปที่ 2.8 แสดงการสะท้อนและการหักเหแสงในตัวกลางแบบ Double-Negative Medium (DNG)

2.2.5 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในอวกาศ

อวกาศเป็นวัสดุทางวิศวกรรมซึ่งมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางแม่เหล็กที่ไม่สามารถเกิดขึ้นเองได้ในธรรมชาติ วัสดุในธรรมชาติส่วนใหญ่เป็นไปตามกฎมือขวา Right-handed rule เพราะค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าและค่าสภาพซึมซาบได้ทางแม่เหล็กทั้งสองค่ามีเครื่องหมายเป็นบวก ดังนั้นสนามไฟฟ้า สนามแม่เหล็ก และเวกเตอร์คลื่นในวัสดุดังกล่าวจะอยู่ในรูปแบบของกฎมือขวา ดังแสดงในรูปที่ 2.9 เมื่อสนามไฟฟ้ามีทิศทางการสั่นในแนวแกน x และสนามแม่เหล็กมีทิศทางในแนวแกน y และทิศทางของคลื่นมีทิศในแนวแกน z ดังนั้นเวกเตอร์สนามไฟฟ้า สนามแม่เหล็กและเวกเตอร์คลื่นจะแสดงในรูป Right-Handed Triplet ซึ่งใช้วัสดุทั่วไป ที่พบในธรรมชาติ ส่วนวัสดุแบบ Left-Handed Medium (LHM) ซึ่งใช้กฎมือซ้ายในการอธิบาย ดังนั้นเวกเตอร์คลื่นจะมีทิศทางตรงกันข้ามกับวัสดุแบบ RHM ส่งผลให้สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าแสดงพฤติกรรมเป็นแบบ Left-Handed Triplet นั่นหมายความว่าถ้าสนามไฟฟ้ามีทิศทางการสั่นตามแนวแกน x สนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีทิศตามแนวแกน y และทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นจะมีทิศทางในแกน $-z$ ในแบบ LHM



รูปที่ 2.9 ภาพแสดงเวกเตอร์บอกตำแหน่งและเวกเตอร์คลื่นโดยใช้กฎมือซ้ายและกฎมือขวา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นการตรวจสอบทิศทางการเคลื่อนที่ของพลังงานในวัสดุแบบ LHM สามารถอธิบายคุณสมบัติได้โดยเวกเตอร์บอกตำแหน่ง \vec{S}

$$\vec{s} = \frac{c}{4\pi} \vec{E} \times \vec{H} \quad (2.8)$$

เวกเตอร์บอกตำแหน่งความหนาแน่นของพลังงานสามารถเขียนได้เป็น

$$\begin{aligned} \vec{E} \times \vec{H} &= \frac{1}{\omega^2 \mu \epsilon} (\vec{k} \times \vec{E}) \times (\vec{k} \times \vec{H}) \\ &= \frac{-1}{\omega \sqrt{\mu \epsilon}} (\vec{k} \times \vec{E}) \times \vec{E} = \frac{-\vec{k}}{\omega \sqrt{\mu \epsilon}} |\vec{E}|^2 \\ &= \frac{-1}{\omega \sqrt{\mu \epsilon}} (\vec{k} \times \vec{H}) \times \vec{H} = \frac{-\vec{k}}{\omega \sqrt{\mu \epsilon}} |\vec{H}|^2 \end{aligned} \quad (2.9)$$

ในวัสดุแบบ RHM ($\epsilon > 0, \mu > 0$) เวกเตอร์บอกตำแหน่ง \vec{S} จะมีทิศทางเดียวกับเวกเตอร์ \vec{k} ในทางตรงกันข้ามวัสดุแบบ LHM ($\epsilon < 0, \mu < 0$) โดยทิศทางของเวกเตอร์ \vec{k} จะมีทิศทางใน $-z$ โดยสามารถการพิสูจน์สมการบอกตำแหน่งของคลื่น และสมการของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า ดังสมการ 2.8 และ 2.9 โดยเมื่อเวกเตอร์ \vec{S} มีทิศทางตรงกันข้ามกับเวกเตอร์ \vec{k} จะเห็นได้ชัดว่าทิศทางการไหลของพลังงานและทิศทางของความเร็วเฟสจะมีทิศทางตรงกันข้ามกัน ด้วยเหตุนี้จึงเรียกดังกล่าวที่มีดัชนีหักเหติดลบ อีกอย่างว่า Backward-Wave Medium

ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าและค่าสภาพซึมซาบได้ทางแม่เหล็ก เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในตัวกลางไดอิเล็กทริก คลื่นจะมีอันตรกิริยากับตัวกลางไดอิเล็กทริกในระดับอะตอมหรือโมเลกุล อันตรกิริยานี้สามารถอธิบายได้ด้วยค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าและสภาพซึมซาบได้ทางแม่เหล็กในตัวกลางไดอิเล็กทริกที่แตกต่างกันจะมีอันตรกิริยาระหว่างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แตกต่างกันออกไป ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า นั้นมีความหมายในทางฟิสิกส์ว่า ปริมาณที่อธิบายผลเนื่องจากสนามไฟฟ้าที่ผ่านเข้าไปในตัวกลางและเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของตัวกลางวัสดุที่ตอบสนองต่อการโพลาไรซ์ของแสงและบ่งบอกค่าลดทอนของสนามไฟฟ้าภายในวัสดุนั้น และค่าสภาพซึมซาบทางแม่เหล็กของวัสดุที่ตอบสนองแบบเชิงเส้นเมื่อทำการใส่สนามแม่เหล็กเข้าไปในวัสดุ

จากการอธิบายข้อความข้างบนดูเหมือนว่าเราสามารถทำการเปลี่ยนโครงสร้าง หรือเปลี่ยนแลตทิซในระดับอะตอมหรือโมเลกุลได้เพื่อเปลี่ยนค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า และค่าสภาพซึมซาบได้ทางแม่เหล็กของตัวกลางแบบไดอิเล็กทริก นี่เป็นเรื่องยากที่จะสังเคราะห์หรือสร้างวัสดุที่มีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า และค่าสภาพซึมซาบได้ทางแม่เหล็กให้เป็นลบพร้อมกัน และไม่มีวัสดุใด ๆ ในธรรมชาติที่มีคุณสมบัติของพาราเมเตอร์ทั้งสองที่มีค่าเป็นลบ ซึ่งเริ่มแรก Winston E. Knock ได้ริเริ่มทำการ

ออกแบบเลนส์ที่ทำจากโลหะ โดยออกแบบเป็นแผ่นโลหะที่ประกอบไปด้วยเลนส์ ในสถานะสุญญากาศพบว่าค่าดัชนีหักเหแสงมีค่าน้อยกว่าค่าดัชนีหักเหแสงของวัสดุที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านเข้าไป

2.2.6 ปรากฏการณ์ดอปเพลอร์แบบย้อนกลับ

ปรากฏการณ์ดอปเพลอร์ (Doppler Effect) คือปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ที่ความถี่และความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดคลื่น หรือผู้ส่ง (Transmitter) เคลื่อนที่มาถึงผู้สังเกตหรือผู้รับ (Receiver) ได้ถูกเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากความเร็วสัมพัทธ์ (Relative velocity) ระหว่างผู้ส่งเทียบกับผู้รับเป็นไปตามความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.10

$$\omega = \omega_0 \left(1 - n \frac{v}{c_0}\right) \quad (2.10)$$

เมื่อ ω_0 คือ ความถี่ของสัญญาณจากผู้ส่ง
 v คือ ความเร็วสัมพัทธ์ของผู้ส่งเทียบกับผู้รับ
 c คือ ความเร็วแสงในสุญญากาศ มีค่าประมาณ 3×10^8 m/s
 n คือ ดัชนีหักเหของแสงในตัวกลาง
 ω คือ ความถี่ของสัญญาณที่ปรากฏต่อผู้รับ

โดยปกติเมื่อความเร็วสัมพัทธ์ของผู้ส่งเทียบกับผู้รับเป็นบวกและค่าดัชนีหักเหของแสงของตัวกลางเป็นบวก จะทำให้ความถี่ของสัญญาณที่ปรากฏต่อผู้รับมีค่าต่ำกว่าความถี่ของสัญญาณจากผู้ส่งตามสมการที่ 2.10 อย่างไรก็ตามเมื่อความเร็วสัมพัทธ์ของผู้ส่งเทียบกับผู้รับยังคงเป็นบวก แต่ค่าดัชนีหักเหของแสงในตัวกลางเป็นลบ จะทำให้ความถี่ของสัญญาณที่ปรากฏต่อผู้รับมีค่าสูงกว่าความถี่ของสัญญาณจากผู้ส่งปรากฏการณ์แบบนี้เรียกว่า ปรากฏการณ์ดอปเพลอร์แบบทวนกลับ (Reversal of Doppler Effect)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

การศึกษาระบบการแสดงคุณสมบัติของแสงในตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหลบ ด้วยระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมในโดเมนเวลา (FDTD) ในการศึกษาคุณสมบัติของแสง โดยจะศึกษาปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นหลังจากที่แสงเดินทางผ่านตัวกลางที่มีดัชนีหักเหเป็นบวก (Positive Refractive Index) และเดินทางผ่านตัวกลางที่มีดัชนีหักเหเป็นลบ (Negative Refractive Index) โดยมีขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัยดังต่อไปนี้

3.1 บทนำ

องค์ประกอบพื้นฐานของโปรแกรมและการใช้คำสั่งต่างๆของโปรแกรมจะอยู่ภายใต้ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมในโดเมนเวลา (FDTD) โดยที่อาเรียทั้งหมดจะถูกบันทึกไว้ในหน่วยความจำที่ต่อเนื่องกัน รวมทั้งคอมพิวเตอร์ที่จำเป็นต้องเข้าถึงข้อมูลอาเรียได้ แต่ไม่จำเป็นต้องทราบตำแหน่งของหน่วยความจำที่อาเรียถูกบันทึกไว้

เราสามารถระบุขนาดของอาเรียเมื่อรันโปรแกรมและเราสามารถกำหนดให้คอมพิวเตอร์กำหนดตำแหน่งของหน่วยความจำ คอมพิวเตอร์จะเป็นตัวแสดงผลการทำงานของคำสั่ง สิ่งที่สำคัญในการสร้างคำสั่งให้ทำงานได้คือเราต้องรู้โครงสร้างของโปรแกรม ซึ่งโปรแกรมของเรานั้นศึกษาปรากฏการณ์ของแสงที่เดินทางผ่านตัวกลางที่มีดัชนีหักเหลบ ดังนั้น สิ่งที่เป็นตัวแปรสำคัญก็คือ “แสง” และ “ตัวกลางดัชนีหักเหลบ” เมื่อนำมาประมวลผลให้อยู่ภายใต้ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมในโดเมนเวลา (FDTD) ซึ่งวิธี FDTD จะใช้ความแตกต่างที่จำกัด เช่นเดียวกับกรประมาณค่าทั้งแบบเชิงพื้นที่และแบบจำลองที่ปรากฏในสมการแมกซ์เวลล์ (โดยเฉพาะกฎของ Ampere และ Faraday) ในการแก้ปัญหาใดปัญหาหนึ่ง ปัญหานั้นจะต้องประกอบด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมา การหาค่าผลเฉลยแม่นยำตรง (Exact Solution) จะประกอบด้วยค่าต่างๆ เป็นจำนวนอนันต์ ซึ่งเราไม่สามารถหาค่าผลเฉลยได้เลยจึงต้องเปลี่ยนค่าทั้งหมดที่เป็นอนันต์ให้เป็นจำนวนที่นับได้ (finite) ดังขั้นตอนต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 ทำการแบ่งขอบเขตรูปร่างของปัญหาที่ต้องการหาผลลัพธ์ ออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ

ขั้นตอนที่ 2 เลือกฟังก์ชันประมาณภายในเอลิเมนต์ (Element Interpolation Function)

ขั้นตอนที่ 3 สร้างสมการของเอลิเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ขั้นตอนที่ 4 นำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่ได้มาประกอบรวมกันเป็นสมการระบบใหญ่
ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งไม่มีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 5 ทำการประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) แล้วจึงแก้สมการเพื่อหาค่าตัวที่ไม่ทราบค่า

ขั้นตอนที่ 6 เมื่อคำนวณค่าต่างๆ ที่จุดต่อ (Node) ออกมาแล้วก็สามารถหาค่าอื่นๆ ที่ต้องการทราบต่อไป

3.2 ยีอัลกอริทึม (The Yee Algorithm)

อัลกอริทึม FDTD ถูกค้นพบครั้งแรกโดย เคน ยี (Kane Yee) .ในปี 1966 โดยสามารถสรุปได้ดังนี้

3.2.1 แทนที่อนุพันธ์ทั้งหมดกฎของแอมแปร์และกฎของฟาราเดย์ ด้วยความแตกต่างที่จำกัดความไม่ต่อเนื่องของช่องว่างและเวลาที่ถูกแทนที่ด้วยสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

3.2.2 การแก้ปัญหาค่าผลต่างของความแตกต่างของสมการจะถูกแทนที่เรียกว่า “Update Equations” แสดงให้เห็นเทอมของความน่าจะเป็นของสนามและสนามที่เกิดขึ้นแล้ว

3.2.3 วิวัฒนาการของสนามแม่เหล็กใน 1 Time-Step จะทำให้สามารถทำนายสนามที่จะเกิดขึ้นได้

3.2.4 วิวัฒนาการของสนามไฟฟ้าใน 1 Time-Step จะทำให้สามารถทำนายสนามที่จะเกิดขึ้นได้

3.2.5 แทนที่การทำนายสนามในข้อที่ผ่านมา จนกระทั่งเราทราบค่าที่สนามที่เกิดขึ้นในระยะเวลาที่ต้องการ

ในขั้นตอนนี้บทสรุปอาจเป็นนามธรรมเกินไป สิ่งหนึ่งที่ต้องเป็นตัวอย่างเพื่อแสดงให้เห็นความเรียบง่ายของวิธีการ อย่างไรก็ตามการพัฒนาสมการแบบสามมิติแบบเต็มรูปแบบจะเป็นขั้นตอนแรกจะถูกนำเสนอในมิติเดียว

3.3 กระบวนการสร้างสมการใน 1 มิติ

การศึกษากระบวนการคุณสมบัติของแสงในตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหในงานวิจัยนี้เราจะศึกษาผ่านตัวกลางที่มีผลต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า (Magnetic Field and Electric Field) ซึ่งผลกระทบในระดับมาโครจะอยู่ในรูปของ ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า และค่าสภาพซึบซาบทางแม่เหล็ก (Permittivity : ϵ and Permeability : μ)

พิจารณาพื้นที่ใน 1 มิติที่มีทิศการเคลื่อนที่แนวแกน x โดยกำหนดว่าสนามไฟฟ้ามีทิศทางในแนวแกน z ซึ่งสามารถเขียนได้ตามสมการของฟาราเดย์ (Faraday’s Law)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$-\mu \frac{\partial H}{\partial t} = \nabla \times E = \begin{vmatrix} \hat{a}_x & \hat{a}_y & \hat{a}_z \\ \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & E_z \end{vmatrix} = -\hat{a}_y \frac{\partial E_z}{\partial x} \quad (3.1)$$

ดังนั้น H_y ต้องเป็นส่วนประกอบที่ไม่ใช่ศูนย์ของสนามแม่เหล็กซึ่งเป็นเวลาที่แตกต่างกัน (ตั้งแต่ด้านขวามือของสมการนี้มีเพียงส่วนประกอบ y สนามแม่เหล็กอาจมีองค์ประกอบที่ไม่ใช่ศูนย์ในแนวแกน x และ z) สามารถเขียนตามกฎของแอมแปร์ (Ampere's Law) ได้ ดังนี้

$$\varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} = \nabla \times H = \begin{vmatrix} \hat{a}_x & \hat{a}_y & \hat{a}_z \\ \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & H_y & 0 \end{vmatrix} = \hat{a}_z \frac{\partial H_y}{\partial x} \quad (3.2)$$

จากสมการที่ (3.1) และ (3.2) สามารถเขียนในรูปอนุพันธ์ได้ ดังนี้

$$\mu \frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{\partial E_z}{\partial x}, \quad (3.3)$$

$$\varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{\partial H_y}{\partial x} \quad (3.4)$$

สมการที่ (3.3) ให้อนุพันธ์ของสนามแม่เหล็กในแง่ของอนุพันธ์เชิงพื้นที่ของสนามไฟฟ้า ตรงกันข้ามสมการที่ (3.4) ให้อนุพันธ์ของสนามไฟฟ้าในแง่ของอนุพันธ์เชิงพื้นที่ของสนามแม่เหล็ก ตามที่แสดงในสมการที่ (3.3) จะใช้เพื่อเลื่อนสนามแม่เหล็กในขณะที่สมการที่ (3.4) จะใช้เพื่อเพิ่มสนามไฟฟ้า ซึ่งเป็นวิธีการที่จะทำให้สนามใดสนามหนึ่งสูงขึ้นจากนั้นอีกส่วนหนึ่งจะถูกทำซ้ำ

ในขั้นตอนต่อมาจะแทนที่สมการที่ (3.3) และ (3.4) ในผลต่างเชิงเวลา ซึ่งการทำเช่นนี้แสดงให้เห็นถึงพื้นที่และเวลาที่ต้องการแทนที่

$$E_z(x, t) = E_z(m\Delta_x, q\Delta_t) = E_z^q[m], \quad (3.5)$$

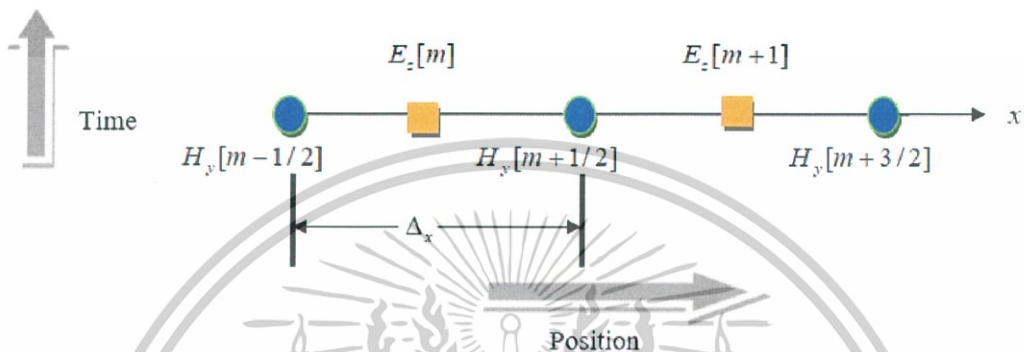
$$H_y(x, t) = H_y(m\Delta_x, q\Delta_t) = H_y^q[m], \quad (3.6)$$

เมื่อ Δ_x คือ ผลต่างเชิงพื้นที่ (Spatial Offset) ระหว่างสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก Δ_t คือ ผลต่างเชิงเวลา (Temporal Offset) ระหว่างสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก m คือ ค่าดัชนีที่สอดคล้องกับผลต่างเชิงพื้นที่ ในขณะที่ q คือ ค่าดัชนีที่สอดคล้องกับผลต่างเชิงเวลา ดังนั้นใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเอกสารวิจัยเท่านั้น เมื่อผู้ยูทิลิตี้เห็นประโยชน์หรือข้อผิดพลาดในการดำเนินการใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการ FDTD จึงเหมาะสมที่จะเก็บดัชนีเชิงพื้นที่เป็นพารามิเตอร์ที่ชัดเจนในขณะที่ระบุพารามิเตอร์เชิงเวลา

ถึงแม้จะมีเพียง 1 มิติ แต่เวลาก็ถือเป็นอีกมิติหนึ่ง ดังนั้นนี่คือรูปแบบของ 2 มิติ เช่นเดียวกัน ซึ่งจะกำหนดโหนดของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในสุญญากาศและขึ้นอยู่กับเวลา ดังแสดงในรูปที่ 3.1



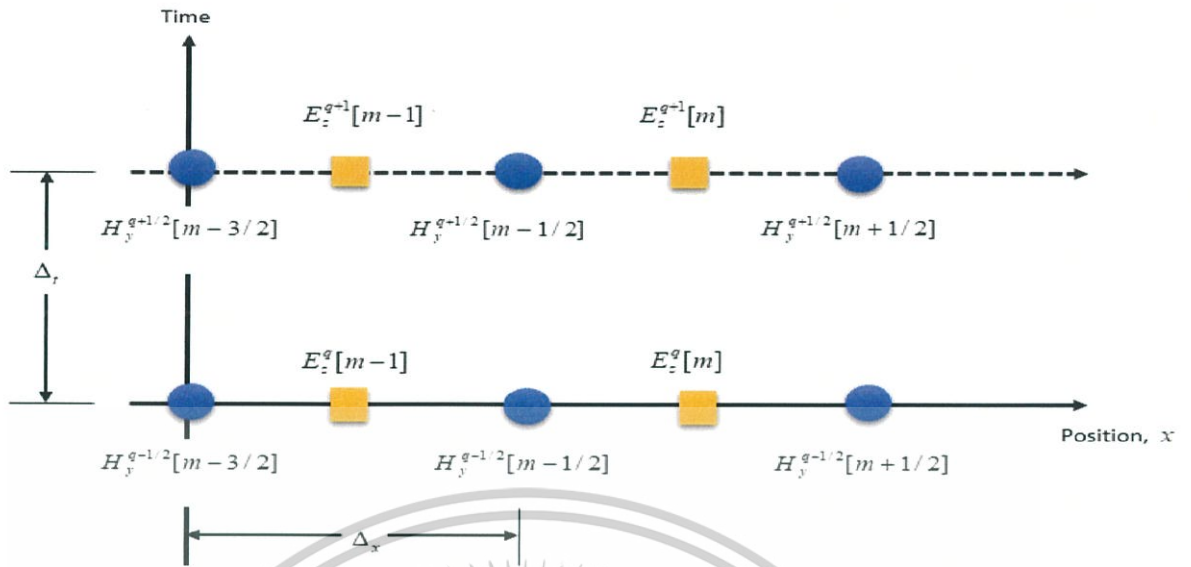
รูปที่ 3.1 การกำหนดโหนดของสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก ใน 1 มิติ

ดังแสดงในรูปที่ 3.1 โหนดสนามไฟฟ้าแสดงเป็นสี่เหลี่ยมและโหนดสนามแม่เหล็กแสดงเป็นรูปร่างกลม ตอนนี้จะพิจารณากฎของแอมแปร์ (Ampere's Law) ที่ขึ้นกับเวลา $((m+1/2)\Delta_x, q\Delta_t)$

$$\mu \frac{\partial H_y}{\partial t} \Big|_{(m+1/2)\Delta_x, q\Delta_t} = \frac{\partial E_z}{\partial x} \Big|_{(m+1/2)\Delta_x, q\Delta_t} \quad (3.7)$$

อนุพันธ์เชิงเวลาจะถูกแทนที่ด้วยผลต่างสืบเนื่องที่เกี่ยวข้องกับ $H_y^{q+1/2}[m+1/2]$ และ $H_y^{q-1/2}[m+1/2]$ (กล่าวคือสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งคงที่ แต่มีช่วงเวลาที่ต่างกัน) ในขณะที่อนุพันธ์เชิงพื้นที่ถูกแทนที่ด้วยผลต่างสืบเนื่องที่เกี่ยวข้องกับ $E_z^q[m+1]$ และ $E_z^q[m]$ (กล่าวคือสนามไฟฟ้าที่อยู่ในตำแหน่งต่างกัน แต่ในเวลาเดียวกัน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แสดงโหนดของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กหลังจากการคำนวณ

การคำนวณสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับผลต่างสืบเนื่องทางเวลา เป็นดังนี้

$$\mu \frac{H_y^{q+1/2} \left[m + \frac{1}{2} \right] - H_y^{q-1/2} \left[m + \frac{1}{2} \right]}{\Delta_t} = \frac{E_z^q [m+1] + E_z^q [m]}{\Delta_x} \quad (3.8)$$

เมื่อกำหนดสมการที่ (3.8) ในเทอมของ $H_y^{q+1/2} \left[m + \frac{1}{2} \right]$ จะได้ว่า

$$H_y^{q+1/2} \left[m + \frac{1}{2} \right] = H_y^{q-1/2} \left[m + \frac{1}{2} \right] + \frac{\Delta_t}{\mu \Delta_x} (E_z^q [m+1] - E_z^q [m]) \quad (3.9)$$

เรียกสมการที่ (3.9) เป็นการอัปเดตสนามแม่เหล็ก (Update H_y) เป็นสมการทั่วไปที่สามารถใช้กับโหนดใดก็ได้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าของ H_y หลังจากการอัปเดต ขึ้นอยู่กับค่าโหนดก่อนหน้าและโหนดสนามไฟฟ้าเท่านั้น หลังจากการคำนวณในสมการที่ (3.9) กับโหนดสนามทั้งหมดเส้นแบ่งระหว่างค่าก่อนและหลังการอัปเดตได้เพิ่มขึ้นครึ่งหนึ่งของเวลา (Time Step) ผลต่างของพื้นที่และเวลาในรูปที่ 3.2 จะเป็นเช่นเดียวกับรูปที่ 3.1 โดยรูปที่ 3.2 จะแสดงโหนดทั้งก่อนและหลังจากการอัปเดต

พิจารณากฎของแอมแปร์ (Ampere's Law) ในสมการที่ (3.4) กับโหนดของผลต่างเชิงพื้นที่ เอกสารและผลต่างเชิงเวลา $(m\Delta_x, (q+1/2)\Delta_t)$ ดังปรากฏในรูปที่ 3.2 อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณ ไม่วุ่นวายใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial t} \Big|_{m\Delta_x, (q+1/2)\Delta_t} = \frac{\partial H_y}{\partial x} \Big|_{m\Delta_x, (q+1/2)\Delta_t} \quad (3.10)$$

แทนที่อนุพันธ์ด้านซ้ายในสมการที่ (3.10) ด้วย $E_z^{q+1}[m]$ และ $E_z^q[m]$ และแทนที่อนุพันธ์ด้านขวา ด้วย $H_y^{q+1/2}\left[m + \frac{1}{2}\right]$ และ $H_y^{q+1/2}\left[m - \frac{1}{2}\right]$

$$\varepsilon \frac{E_z^{q+1}[m] - E_z^q[m]}{\Delta_t} = \frac{H_y^{q+1/2}\left[m + \frac{1}{2}\right] - H_y^{q+1/2}\left[m - \frac{1}{2}\right]}{\Delta_x} \quad (3.11)$$

เมื่อกำหนดสมการที่ (3.11) ในเทอมของ $E_z^{q+1}[m]$ จะได้ว่า

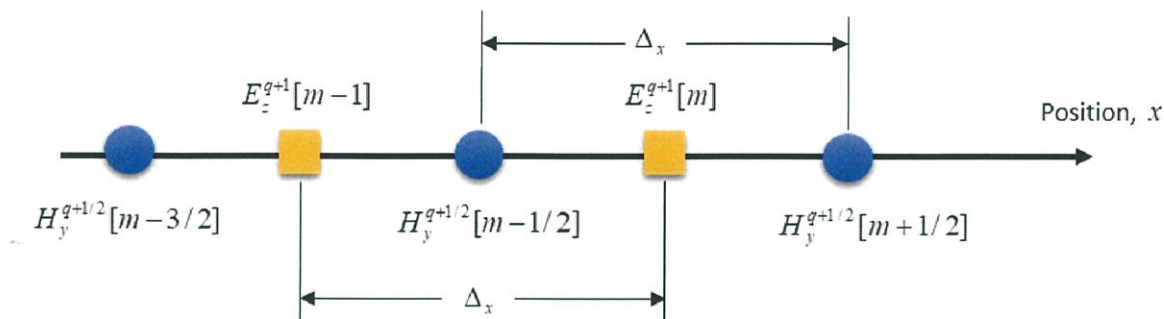
$$E_z^{q+1}[m] = E_z^q[m] + \frac{\Delta_t}{\varepsilon \Delta_x} \left(H_y^{q+1/2}\left[m + \frac{1}{2}\right] - H_y^{q+1/2}\left[m - \frac{1}{2}\right] \right) \quad (3.12)$$

เรียกสมการที่ (3.12) เป็นการอัปเดตสนามไฟฟ้า (Update E_z) เป็นสมการทั่วไปที่สามารถใช้กับ โหนดใดก็ได้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าของ E_z หลังจากการอัปเดต ขึ้นอยู่กับค่าโหนดก่อนหน้าและโหนด สนามแม่เหล็กเท่านั้น หลังจากการคำนวณในสมการที่ (3.12) กับโหนดสนามไฟฟ้าทั้งหมดกับเส้น แบ่งระหว่างค่าก่อนและหลังการอัปเดตได้เพิ่มขึ้นครึ่งหนึ่งของเวลา (Time Step) สิ่งที่สำคัญที่สุด ของการอัปเดตที่แสดงในรูปที่ 3.2 ที่แสดงเส้นแบ่งระหว่างก่อนและหลังการอัปเดต และจะทำการ อัปเดตเช่นนี้อีกครั้งตามจำนวนของ Time Step ที่กำหนด ซึ่งในงานวิจัยนี้จะกำหนดให้มีค่า Time Step มีค่าเท่ากับ 8000

การเคลื่อนที่ของสนามในวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมในโดเมนเวลา (FDTD) มีข้อจำกัดคือ พลังงานไม่ควรที่จะเคลื่อนที่ได้มากกว่าหนึ่งขั้นตอนในผลต่างเชิงพื้นที่สำหรับการอัปเดตในแต่ละครั้ง, $c\Delta_t \leq \Delta_x$ เนื่องจากอวกอร์ที่มของ FDTD แต่ละโหนดจะมีผลกับโหนดที่อยู่ถัดไป อัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับค่าผลต่างเชิงพื้นที่กับผลต่างเชิงเวลา (ในแง่ของการลดความผิดพลาดที่เป็นตัวเลข) สำหรับการจำลองแบบหนึ่งมิติถือว่าเป็นขั้นแรกๆ ที่ควรจะมีค่าที่เหมาะสม ดังนี้

$$S_c = \frac{c\Delta_t}{\Delta_x} = 1 \quad (3.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 กระบวนการ FDTD ใน 1 มิติ ที่แสดงผลต่างเชิงพื้นที่ระหว่างสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

จากสมการที่ได้รับการอัปเดตด้วยวิธี FDTD จะเป็นการคำนวณที่ขึ้นกับผลต่างเชิงเวลา อย่างไรก็ตาม การที่เวลาเป็นมิติเพิ่มเติมอาจจะทำให้ความเข้าใจได้ค่อนข้างยาก ดังนั้นในการคำนวณส่วนใหญ่จะคำนวณในเชิงของมิติผลต่างเชิงพื้นที่ของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ดังรูปที่ 3.3 กระบวนการ FDTD ใน 1 มิติ ที่แสดงผลต่างเชิงพื้นที่ระหว่างสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

3.4 การกระจายตัวอย่างต่อเนื่อง

พิจารณาคลื่นระนาบที่แพร่กระจายไปในแนวแกน $+x$ โดยไม่มีการสูญเสียพลังงาน ในรูปแบบเวลาฮาร์มอนิก (time - harmonic) จากผลต่างเชิงเวลาไปยังผลต่างเชิงพื้นที่ที่ขึ้นอยู่กับ $\exp(j[\omega t - \beta x])$ ที่ ω คือความถี่และ β เป็นค่าคงที่ของเฟส (wave number) ความเร็วของคลื่นสามารถหาได้โดยพิจารณาว่าจุดที่กำหนดบนคลื่น เคลื่อนที่เร็วแค่ไหน ในบริบทนี้ "จุด" หมายถึงจุดของเฟสคงที่ ถูกกำหนดโดย $\omega t - \beta x$ ซึ่งจะเท่ากับค่าคงที่และผลต่างเชิงเวลา ดังนี้

$$\frac{d}{dt}(\omega t - \beta x) = \frac{d}{dt}(\text{constant}), \quad (3.14)$$

$$\omega - \beta \frac{dx}{dt} = 0 \quad (3.15)$$

ในสมการที่ (3.14) x จะเป็นตำแหน่งที่ให้เฟสเดียว ซึ่งไม่ใช่ตัวแปรอิสระ ตำแหน่ง x ที่ให้ระยะที่ต้องการจะเปลี่ยนตามเวลา ดังนั้น dx/dt คือ ความเร็วของคลื่นหรือที่ถูกต้องคือความเร็วเฟส c_p

การแก้สมการ (3.15) สำหรับอัตราความเร็วเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$c_p = \frac{dx}{dt} = \frac{\omega}{\beta} \quad (3.16)$$

สิ่งที่ปรากฏในสมการที่ (3.16) คือ ความถี่ แต่สำหรับคลื่นระนาบ เฟสคงที่ β สามารถคำนวณได้จาก $\omega\sqrt{\mu\varepsilon}$ ดังนั้นความเร็วเฟสคือ

$$c_p = \frac{\omega}{\omega\sqrt{\mu\varepsilon}} = \frac{1}{\sqrt{\mu_r\mu_0\varepsilon_r\varepsilon_0}} = \frac{c}{\sqrt{\mu_r\varepsilon_r}} \quad (3.17)$$

โดยที่ c คือความเร็วของแสงในสุญญากาศ โปรดสังเกตว่าในการกระจายแบบต่อเนื่องที่ไม่มีการสูญเสียพลังงานในตัวกลาง ความเร็วของเฟสจะไม่ขึ้นกับความถี่และความสัมพันธ์ในการกระจายตัวตามความสัมพันธ์ ดังนี้

$$c_p = \frac{\omega}{\beta} = \frac{c}{\sqrt{\mu_r\varepsilon_r}} \quad (3.18)$$

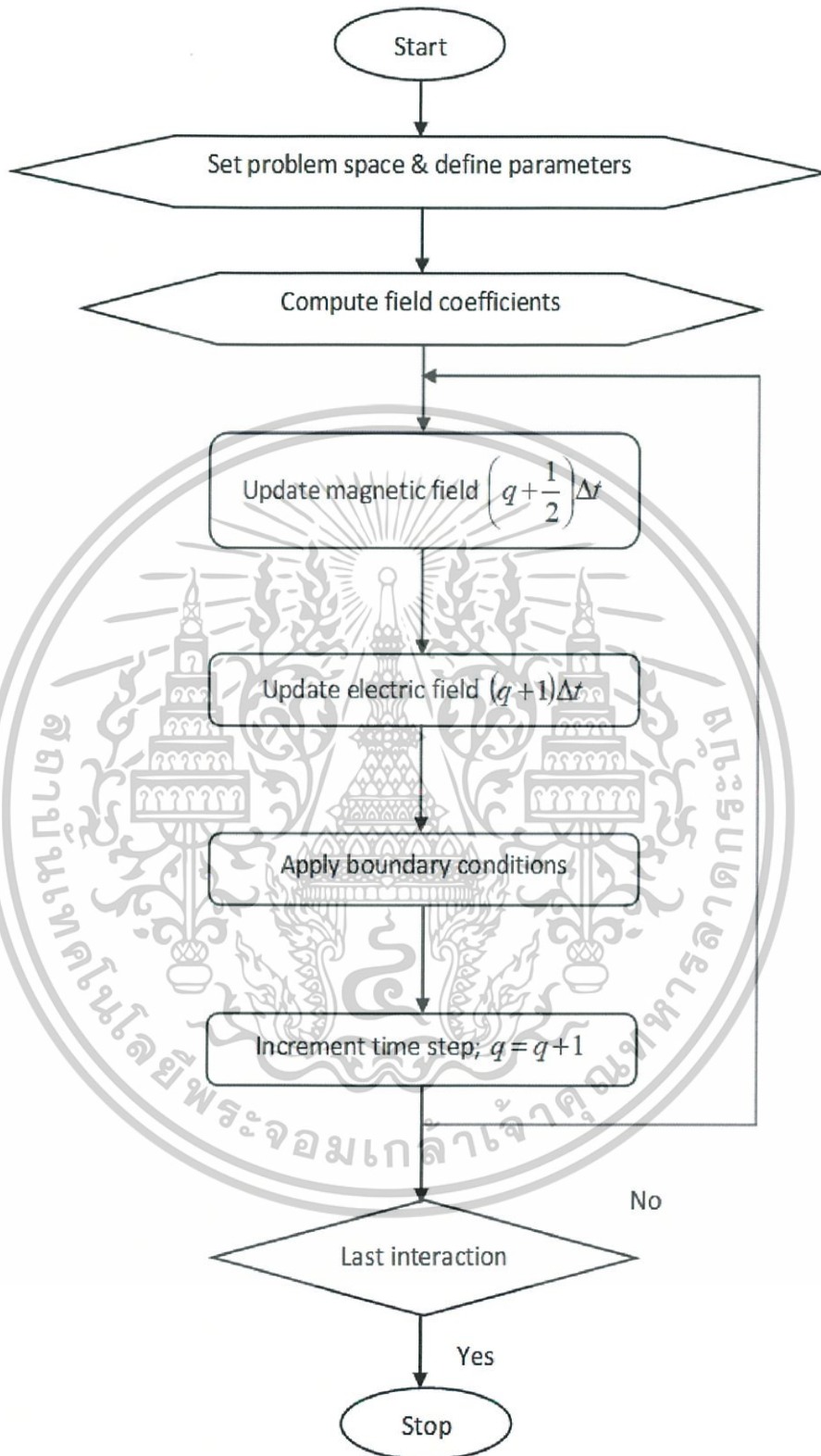
เนื่องจาก c เป็นค่าคงที่และเรากำหนดว่า μ_r และ ε_r เป็นค่าที่ได้จากตัวกลาง รวมทั้งความถี่ทั้งหมดจะแพร่กระจายด้วยความเร็วเท่ากัน แต่กรณีนี้ไม่ได้เกิดขึ้นกับ FDTD แบบไม่ต่อเนื่องเนื่องจากมีความถี่และความเร็วเฟสต่างกัน

3.5 โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับกระบวนการจำลองโดยวิธี FDTD

ในหัวข้อนี้จะเป็นการออกแบบโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้สำหรับกระบวนการจำลองโดยวิธี FDTD ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ซึ่งในงานวิจัยฉบับนี้จะใช้ หน่วยประมวลผลกราฟฟิค (GPU) NVIDIA GeForce GTX 1050 Ti, CUDA Cores : 768 CUDA Cores, Base Clock : 1290 MHz, VRAM : 4 GB GDDR5 เพื่อประสิทธิภาพที่ดีที่สุดของการประมวลผลและเป็นการเพิ่มขีดความสามารถในการประมวลผล

ลักษณะแผนผังการทำงานและลำดับขั้นตอนในการคำนวณของโครงสร้างตามที่กล่าวมาแล้วข้างต้น โดยเริ่มจากการกำหนดค่าคงที่ต่างๆ ได้แก่ ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า $\varepsilon_0 = 8.854$ ค่าความซึมซาบทางแม่เหล็ก $\mu_0 = 4\pi$ ความเร็วของแสงในสุญญากาศ $c = 1/\sqrt{\varepsilon\mu} = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ สามารถใช้เพื่อสังเกตการแพร่กระจายของคลื่นผ่านแผ่นวัสดุในสุญญากาศได้

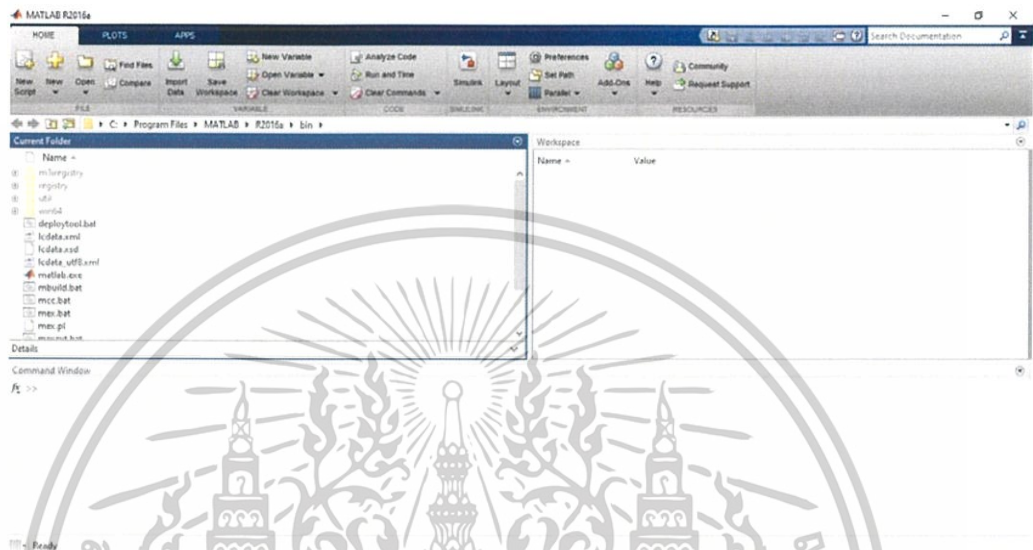
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ส่วนหนึ่งการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 รูปที่ 3.4 แสดงแผนผังการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่คำนวณด้วยวิธี FDTD
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

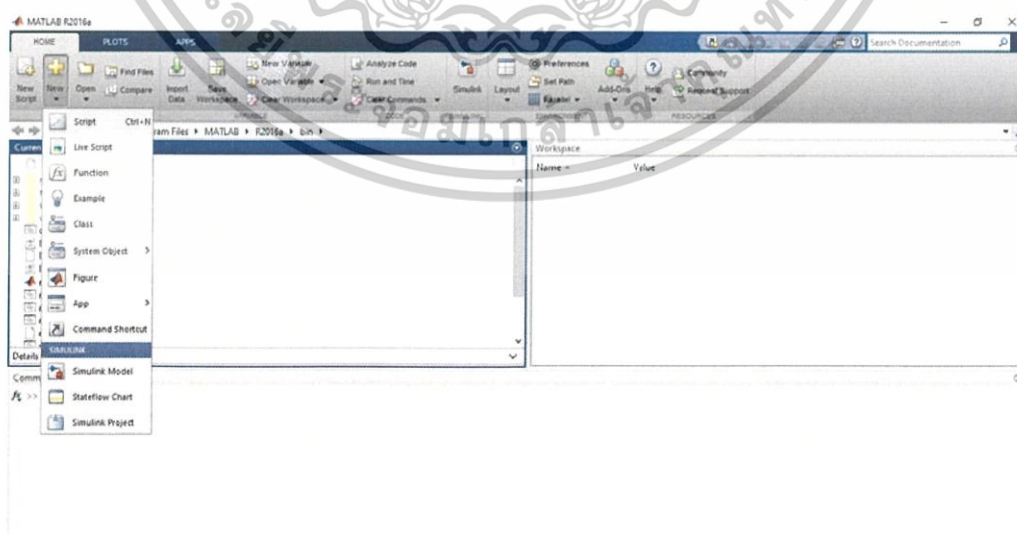
3.6 การจำลองคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดย MATLAB

วิธีการหาผลต่างในโดเมนเวลา ต้องทำการกำหนดขอบเขตเงื่อนไขเริ่มแรกต้องทำการกำหนดตัวแปรพารามิเตอร์ต่างๆ ใช้โปรแกรม Matlab 2016a เป็นโปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาคำตอบ ให้ทำการเปิดโปรแกรมขึ้นมาจะได้หน้าต่าง ดังรูปที่ 3.5



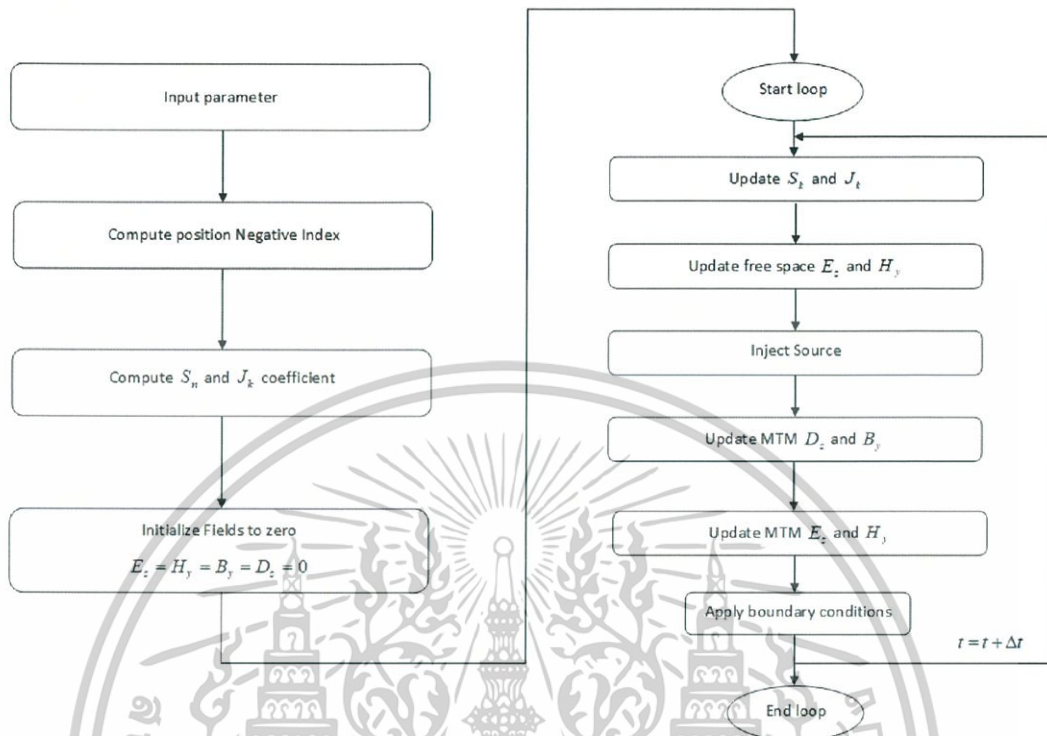
รูปที่ 3.5 แสดงหน้าต่างของโปรแกรม Matlab2016a

หลังจากที่เปิดโปรแกรมมาแล้วให้ทำการกดที่ปุ่ม New แล้วมาเลือกที่ Script หลังจากนั้นจะได้หน้าต่าง m-file มาเพื่อทำการเขียน code ถัดไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 3.6 แสดงหน้าต่างการสร้าง m file
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7 โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับกระบวนการจำลองโดย MATLAB



รูปที่ 3.7 แสดงแผนผังการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่คำนวณด้วย MATLAB

3.7.1 การสร้างแบบจำลองของลอเรนซ์ (Lorentz model)

ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าและค่าซึมซาบทางแม่เหล็กจะสามารถหาค่าได้จากแบบจำลองของลอเรนซ์ (Lorentz model) เพื่อนำไปสร้างแบบจำลองคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในขั้นตอนต่อไปโดยนำสมการของลอเรนซ์มาทำการเขียนลงในโปรแกรม MATLAB ค่าอินพุตที่ต้องใส่ให้กับสมการคือ ค่าความถี่พลาสมา ความถี่เรโซแนนท์และความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ค่าผลลัพธ์ที่ได้จะอยู่ในรูปของจำนวนจริงตามที่กล่าวไปแล้วข้างต้น ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าและค่าซึมซาบทางแม่เหล็ก เพื่อนำไปหาค่าดัชนีหักเหต่อไป ลำดับแรก กำหนดความถี่พลาสมาและความถี่เรโซแนนท์ และค่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผ่านเข้าไปกำหนดให้มีค่าตั้งแต่ 1×10^9 rad/s ถึง 1×10^{10} rad/s แล้วใส่ค่าลงในสมการของลอเรนซ์พล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถี่ในแกนนอนและค่าสภาพยอมในแกนตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
fpe=xxx;
f0=xxx;
wp=2*pi*fpe;
w0=2*pi*f0;
w=(1e9:1e3:10e9);
X=1+(wp).^2./((w0).^2-(w).^2+1i*1e8.*w);
plot(real(X),'Linewidth',2);
xlabel('x axis');
ylabel('epsilon and mu Real part');
title('Lorentz model'); grid;

```

รูปที่ 3.8 แสดงการสร้างแบบจำลองของลอเรนซ์

3.7.2 การสร้างเซลล์ยี่

การทำงานของอัลกอริทึมต้องกำหนดจำนวนตำแหน่งในแนวแกนขึ้นมา กำหนดระยะห่างของเซลล์แต่ละเซลล์สุดท้ายเราจะได้จำนวนเซลล์ทั้งหมดออกมา ในโปรแกรมของเราจะกำหนดค่าความยาวของวัสดุที่นำมาสร้างแบบจำลอง เป็นไปตามขั้นตอนดังนี้

- 1) กำหนดขนาดความยาวของตำแหน่ง ในแนวแกน x ซึ่งจะนำไปคำนวณเซลล์ยี่ต่อไป
- 2) กำหนดค่าความละเอียดของตำแหน่งในแนวแกน ให้มีขนาดกว้างเป็นตัวแปร dx
- 3) กำหนดตำแหน่งของตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหติดลบ อยู่ในช่วงตั้งแต่ $Kx1 \rightarrow Kx2$

- 4) เมื่อกำหนดตัวแปรต่างๆแล้วทำการกำหนดช่วงเวลาของ time step ได้จากสมการ $\Delta t = \frac{0.95\Delta x}{c_0}$

- 5) นำผลลัพธ์ในขั้นตอนที่ 5 ไปคำนวณหาจำนวน N ครั้งในการทำซ้ำโดยคำนวณได้จากการใช้ฟังก์ชันใน matlab ค่าที่ได้จากการคำนวณจะถูกปัดขึ้นเป็นจำนวนเต็มบวก $N = \text{round}\left(\frac{T}{\Delta t}\right)$

3.7.3 การเคลื่อนที่ของคลื่น 1 มิติในตัวกลางที่มีดัชนีหักเหติดลบ

การเคลื่อนที่ของคลื่นในตัวกลางสามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้ FDTD ที่กล่าวไว้

ข้างต้น สมการที่จะมาเป็นตัวช่วยให้มีเงื่อนไขของวัสดุที่มีดัชนีหักเหติดลบนั่นคือ Auxiliary Differential Equations (ADE) เป็นวิธีการแปลงจากตัวแปรที่ขึ้นอยู่กับความถี่ในแบบจำลอง

ของลอวเรนซ์ให้อยู่ในรูปของอนุพันธ์เวลา $j\omega \leftrightarrow \frac{\partial^2}{\partial t^2}$ และ $-\omega^2 \leftrightarrow \frac{\partial^2}{\partial t^2}$ จากสมการคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

$$D(\omega) = \varepsilon_0 \varepsilon_\infty E(\omega) + S_k(\omega) \quad (3.19)$$

$$B(\omega) = \mu_0 \mu_\infty H(\omega) + J_k(\omega) \quad (3.20)$$

เมื่อ

$$S_k(\omega) = \varepsilon_0 \frac{\omega_{pe}^2}{\omega_{0e}^2 - \omega^2 + j\Gamma\omega} E(\omega) \quad (3.21)$$

$$J_k(\omega) = \mu_0 \frac{\omega_{pm}^2}{\omega_{0m}^2 - \omega^2 + j\Gamma\omega} H(\omega) \quad (3.22)$$

ใช้อินเวอร์สฟูเรียร์ทรานฟอร์มแปลงสมการที่ (3.21) และ (3.22) จะได้ว่า

$$\frac{\partial^2 S_k(t)}{\partial t^2} + \Gamma \frac{\partial S_k(t)}{\partial t} + \omega_{0e}^2 S_k(t) = \varepsilon_0 \omega_{pe}^2 E(t) \quad (3.23)$$

$$\frac{\partial^2 J_k(t)}{\partial t^2} + \Gamma \frac{\partial J_k(t)}{\partial t} + \omega_{0m}^2 J_k(t) = \varepsilon_0 \omega_{pm}^2 H(t) \quad (3.24)$$

แปลงสมการที่ (3.23) และ (3.24) ให้อยู่ในรูปสมการไม่ต่อเนื่อง จะได้ว่า

$$S_k^{n+1} = \left[\frac{2 - \Delta t^2 \omega_{0e}^2}{1 + 0.5\Delta t\Gamma} \right] S_k^n + \left[\frac{0.5\Delta t\Gamma - 1}{0.5\Delta t\Gamma + 1} \right] S_k^{n-1} + \left[\frac{\Delta t^2 \varepsilon_0 \omega_{pe}^2}{1 + 0.5\Delta t\Gamma} \right] E^n \quad (3.25)$$

$$J_k^{n+1} = \left[\frac{2 - \Delta t^2 \omega_{0m}^2}{1 + 0.5\Delta t\Gamma} \right] J_k^n + \left[\frac{0.5\Delta t\Gamma - 1}{0.5\Delta t\Gamma + 1} \right] J_k^{n-1} + \left[\frac{\Delta t^2 \varepsilon_0 \omega_{pm}^2}{1 + 0.5\Delta t\Gamma} \right] H^n \quad (3.26)$$

จากนั้นนำสมการที่ได้มาใช้ในสมการคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จะได้ว่า

$$D^{n+1}(i) = D^n(i) + \frac{\Delta t}{\Delta x} [H^n(i) - H^{n-1}(i-1)]; \quad (3.27)$$

$$B^{n+1}(i) = B^n + \frac{\Delta t}{\Delta x} [E^{n+1}(i+1) - E^{n+1}(i)]; \quad (3.28)$$

$$E^{n+1} = \frac{D^{n+1} - S_k^{n+1}}{\varepsilon_0 \varepsilon_\infty} \quad (3.29)$$

$$H^{n+1} = \frac{B^{n+1} - J_k^{n+1}}{\mu_0 \mu_\infty} \quad (3.30)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนลำดับการทำงานอัลกอริทึมสามารถเขียนสรุปได้ดังนี้

1. ทำการปรับปรุงค่า S_k จากสมการที่ 19 a โดยใช้ค่า E และ S_k จากค่าก่อนหน้า
2. ทำการปรับปรุงค่าสนามไฟฟ้า E จากสมการที่ 14 b ในสุญญากาศและทำการแทรกแหล่งกำเนิดคลื่นลงไป
3. ทำการปรับปรุงค่า D ในสมการ 20a ในตัวกลางดัชนีหักเหติดลบจากค่า D และ H จากค่าก่อนหน้า
4. ทำการปรับปรุงค่า E ในตัวกลางดัชนีหักเหติดลบจากค่า D และ S_k จากค่าก่อนหน้า
5. ทำซ้ำจนครบจำนวนรอบ N รอบ



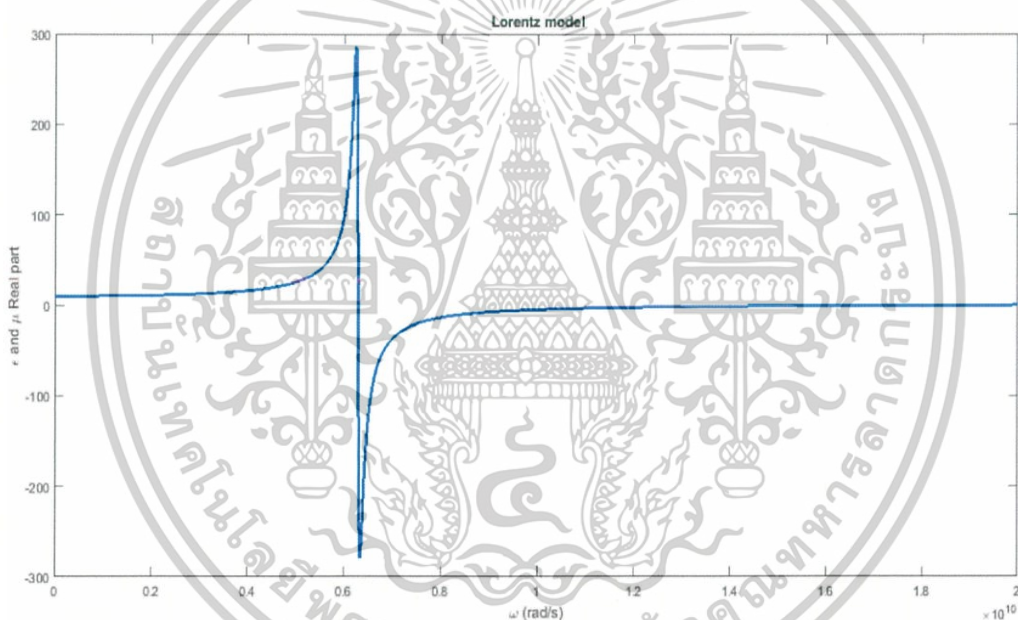
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 แบบจำลองของลอเรนซ์ (Lorentz Model)

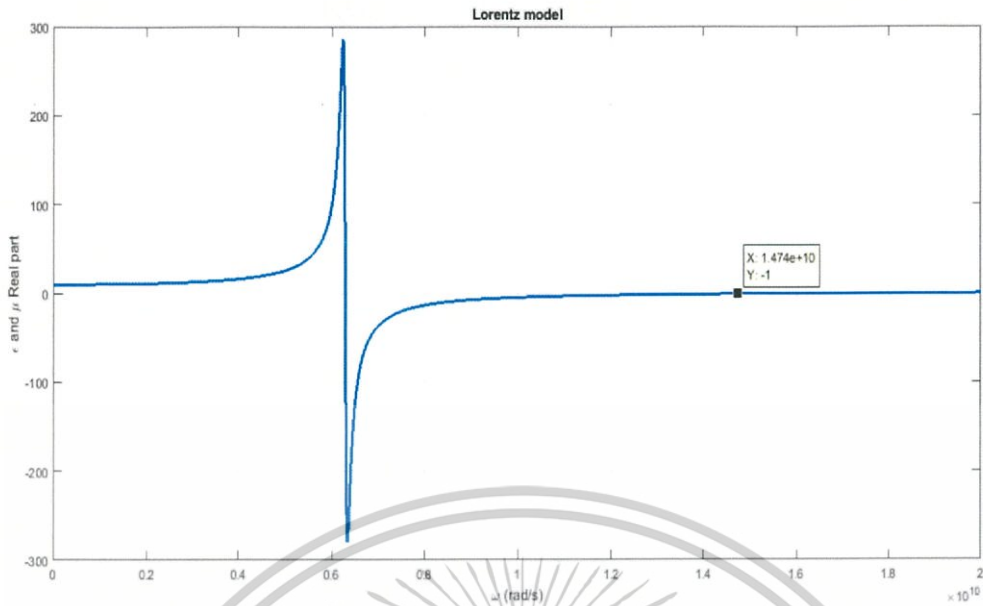
จากบทที่ 3 ที่ได้สร้างแบบจำลองของลอเรนซ์เพื่อทำการหาค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าและค่าซิมซาบทางแม่เหล็กเพื่อที่จะนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ในตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหติดลบ ซึ่งแบบจำลองที่ได้ออกมาจะอยู่ในรูปของกราฟ ซึ่งมีแกนนอนเป็นค่าความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใส่เข้าไป และแกนตั้งเป็นค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าและค่าซิมซาบทางแม่เหล็กที่ได้จากการคำนวณโดยผลลัพธ์ที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.1



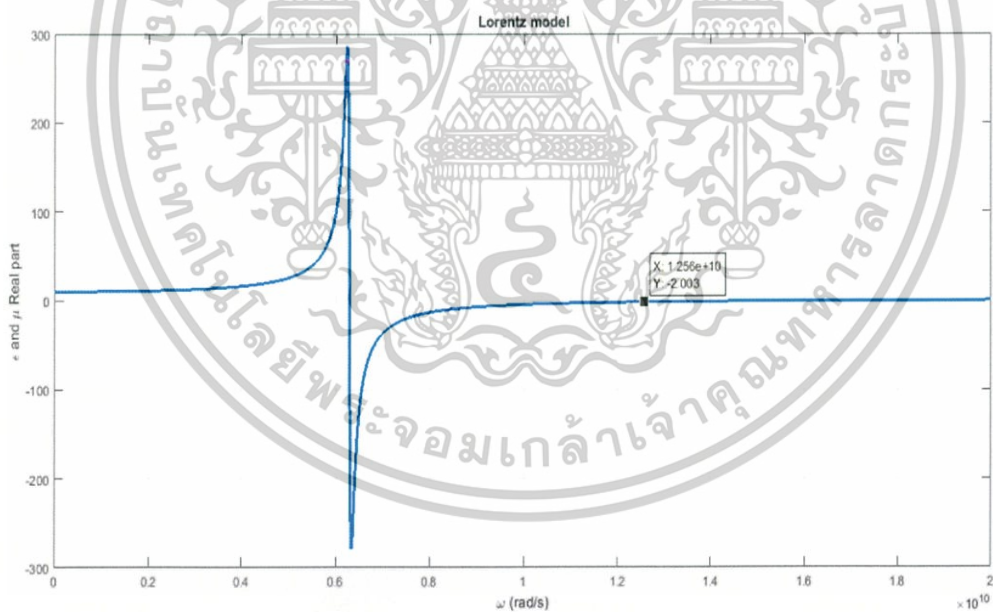
รูปที่ 4.1 แสดงแบบจำลองของลอเรนซ์

สมการของลอเรนซ์นั้นจะมีทั้งส่วนจริงและส่วนที่เป็นจำนวนจินตภาพโดยที่จำนวนจริงนั้นจะบ่งบอกค่าที่สามารถนำไปคำนวณหาค่าดัชนีหักเหได้ และส่วนจินตภาพเป็นค่าที่บอกถึงการดูดกลืนผลลัพธ์ดังแสดงดังรูปที่ 4.1 จะแสดงเฉพาะส่วนค่าจริงเท่านั้น หลังจากนั้นได้ทำการเลือกจุดบนกราฟ 4 จุดเพื่อให้ได้ค่าดัชนีหักเหเป็น -1 -2 -3 และ -4 โดยดูจากแกนตั้ง จากนั้นดูค่าความถี่ที่ต้องใส่เข้าไปบนแกนนอน ทำการเก็บผลได้ 4 ค่า ดังรูปที่ 4.2 - 4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

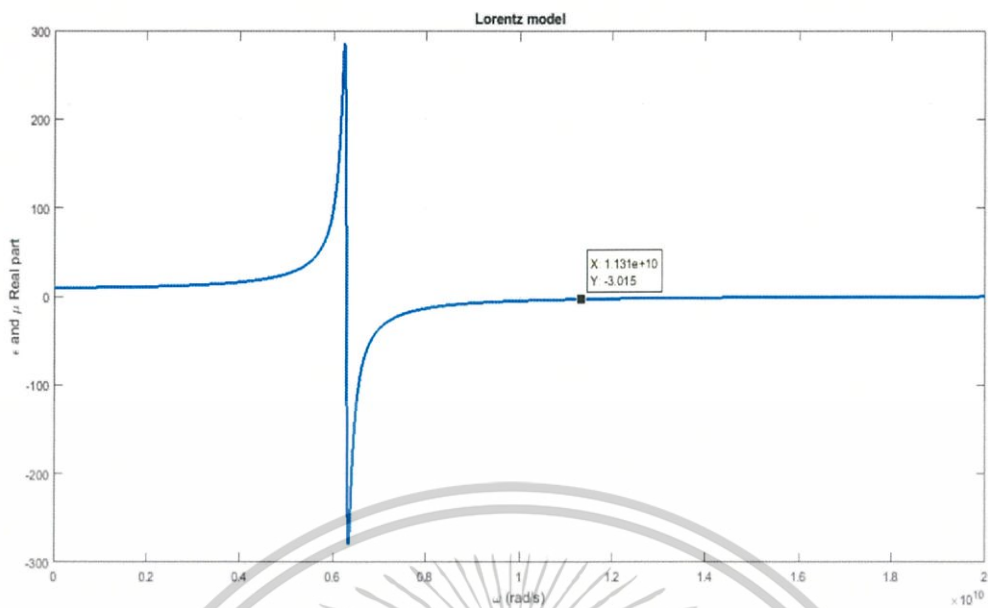


รูปที่ 4.2 แสดงแบบจำลองของลอเรนซ์ที่มีค่าดัชนีหักเห = -1

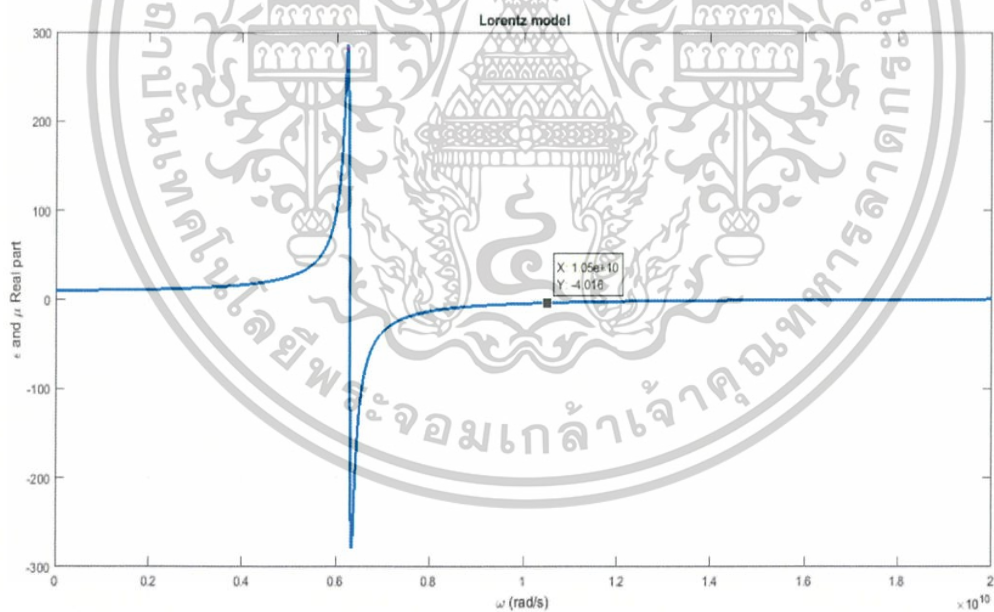


รูปที่ 4.3 แสดงแบบจำลองของลอเรนซ์ที่มีค่าดัชนีหักเห = -2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 แสดงแบบจำลองของลอเรนซ์ที่มีค่าดัชนีหักเห = -3



รูปที่ 4.5 แสดงแบบจำลองของลอเรนซ์ที่มีค่าดัชนีหักเห = -4

จากกราฟด้านบนนำค่า ω มาคำนวณกลับเพื่อหาค่ายาวคลื่นที่ต้องการ โดยใช้สมการต่อไปนี้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\omega = 2\pi f \quad (4.1)$$

$$\lambda = \frac{c_0}{f} \quad (4.2)$$

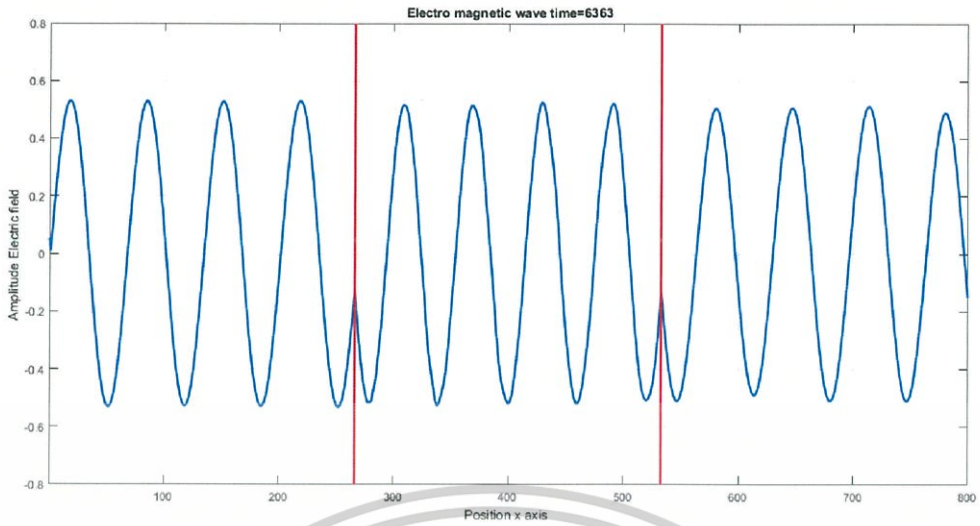
ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงค่าที่ใช้ในการคำนวณ

ค่าดัชนีหักเห (n)	ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า (ϵ),ค่าซึมซาบทาง แม่เหล็ก (μ)	ω (rad/s)	λ (m)
$n = -1$	-1	1.474×10^{10}	0.127
$n = -2$	-2.003	1.256×10^{10}	0.150
$n = -3$	-3.015	1.131×10^{10}	0.166
$n = -4$	-4.016	1.05×10^{10}	0.179

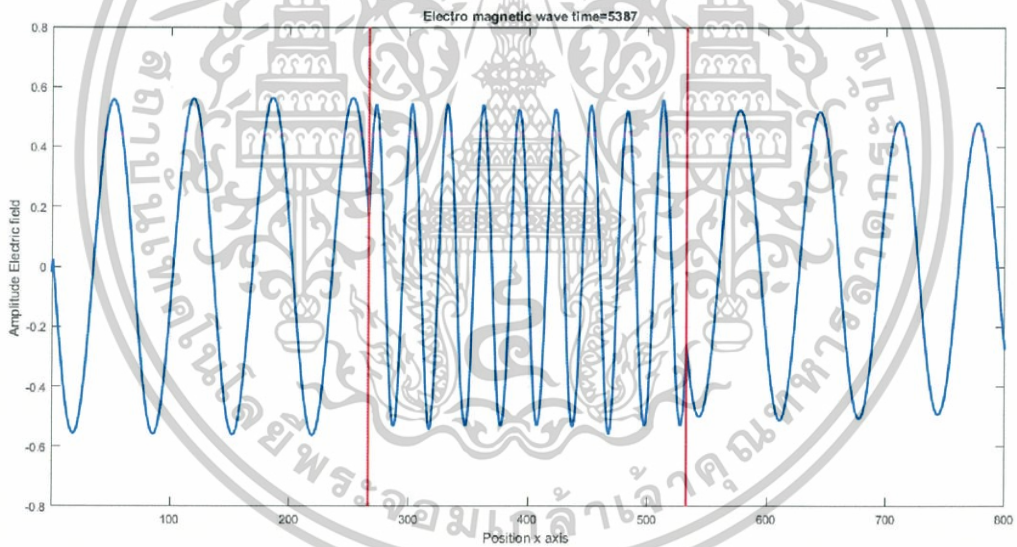
4.2 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เดินทางผ่านตัวกลางที่มีดัชนีหักเหติดลบ

เมื่อทำการทดลองสร้างแบบจำลองแล้วเก็บผลการทดลองทั้งหมด 4 ตัวอย่างด้วยกัน โดยแต่ละตัวอย่างมีค่าดัชนีหักเหแตกต่างกันหาได้จากกราฟ ได้ทดลองทำการใส่ค่าความยาวคลื่น 0.127, 0.15, 0.1664, 0.1792, เมตร เพื่อให้ได้ค่าดัชนีหักเหเท่ากับ -1, -2, -3, -4 ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.6 – 4.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

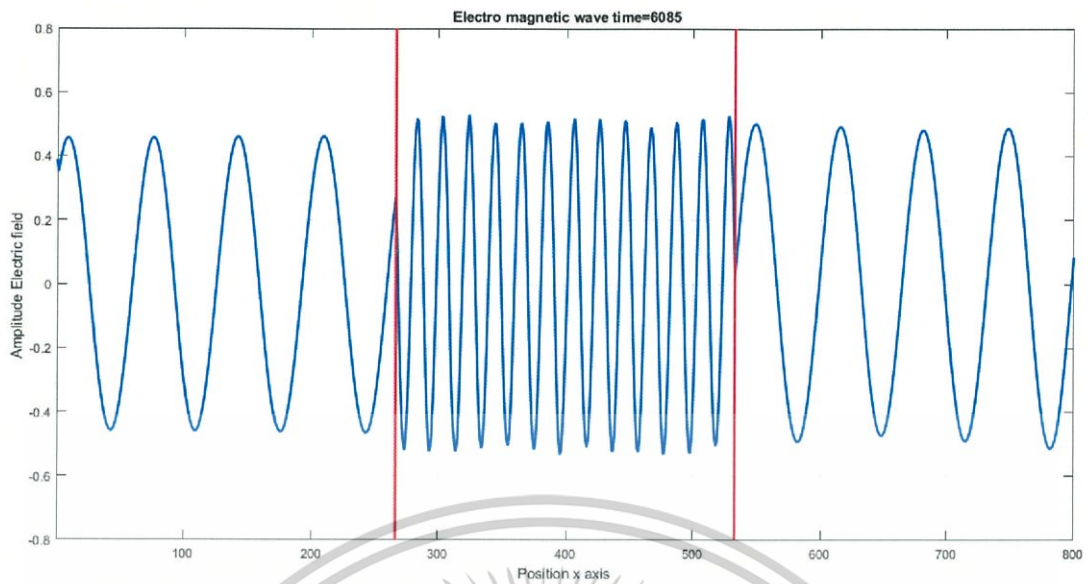


รูปที่ 4.6 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่มีดัชนีหักเหเท่ากับ -1

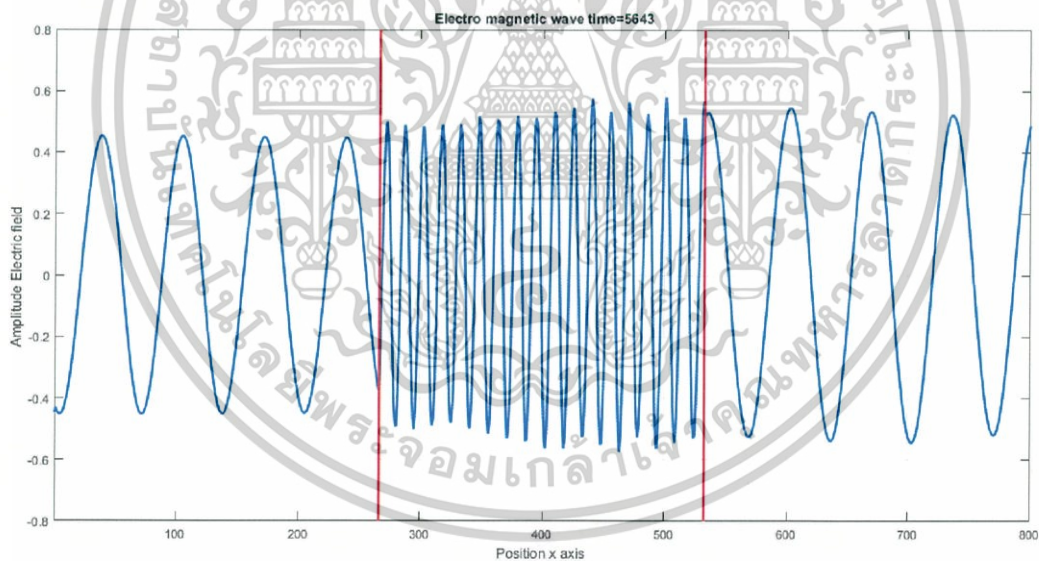


รูปที่ 4.7 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่มีดัชนีหักเหเท่ากับ -2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



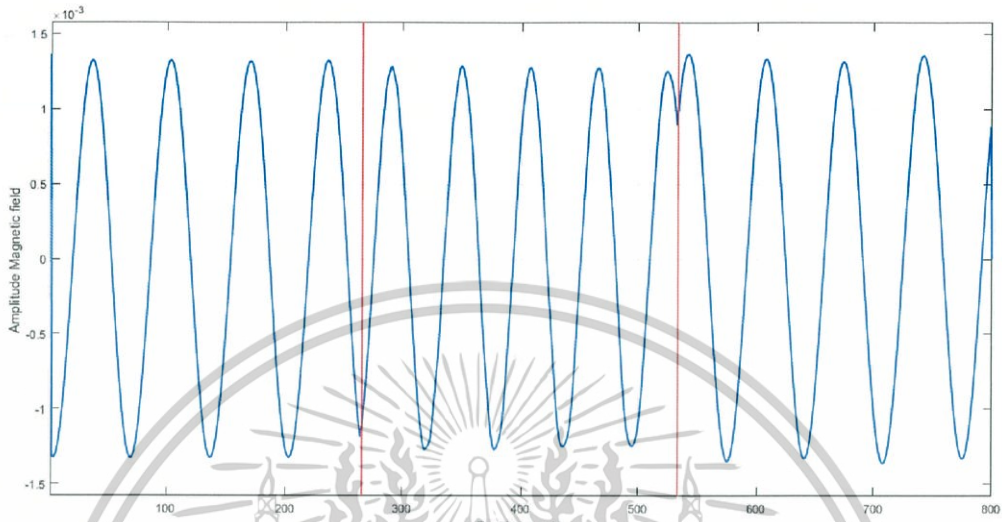
รูปที่ 4.8 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่มีดัชนีหักเหเท่ากับ -3



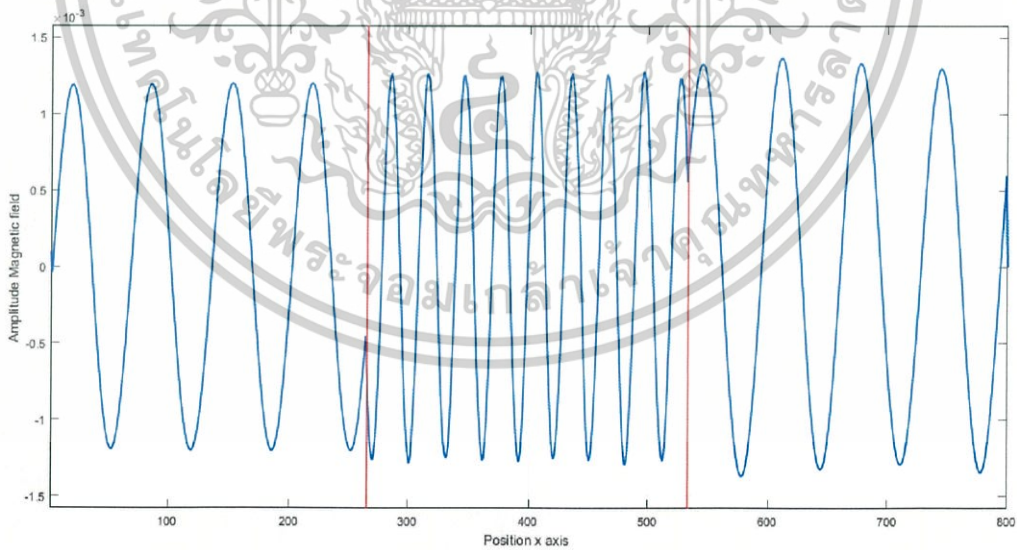
รูปที่ 4.9 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่มีดัชนีหักเหเท่ากับ -4

นอกจากแอมพิจูดสนามไฟฟ้า ยังสามารถหาแอมพิจูดของสนามเหล็กได้อีกแอมพิจูดของสนามแม่เหล็กจะมีความต่างเฟส 90 องศาคลื่นสนามไฟฟ้าเมื่อสนามแม่เหล็กผ่านตัวกลางที่มีดัชนีหักเหเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหตุติดลบจะมีลักษณะเช่นเดียวกับสนามไฟฟ้าคือมีการกลับเฟสไป 90 องศาเมื่ออยู่ในตัวกลางที่มีดัชนีหักเหติดลบ เมื่อเดินทางผ่านออกมาจะกลับเฟสอีก 90 องศา เช่นเดิมแสดงดังรูปที่ 4.10

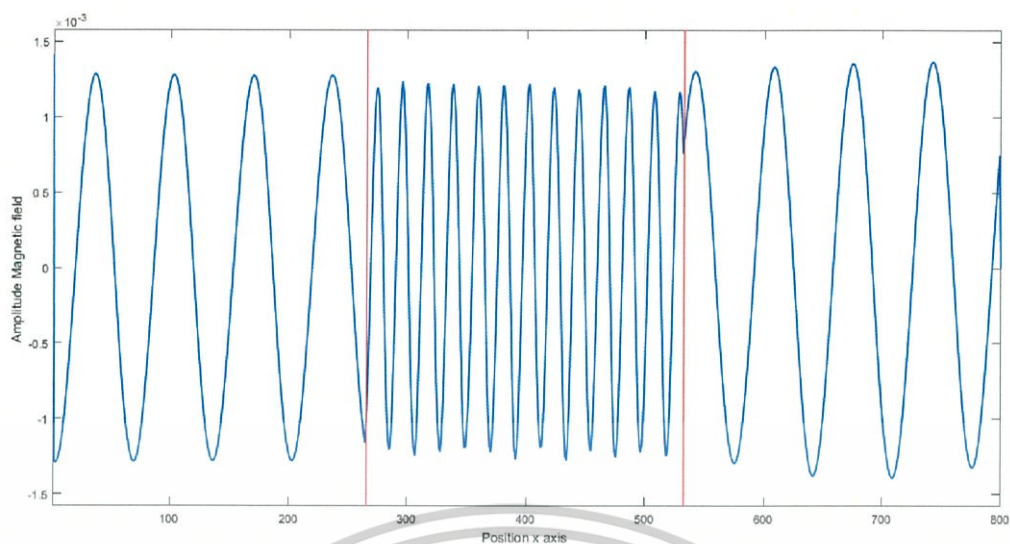


รูปที่ 4.10 สนามแม่เหล็กที่ผ่านเข้าตัวกลางที่มีดัชนีหักเหเท่ากับ -1

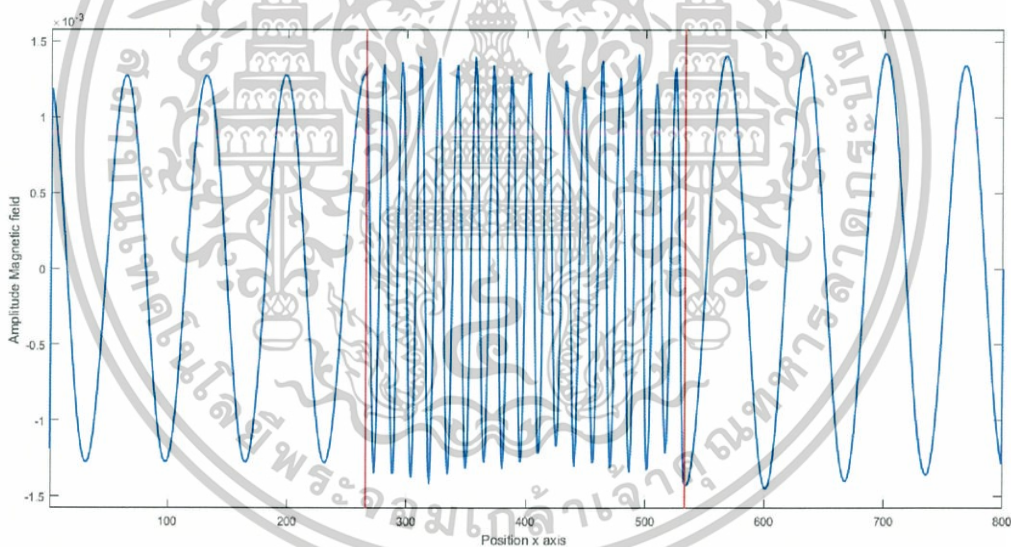


รูปที่ 4.11 สนามแม่เหล็กที่ผ่านเข้าตัวกลางที่มีดัชนีหักเหเท่ากับ -2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 สนามแม่เหล็กที่ผ่านเข้าตัวกลางที่มีดัชนีหักเหเท่ากับ -3

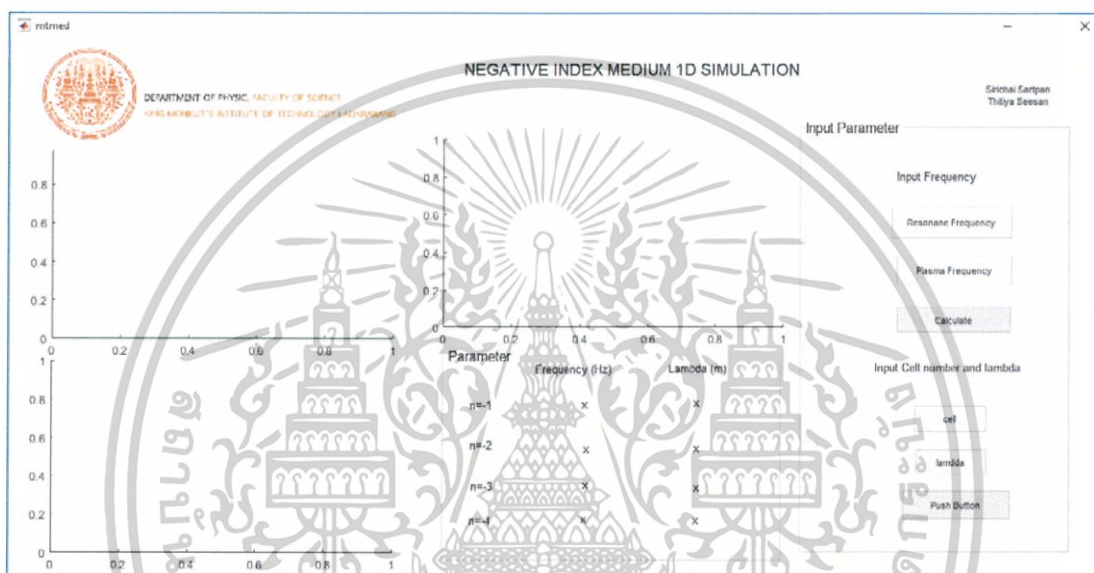


รูปที่ 4.13 สนามแม่เหล็กที่ผ่านเข้าตัวกลางที่มีดัชนีหักเหเท่ากับ -4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 โปรแกรมส่วนต่อประสานกราฟฟิกกับผู้ใช้ (GUI)

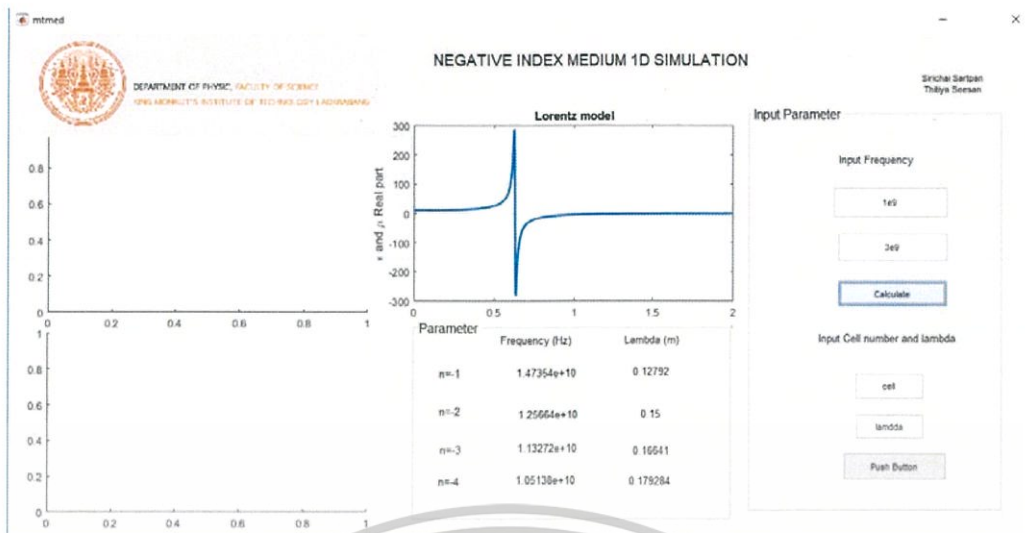
ส่วนต่อประสานกราฟฟิกกับผู้ใช้ (Graphical User Interface, GUI) เป็นส่วนประกอบของโปรแกรมที่อยู่ระหว่างโปรแกรมกับผู้ใช้ โดยจะช่วยอำนวยความสะดวกให้กับผู้ใช้งานมากขึ้น โดยจะใช้แบบจำลองของผลการทดลองข้างต้นมาสร้างเป็น GUI โดยทำการใส่ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ให้กับ GUI จากนั้นจะทำการคำนวณค่าความยาวคลื่นให้โดยอัตโนมัติ ทำให้ผู้ใช้งานไม่ต้องคำนวณเองเพื่อป้องกันการผิดพลาดต่างๆ โดยหน้าต่างของโปรแกรมที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 แสดงหน้าต่าง GUI ของโปรแกรมแบบจำลองคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

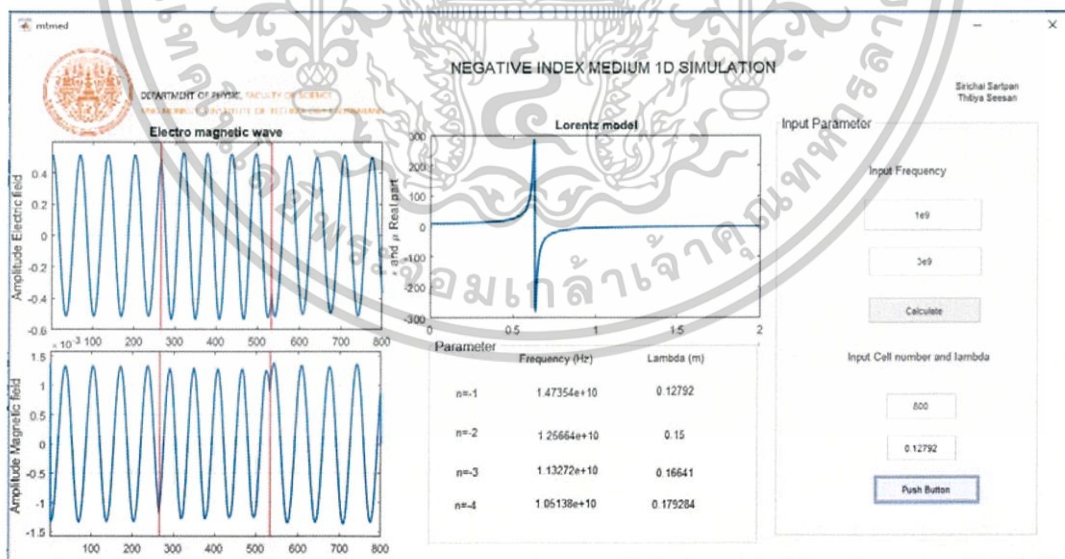
โดยจะมี 2 ส่วนหลักในการทำงาน คือการคำนวณค่าความยาวคลื่นจะต้องทำการใส่ความถี่ไซแนสท์และความถี่พลาสมาที่อยู่ในหน่วย H_z ทำให้ส่วนของ Parameter จะแสดงผลออกมาในรูปแบบของค่าความถี่กับค่ายาวคลื่น อีกทั้งยังแสดงกราฟของแบบจำลองลอเรนซ์ แสดงดังรูปที่ 4.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 แสดงผลค่าพารามิเตอร์ความยาวคลื่นเมื่อใส่ค่าความถี่เข้าไป

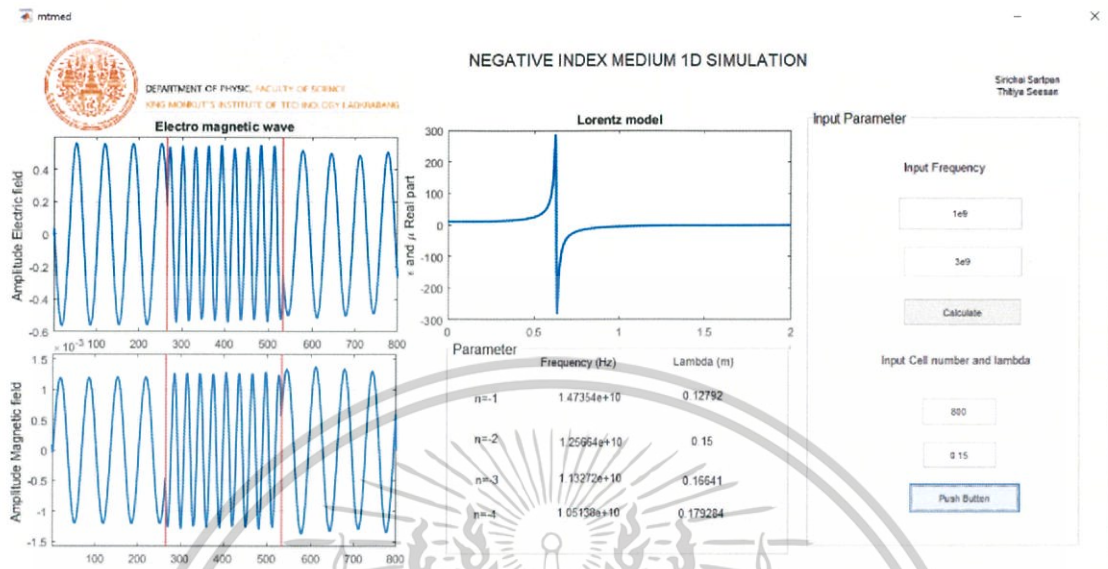
ต่อมาเมื่อได้ค่าความยาวคลื่นแล้ว นำค่าความยาวคลื่นที่ได้มาใส่ในช่องของ Lambda และ กำหนดจำนวน cell number จากนั้นกด Pushbutton ได้ทดลองทำการใส่ค่าความยาวคลื่น 0.127 เมตร เพื่อให้ได้ค่าดัชนีหักเหเท่ากับ -1 ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 แสดงผลคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผ่านตัวกลางที่มีดัชนีหักเหติดลบเท่ากับ -1 ผ่าน GUI

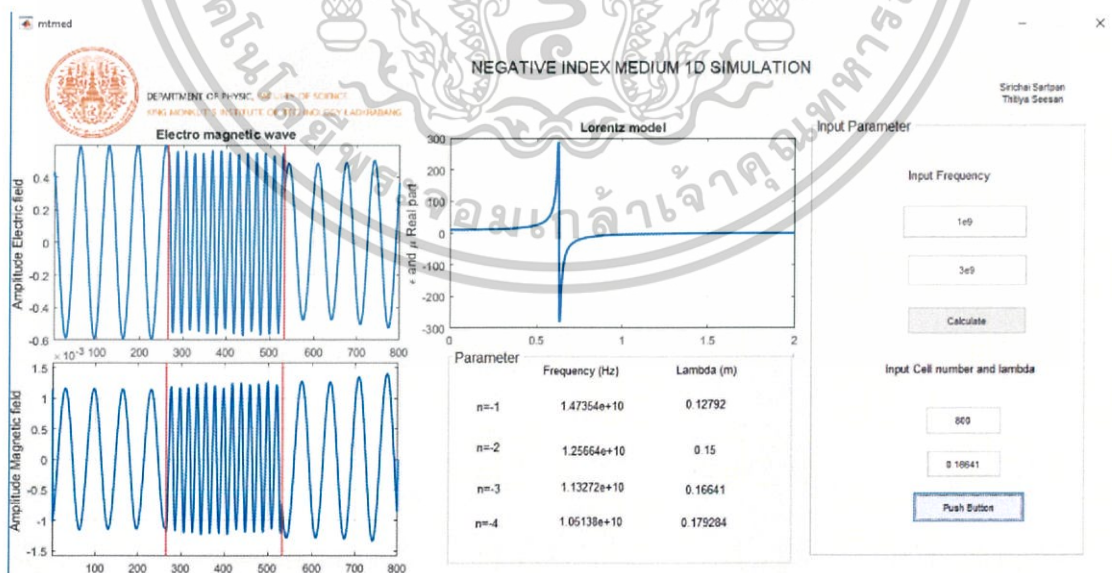
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใส่ค่าความยาวคลื่น 0.15 เมตร จะได้ดัชนีหักเหเท่ากับ -2 แสดงดังรูปที่ 4.17



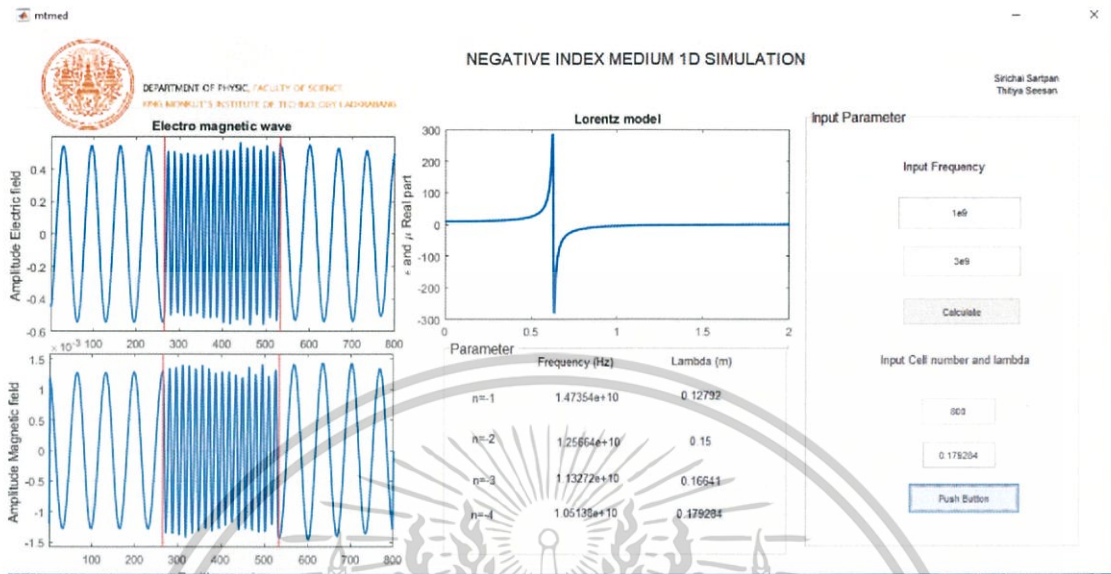
รูปที่ 4.17 แสดงผลคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผ่านตัวกลางที่มีดัชนีหักเหติดลบเท่ากับ -2 ผ่าน GUI

ใส่ค่าความยาวคลื่น 0.1664 เมตร จะได้ดัชนีหักเหเท่ากับ -3 แสดงดังรูปที่ 4.18



เอกสารนี้รูปที่ 4.18 แสดงผลคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผ่านตัวกลางที่มีดัชนีหักเหติดลบเท่ากับ -3 ผ่าน GUI ในการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใส่ค่าความยาวคลื่น 0.1792 เมตร จะได้ดัชนีหักเหเท่ากับ -4 แสดงดังรูปที่ 4.19



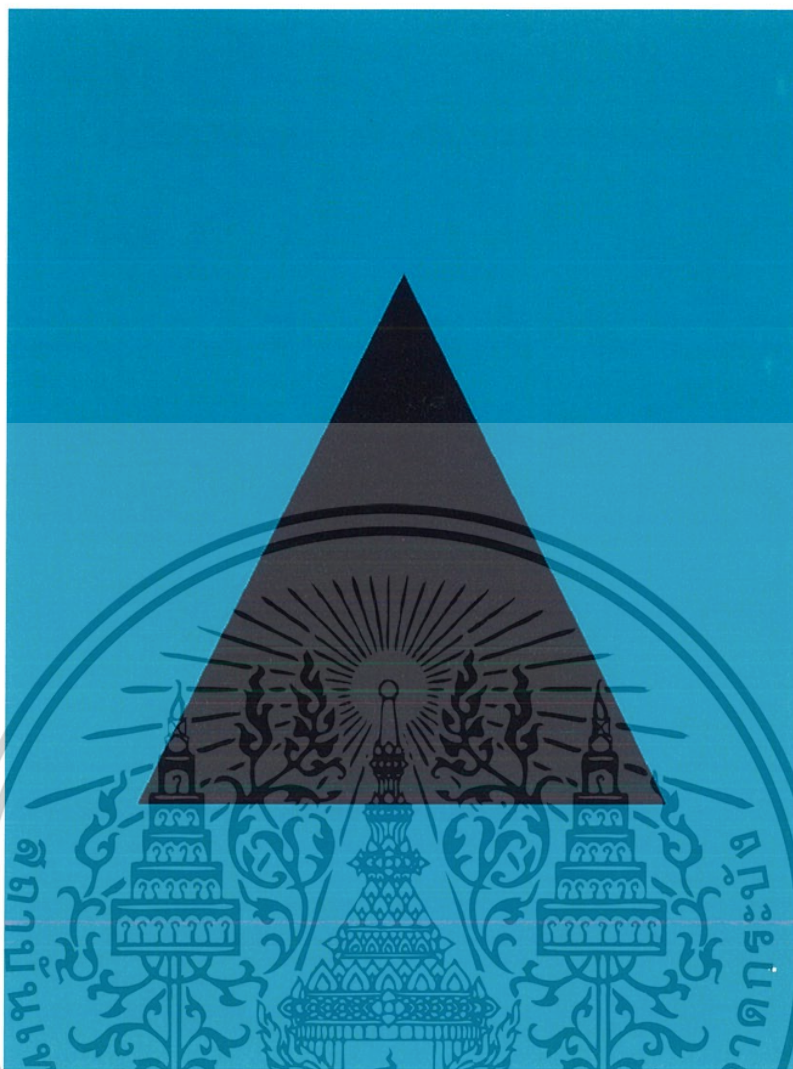
รูปที่ 4.19 แสดงผลคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผ่านตัวกลางที่มีดัชนีหักเหติดลบเท่ากับ -4 ผ่าน GUI

ผลลัพธ์ที่ได้ก็จะมิกากับผลในหัวข้อที่ 4.1 แต่ในส่วนของ GUI จะสะดวกในการใช้งานมากกว่าซึ่งเหมาะสำหรับนักศึกษาหรือผู้ใช้งานไปที่ต้องการจะศึกษา

4.4 ผลการคำนวณด้วยวิธี FDTD แบบ 2 มิติ

ผลการศึกษากระบวนการแสดงคุณสมบัติของแสงในตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหลบ ด้วยระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่องในโดเมนเวลา (FDTD) ซึ่งปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นหลังจากที่แสงเดินทางผ่านตัวกลางที่มีดัชนีหักเหเป็นบวก (Positive Refractive Index) และเดินทางผ่านตัวกลางที่มีดัชนีหักเหเป็นลบ (Negative Refractive Index) โดยมีการสร้างรูปแบบจำลองของตัวกลางที่มีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยม ดังรูปที่ 4.20 เมื่อแสงเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่มีดัชนีหักเหที่ต่างกัน (จากตัวกลางที่มีดัชนีหักเหเป็นลบไปตัวกลางที่มีดัชนีหักเหเป็นบวก) ทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นจะเป็นไปเป็นทิศทางตรงข้ามกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับโดเมนเวลา ดังแสดงดังรูปที่ 4.21 – 4.25

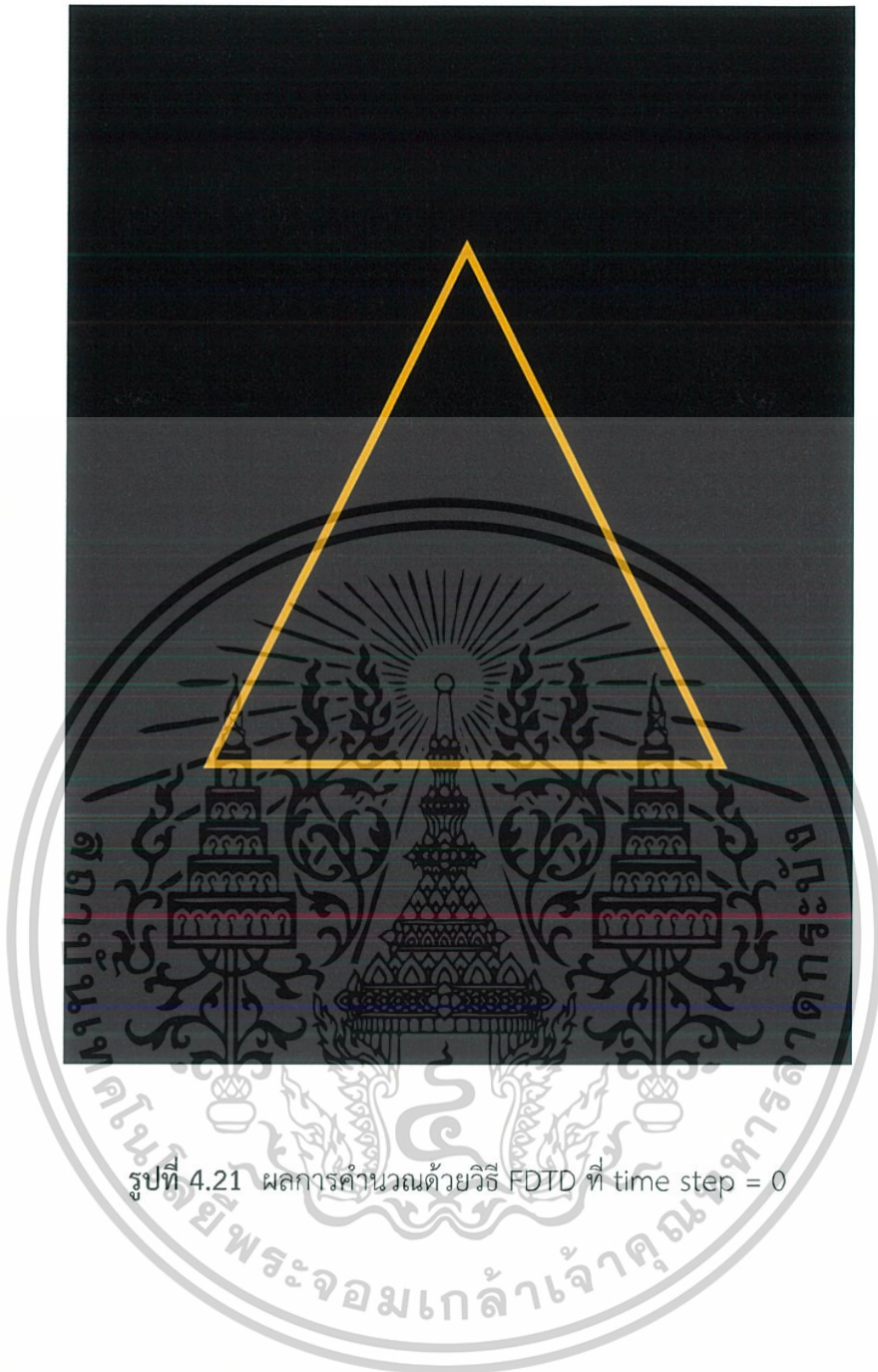
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 รูปแบบจำลองของตัวกลางดัชนีหักเหลบ ขนาด 601 x 801 pixel

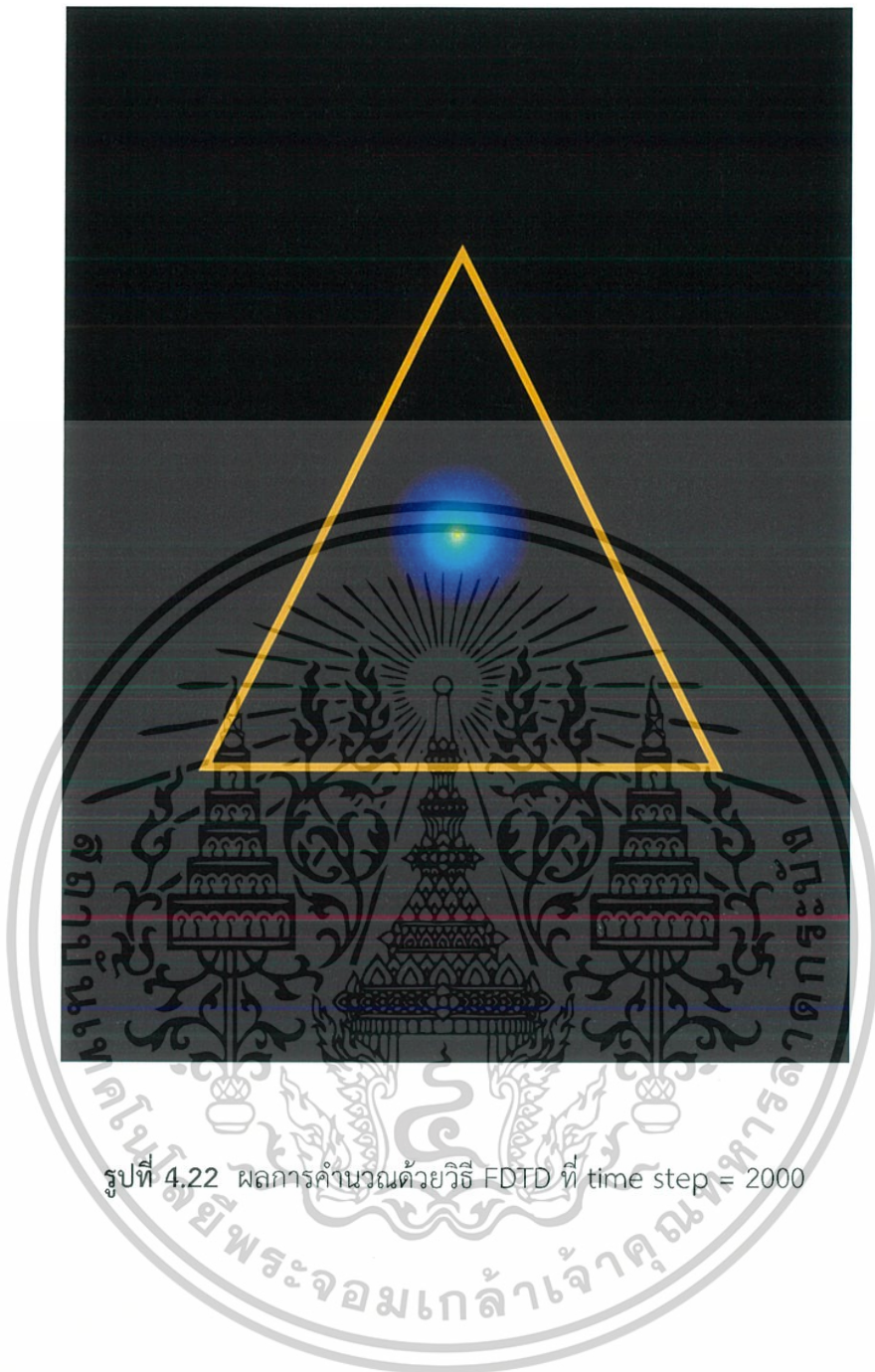
ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการนำรูปแบบจำลองของตัวกลางดัชนีหักเหลบ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 นำไปคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้สำหรับกระบวนการจำลองโดยใช้วิธี FDTD ตามกระบวนการที่แสดงแผนผังการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่คำนวณด้วยวิธี FDTD ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ข้างต้นและคำนวณโดยใช้หน่วยประมวลผลกราฟฟิก (GPU) NVIDIA GeForce GTX 1050 Ti, CUDA Cores : 768 CUDA Cores, Base Clock : 1290 MHz, VRAM : 4 GB GDDR5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



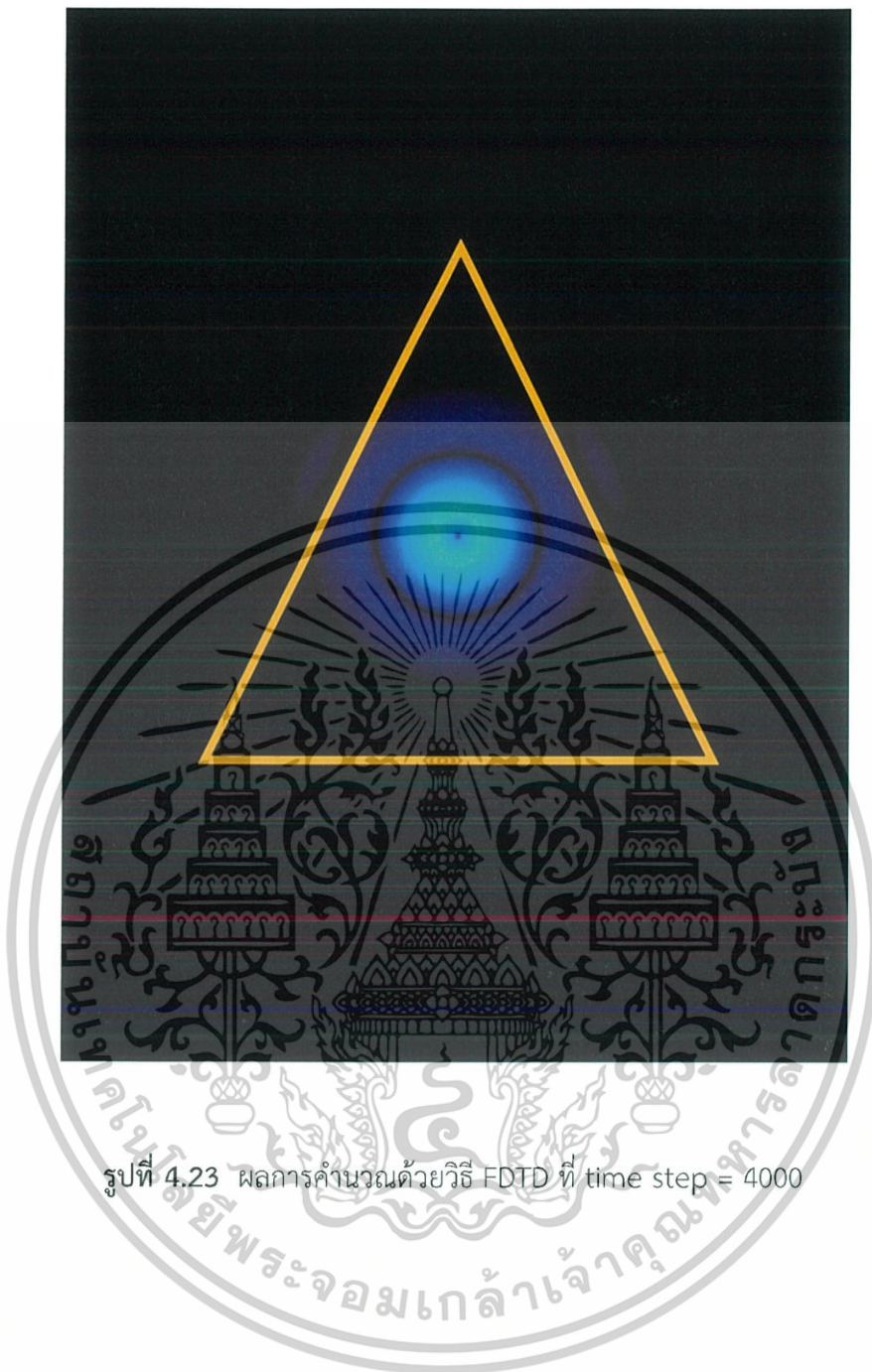
รูปที่ 4.21 ผลการคำนวณด้วยวิธี FDTD ที่ time step = 0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



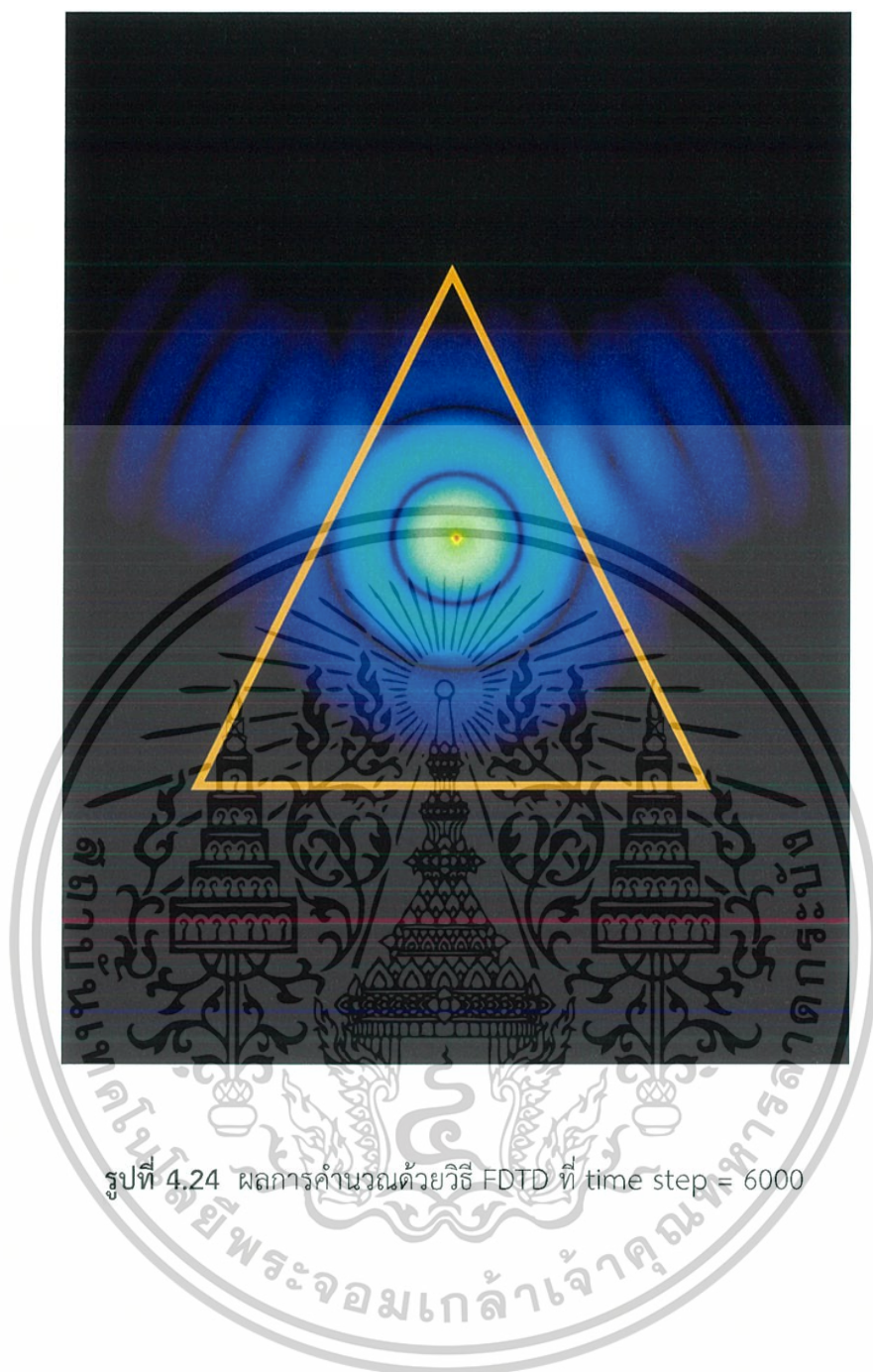
รูปที่ 4.22 ผลการคำนวณด้วยวิธี FDTD ที่ time step = 2000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 ผลการคำนวณด้วยวิธี FDTD ที่ time step = 4000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.25 ผลการคำนวณด้วยวิธี FDTD ที่ time step = 8000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การศึกษาระบบการแสดงความสัมพันธ์ของแสงในตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหเลบ ด้วยระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่องในโดเมนเวลา (FDTD) ในบทนี้เป็นการสรุปผลการทดลองคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผ่านเข้าไปในตัวกลางที่มีดัชนีหักเหติดลบทั้งแบบ 1 มิติและ 2 มิติ อีกทั้งยังเสนอปัญหาที่ได้เจอระหว่างปฏิบัติงาน ข้อเสนอแนะแนวทางในการปรับปรุงและแผนงานในอนาคต

5.1 สรุปผลการวิจัย

- 1) จากแบบจำลองของลอเรนซ์ (Lorentz model) พบว่าเมื่อทำการใส่ค่าความถี่เรโซแนนท์และความถี่พลาสมาตัวกลางจะแสดงความสัมพันธ์มีดัชนีหักเหติดลบที่เป็นช่วงเท่านั้นที่นำมาใช้ได้โดยความถี่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผ่านเข้าไปนั้นจะให้คุณสมบัติค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าและค่าซึมซาบแม่เหล็กที่แตกต่างกันส่งผลให้มีดัชนีหักเหที่แตกต่างกันออกไป
- 2) จากผลการทดลองในหัวข้อ เมื่อทำการใส่ค่าความถี่เข้าไปในโปรแกรมที่เขียนขึ้นมาพบว่าเมื่อคลื่นเดินทางไปถึงตำแหน่งที่มีดัชนีหักเหติดลบคลื่นจะเกิดการกลับเฟสจากเดิมไป และจะเห็นทิศทางการส่งผ่านของพลังงานมีทิศทางไปในทางตรงกันข้ามและเมื่อคลื่นเดินทางผ่านออกมาจะพบอีกว่าคลื่นได้มีการกลับเฟสคืนสู่สภาพเดิม
- 3) เมื่อเปลี่ยนค่าความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าพบว่าจะส่งผลกับค่าดัชนีหักเหมีค่าเปลี่ยนแปลงไปเมื่อคลื่นเดินทางเข้าไปในตัวกลางที่มีดัชนีหักเหติดลบจะพบว่าคลื่นจะมีความถี่ที่เปลี่ยนแปลง เพราะฉะนั้นดัชนีหักเหเปลี่ยนจะทำให้ความถี่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปด้วยแต่หลังจากที่คลื่นออกมาก็จะมีความถี่เท่าเดิมกับเริ่มแรก
- 4) โปรแกรมที่สร้างโดย GUI ให้ผลลัพธ์ที่เหมือนกันแต่มีความสะดวกในการศึกษามากกว่าแบบ manual ที่ต้องแก้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ผ่านใน m-file ทำให้ผู้ที่ไม่มีพื้นฐานทางด้านเขียนโปรแกรมยากต่อการใช้งาน แต่ GUI สามารถใช้งานได้อย่างสะดวกมากยิ่งขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

การกำหนดขนาดของความยาวคลื่นให้มีขนาดเล็กจะส่งผลให้ความละเอียดของการคำนวณมีค่ามากขึ้นทำให้คอมพิวเตอร์ได้รับการประมวลผลที่มากขึ้นทำให้เกิดข้อผิดพลาดขึ้นเช่น คอมพิวเตอร์ค้าง หรือในบางครั้งเครื่องดับไป เพราะฉะนั้นการกำหนดค่าความยาวคลื่นควรกำหนดให้อยู่ในช่วงไมโครเวฟขึ้นไปเพื่อประสิทธิภาพในการคำนวณและยังลดภาระงานของหน่วยประมวลผลของเอกสารเป็นเอกสารที่ส่งงานไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนคอมพิวเตอร์ได้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1) ได้เข้าใจทฤษฎีในหัวข้อที่นำมาวิจัยเช่น คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า อภิวัด และการเขียนโปรแกรม โดย MATLAB ภาษาซี เป็นต้น
- 2) ผลงานที่ได้สามารถนำไปเป็นสื่อการเรียนรู้ให้นักศึกษาค้นคว้าทดลองเกี่ยวกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผ่านเข้าไปในตัวกลางที่มีดัชนีหักเหติดลบได้
- 3) สามารถนำวิธีการหาผลต่างในโดเมนเวลาที่ได้ศึกษาพื้นฐานมาไปประยุกต์ใช้ศึกษากับสิ่งอื่นๆ ได้

5.4 การดำเนินการวิจัยในอนาคต

- 1) พัฒนาให้สามารถสร้างแบบจำลอง 2 มิติลงบน GUI โดยให้สามารถใส่ค่ามุมตกกระทบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้
- 2) พัฒนางานวิจัยที่มีอยู่ให้ดียิ่งขึ้นเพื่อให้เป็นผลงานสู่วิชาการหรือตีพิมพ์ต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- Aysegül Pekmezci, Levent Sevgi ; FDTD-Based Metamaterial (MTM) Modeling and Simulation., IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2006.
- D. Sullivan ; Electromagnetic Simulation Using the FDTD Method 2nd , IEEE Press – John Wiley. New York, 2013.
- V. G. Veselago, P. N. Lebedev ; The Electrodynamics of Substances with Simultaneously Negative Values of Permittivity and Permeability., Soviet Physics, 10, 4 : 509-514, 1968.
- G. Monti, L. Tarricone. ; Dispersion Analysis of a Negative Group Velocity Medium with MATLAB., CES JOURNAL. VOL. 24, NO. 5, 2009.
- Nilam T. Kadam, Kiran S. Janwalkar, Anuja A. Odhekar. ; Parameter Extraction for Negative Index Metamaterials, International Journal of Computer Applications, 0975 – 8887, 2015.
- G. Akram, Y. Jasmy. ; Simulation of the Finite Difference Time Domain in Two Dimension, International Journal of Computer and Information Engineering. Vol:6, No:3, 2012.
- John B. Schneider. ; Introduction to the FDTD Method: The Yee Algorithm, 2017.
- D. Sullivan and J. L. Young. ; Far-field time-domain calculation from aperture radiators using the FDTD method, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 49(3) : 464–469, March, 2001.
- A. Taflove and S. Hagness. Computational Electrodynamics. ; The Finite-Difference Time-Domain Method, 3 ed. Artech House, Boston, MA, 2005.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้